


СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ МОЩНЫМИ КВ-РАДИОВОЛНАМИ НА ЧАСТОТАХ ИЗЛУЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ГИРОГАРМОНИК ЭЛЕКТРОНОВ И КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2

SPECTRAL FEATURES OF IONOSPHERIC PLASMA WAVES EXCITED BY POWERFUL HF RADIO WAVES RADIATED AT FREQUENCIES NEAR ELECTRON GYROHARMONICS AND F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY

Т.Д. Борисова 

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

Н.Ф. Благовещенская 

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

А.С. Калишин 

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

T.D. Borisova

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

N.F. Blagoveshchenskaya

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

A.S. Kalishin

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

Аннотация. Представлены результаты исследований характеристик продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации КВ нагревного стенда EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия). Мощные КВ-радиоволны 20 октября 2012 г. и 26 февраля 2013 г. излучались в направлении магнитного зенита при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения (*ERP*). Частота излучения комплекса f_H 26 февраля 2013 г. была близка критической частоте f_oF2 слоя F2, ($f_H/f_oF2 \sim 1$) и превышала частоту гирорезонанса электронов $f_H > 5f_{ce}$. Для f_H 20 октября 2012 г. выполнялись условия $f_H/f_oF2 \sim 0.85-0.95$ и $f_H < 6f_{ce}$. Анализ данных измерений EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц, пространственно-совмещенного с нагревным стендом для условий излучения $ERP < 200$ МВт, показал, что возбуждение параметрических распадных неустойчивостей происходит на высотах в ионосфере, где наблюдается близость частоты накачки и плазменной ленгмюровской частоты $f_H \approx f_{PL}$. Исследованы особенности возбуждения распадных параметрических неустойчивостей в зависимости от высоты, поляризации волны накачки и соотношений между f_H и f_oF2 , а также f_H и nf_{ce} .

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, F-область, мощная КВ-радиоволна, ленгмюровская волна, ионно-акустическая волна, радар некогерентного рассеяния радиоволн, EISCAT.

Abstract. We present the result of the studies into characteristics of high-latitude ionospheric F-region longitudinal plasma waves (Langmuir and ion-acoustic), caused by the impact of powerful HF radio waves of ordinary (O-mode) or extraordinary (X-mode) polarization of the EISCAT/Heating facility, Tromsø, Norway. The powerful HF radio waves on October 20, 2012 and February 26, 2013 were emitted in the direction of the magnetic zenith with a step change in the effective radiation power (*ERP*). The radiation frequency f_H of the EISCAT/Heating facility on February 26, 2013 was close to the F2-layer critical frequency f_oF2 ($f_H/f_oF2 \sim 1$) and exceeded the electron gyroresonance frequency $f_H > 5f_{ce}$. On October 20, 2012, the conditions $f_H/f_oF2 \sim 0.85-0.95$ and $f_H < 6f_{ce}$ were fulfilled. Analysis of EISCAT measurements of an incoherent scatter radar (ISR) at a frequency of 930 MHz, spatially aligned with the heating facility for radiation conditions $ERP < 200$ MW, has shown that parametric decay instabilities are excited at the ionospheric heights where the pump frequency is close to the plasma Langmuir frequency, $f_H \approx f_{PL}$. We have studied peculiarities of excitation of the decay parametric instabilities as a function of height in the ionosphere and pump wave polarization, the ratios between f_H and f_oF2 , and also f_H and nf_{ce} .

Keywords: high-latitude ionosphere, F-region, powerful HF radio wave, Langmuir wave, ion-acoustic wave, incoherent scatter, EISCAT.

ВВЕДЕНИЕ

Работа является продолжением исследований [Борисова и др., 2023], в которой по данным экспериментов на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating определены условия генерации и пороговые (минимальные) значения электрического поля волны накачки в F-области ионосферы, необходимые для создания каналов повышенной плотности электронов E_{ionNe} , генерации плазменных ленгмюровских и ионно-акустических волн E_{ionPL} и E_{ionIL} при O- и X-нагреве. Расчеты минимальных значений электрического поля мощной КВ-радиоволны E_{ion} выполнены с учетом неотклоняющего поглощения на пути распространения волны накачки.

Современное состояние исследований возбуждения различных параметрических распадных неустойчивостей, таких как периодическая стрикционная (англ. parametric decay instability, PDI), аperiodическая стрикционная (англ. oscillating two stream instability, OTSI) [Гуревич, 2007; Robinson, 1989] и тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивости (англ. the thermal (resonance) parametric instability, TPI) [Васьков, Гуревич, 1979; Грач и др., 1977; Stubbe, 1996] в периоды экспериментов по модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами представлено в [Борисова и др., 2023]. Развитие PDI и OTSI непосредственно идентифицируются в спектрах радара HP как инициированные нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленные ионно-акустические линии (HF-enhanced ion lines, HFIL), что является достоверным признаком возбуждения продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических).

Целью настоящей работы является исследование спектральных характеристик плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) по данным EISCAT радара и изучение зависимости эффектов генерации искусственных ионосферных турбулентностей от высоты в ионосфере. Анализ характеристик искусственной турбулентности выполнялся по экспериментальным данным модификации F-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации в условиях близости f_H и f_oF2 при пошаговом изменении ERP нагревного стенда. Общая характеристика проведенных экспериментов представлена в [Борисова и др., 2023].

1. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

По данным наблюдений EISCAT радаром HP (930 МГц) [Rishbeth, van Eyken, 1993] рассмотрены условия и характеристики возбуждения плазменных ленгмюровских и ионно-акустических волн на высотах F-слоя высокоширотной ионосферы в периоды экспериментов 26 февраля 2013 г. и 20 октября 2012 г. на нагревном стенде EISCAT/Heating [Rietveld et al., 2016]. Мощная КВ-радиоволна 26 февраля 2013 г. излучалась на частоте $f_H = 7.1$ МГц, близкой к критической частоте слоя F2 ($f_H/f_oF2 \sim 1$), при этом f_H была выше частоты пятой гирогармоники электронов ($f_H > 5f_{ce}$ на 0.26 МГц). В другом эксперименте (20 октября 2012 г.) использовалась частота $f_H = 7.953$ МГц,

лежащая ниже f_oF2 ($f_H/f_oF2 \sim 0.89-0.94$) и ниже частоты шестой гирогармоники электронов ($f_H < 6f_{ce}$ на 0.187 МГц). В обоих экспериментах излучение проводилось циклами: нагрев — 10 мин; пауза — 5 мин. Эффективная мощность излучения ERP ступенчато изменялась в цикле нагрева.

С использованием унифицированного комплекса программ GUISDAP [Lehtinen, Huuskonen, 1996] рассчитывались интенсивности спектральных максимумов плазменных ленгмюровских S_{PL} и ионно-акустических S_{IL} волн в диапазонах времени t (мировое время UT) рассматриваемых экспериментов и в интервале высот от 150 до 278 км. Интегрирование данных радара проводилось с шагом 30 с по времени и 3 км по высоте. Отметим, что в период экспериментов EISCAT радар в высокочастотном канале измерений регистрировал плазменные волны, сдвинутые вниз относительно частоты радара (downshifted plasma lines) (на рисунках частоты указаны со знаком минус «-»). Графическое представление результатов интегрирования выполнено в среде MatLab.

Развитие параметрических распадных неустойчивостей PDI и OTSI на высотах ионосферы вблизи отражения мощной КВ-радиоволны сопровождается возникновением ионно-акустической и ленгмюровской турбулентностей. Спектральными измерениями радара HP в низкочастотном диапазоне регистрируются усиленные нагревом ионно-акустические линии (HFIL), а в высокочастотном диапазоне — инициированные нагревом ленгмюровские линии (HFPL). Для плазмы в тепловом равновесии спектр сигналов в низкочастотной области, как правило, имеет форму с двумя максимумами спектральной интенсивности S_{IL} , смещенными по частоте относительно нулевой частоты в отрицательную S_{ILD} (в англ. литературе downshifted ion lines) и положительную S_{ILU} (upshifted ion lines) стороны, которые соответствуют ионно-акустическим волнам, смещенным от частоты радара в положительную и отрицательную стороны. В условиях возбуждения OTSI усиливается несмещенный относительно нуля максимум S_{ILO} (nonshifted ion lines). Значение доплеровского смещения максимумов S_{IL} относительно нуля в спектре $S_{IL}(f)$ зависит от частоты излучения радара и скорости ионного звука. Величина доплеровского смещения для радара EISCAT на высотах F-области ионосферы составляет порядка $f_{IA} = \omega_{IA}/(2\pi) \approx 10$ кГц. Для ионосферных параметров, характеризующих средние фоновые условия ионосферного слоя F над нагревным комплексом в дневное время (например, $T_e = 1700$ К и $T_i = 1000$ К), имеем $f_{IA} \sim 9.5$ кГц. В периоды нагревных экспериментов регистрируются возрастания T_e в F-слое ионосферы. В этих условиях для параметров ионосферы ($T_e = 2500$ К и $T_i = 1200$ К) f_{IA} возрастает до ~ 10.8 кГц.

На рис. 1 показаны результаты спектральной обработки сигналов радара HP 20 октября 2012 г. с 13.30 до 14.30 UT в виде высотно-временных распределений спектральных максимумов ленгмюровских волн $S_{PL}(t, h)$ (рис. 1, а) и ионно-акустических волн $S_{ILD}(t, h)$, $S_{ILO}(t, h)$, $S_{ILU}(t, h)$ (рис. 1, б, в, г). Нагревной стенд EISCAT/Heating излучал мощные

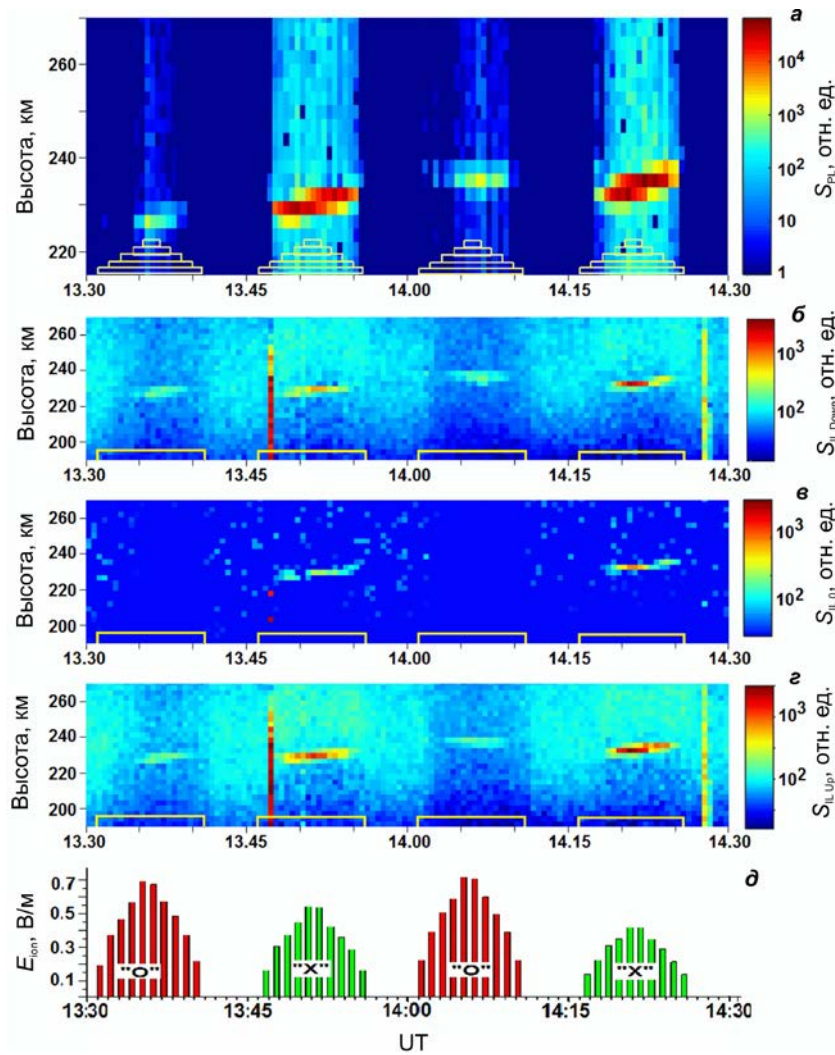


Рис. 1. Высотно-временные распределения интенсивностей максимумов спектральных линий 20 октября 2012 г. плазменного (ленгмюровского) и ионно-акустического диапазонов: *a* — S_{PL} ; *b* — S_{ILD} ; *c* — S_{IL0} ; *d* — S_{ILU} в интервале высот 190–270 км; *e* — схема изменения рассчитанного электрического поля волны накачки в ионосфере E_{ion} и поляризации нагревного сигнала

КВ-радиоволны на частоте $f_H=7.953$ МГц O- или X-поляризации в высокоширотную F-область ионосферы в направлении магнитного зенита при ступенчатом изменении ERP . Значения S_{PL} и S_{IL} приводятся в относительных единицах (о.е.) в логарифмическом масштабе. Схема изменения электрического поля волны накачки в ионосфере E_{ion} , рассчитанного с учетом поглощения в нижележащих слоях [Борисова и др., 2023], и поляризация нагревного сигнала показаны на рис. 1, *d*. В циклах X-нагрева наблюдается возрастание высоты возбуждения HFPL (рис. 1, *a*). Особенностью X-нагрева явилось усиление максимума S_{IL0} (рис. 1, *e*), что указывает на возбуждение в резонансной области двухпоточковой OTSI. Этот эффект ранее отмечался в [Blagoveshchenskaya, 2020]. Интенсивности S_{ILD} , S_{IL0} , S_{ILU} и S_{PL} в циклах X-нагрева на порядок выше, чем S_{IL} и S_{PL} в циклах O-нагрева. Анализ рис. 1 показывает, что в моменты включений нагревного комплекса для волны накачки O-моды наблюдались «эффекты включения» — кратковременные всплески интенсивностей рассеянных сигналов S_{IL} и S_{PL} (<200 мс), которые являются типичным проявлением параметрической распадной

(стрикционной) неустойчивости (PDI) по данным радара HP при O-нагреве [Kuo, Lee, 2005]. Эффектов включения при X-нагреве не наблюдалось. В ранее проведенных исследованиях показано, что даже при максимальной эффективной мощности излучения волны накачки X-моды проявления HFIL и HFPL начинались только через 10–20 с после включения передатчика нагревного стенда [Борисова и др., 2017; Blagoveshchenskaya, 2020].

На рис. 2 показаны данные распределений интенсивностей спектральных максимумов плазменных волн в ионосфере для нагревного эксперимента 26 февраля 2013 г. в 12.30–13.30 UT. Стенд излучал радиоволны на частоте $f_H=7.1$ МГц. Высотно-временные распределения $S_{PL}(t, h)$ (*a*), $S_{ILD}(t, h)$ (*b*), $S_{IL0}(t, h)$ (*c*) и $S_{ILU}(t, h)$ (*d*) даны в диапазоне высот 190–265 км. Циклы нагрева, схема изменения поля волны накачки в ионосфере E_{ion} при изменении ERP каждую минуту и поляризация волны показаны на рис. 2, *d*.

В эксперименте 26 февраля амплитуды естественных ленгмюровских волн на высотах вблизи максимума слоя F2 имели значения $S_{PL}\sim 1.0\text{--}1.5$ о.е.

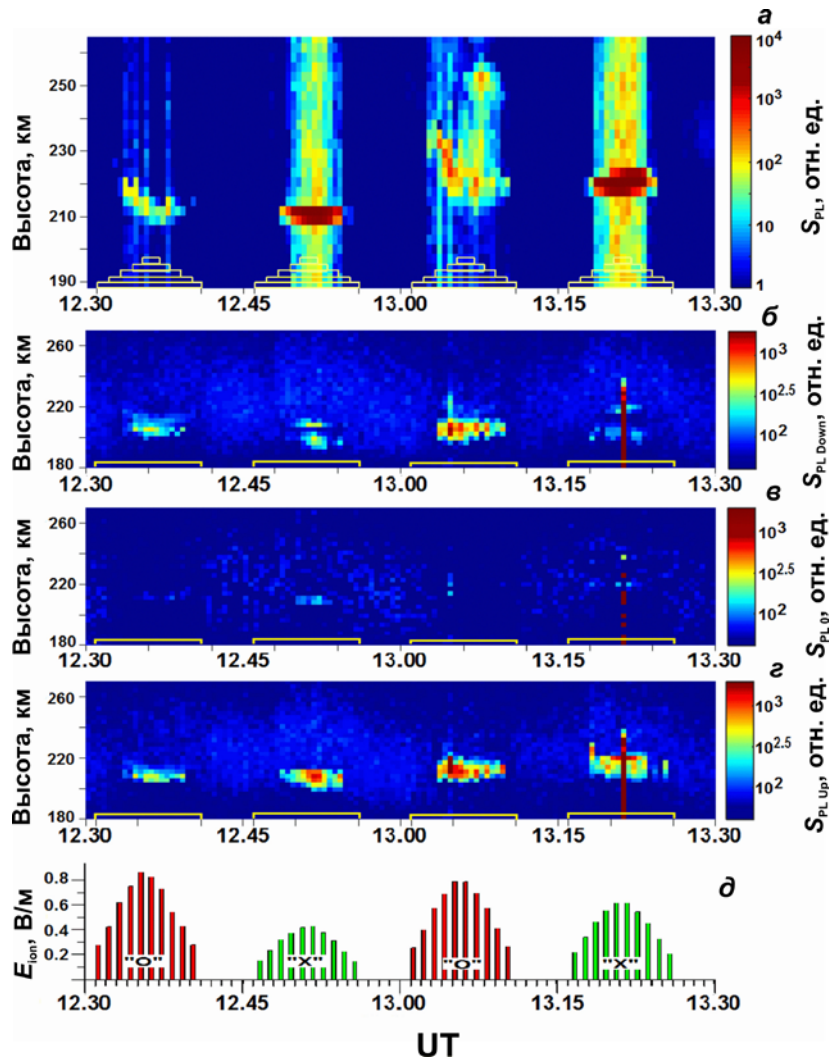


Рис. 2. Высотно-временные распределения интенсивностей максимумов спектральных линий 26 февраля 2013 г. плазменного (ленгмюровского) и ионно-акустического диапазонов: *a* — S_{PL} ; *b* — S_{ILD} ; *c* — S_{IL0} ; *d* — S_{ILU} в интервале высот 180–270 км; *d* — схема

При анализе высокочастотных данных радара в условиях $f_H \sim f_oF2$ фоновым было принято значение $S_{PL,фон} \sim 1.6$ о.е. Фоновые значения для низкочастотного диапазона составили $S_{IL,фон} \sim 70-80$ о.е.

Анализ максимумов интенсивностей спектральных линий S_{IL} и S_{PL} (рис. 2) показывает, что в моменты включений нагревного комплекса для волны накачки O-моды наблюдались очень слабые эффекты включения, спектральные амплитуды S_{IL} и S_{PL} были сопоставимы с $S_{PL,фон}$ и $S_{IL,фон}$. Сигналы S_{PL} регистрировались на высотах, близких максимуму слоя F2, и имели амплитуды $S_{PL} \sim 1.8-1.9$ о.е. Эффектов включений при X-нагреве не наблюдалось.

Отметим поведение высоты возбуждения ленгмюровских волн при O-нагреве. После начального проявления S_{PL} по мере возрастания ERP до ERP_{max} высота h_{PL} возбуждений максимумов S_{PL} снижалась и при уменьшении ERP во второй половине цикла h_{PL} более медленно возрастала. Значения S_{PL} с ростом ERP в период цикла 12.31–12.41 UT возрастали от 3 до 200 о.е., а в цикле 13.01–13.11 UT — от 7 до 450 о.е. При понижении ERP значения S_{PL} уменьшались.

Особый характер возбуждений S_{IL} и S_{PL} наблюдался в цикле O-нагрева 13.01–13.11 UT, когда вы-

полнялись условия $f_oF2 < f_H < f_{\chi}F2$ ($f_oF2 \sim 7$ МГц), где $f_{\chi}F2$ — необыкновенная критическая частота слоя F2. В этом цикле резко увеличились амплитуды максимумов S_{ILD} , S_{ILU} и S_{PL} . Другой характерной чертой цикла 13.01–13.11 UT при излучении максимальной мощности ERP_{max} явилось возбуждение HFPL на высотах $h_{PL} \sim 247-255$ км (выше максимума слоя F2, $h_{mF2} \sim 237-242$ км) с амплитудами $S_{PL} \sim 20-100$ о.е.

На рис. 3 показаны графики вариаций высоты $h_{PL}(t)$ и спектральных интенсивностей $S_{PL}(t)$ ленгмюровских волн, вызванных нагревом мощными КВ-радиоволнами нагревного комплекса EISCAT/Heating 26 февраля 2013 г.

Еще одним отличием при O-нагреве в условиях $f_H \sim f_oF2$ (в обоих циклах) явилось также возбуждение спектральных максимумов S_{PL} на частотах, смещенных от f_H в сторону увеличения частоты на 200–400 кГц (см. рис. 4, *a3* и рис. 1, *z* в [Борисова и др., 2023]). Интенсивности S_{PL} на смещенных частотах были сопоставимы или превышали S_{PL} вблизи частот накачки.

При X-нагреве (см. рис. 2, *b*) наблюдались два трека $S_{IL,down}$, разнесенных на 10–20 км. Нижняя высота

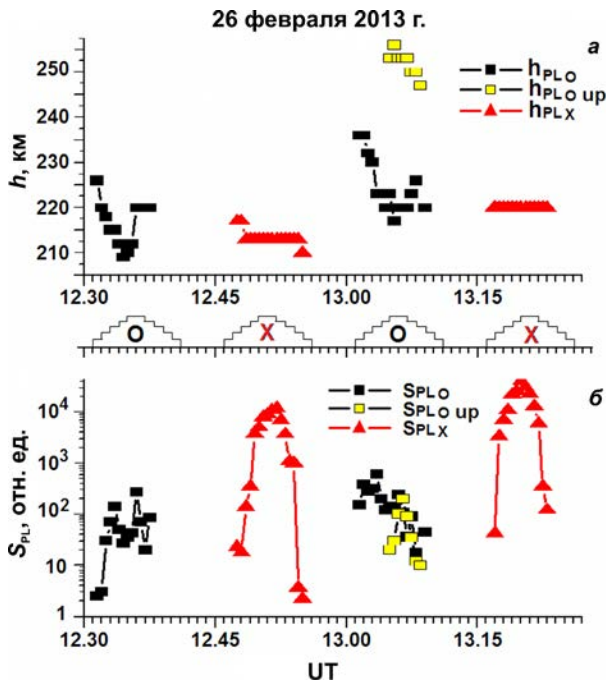


Рис. 3. Вариации высоты $h_{PL}(t)$ (a) и спектральных интенсивностей $S_{PL}(t)$ (b) ленгмюровских волн, вызванных нагревом 26 февраля 2013 г.

близка к высоте отражения волны накачки X-моды, верхняя — к высоте верхнего гибридного резонанса h_{UH} , на которой выполняется условие

$$f_H \approx f_{UH} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{ce}^2},$$

где f_{UH} — частота верхнего гибридного резонанса; f_{pe} — локальная частота ионосферной плазмы; f_{ce} — гирочастота электронов. Ранее эффект отмечался в [Bragoveshchenskaya, 2020]. В циклах X-нагрева при излучении волны накачки с максимальной мощностью ERP_{max} регистрировались максимумы S_{ILO} , которые указывают на возбуждение OTSI. Амплитуды ленгмюровских волн S_{PL} при X-нагреве изменялись от 4 до $4 \cdot 10^4$ о.е. по мере увеличения ERP в цикле и регистрировались на постоянной высоте. Интенсивности S_{PL} и S_{IL} при X-нагреве на порядок выше, чем в циклах O-нагрева. При X-нагреве максимумов S_{PL} на смещенных частотах не наблюдалось.

На рис. 4, a, б показаны ионограммы ВЗ ионосферы, полученные 26 февраля 2013 г. для моментов времени перед началом O- и X-нагрева циклов 12.31–12.41 UT и 13.16–13.26 UT соответственно. Распределения ленгмюровских частот ионосферы по высоте $S_{PL}(f, h)$, построенные по данным измерений высокочастотного канала радара НР 26 февраля 2013 г. даны для моментов времени 12.31.00 UT (невозмущенная ионосфера перед началом O-нагрева, $ERP=0$ МВт) (панель a1) и 12.33.00 UT (в период излучения $ERP=190$ МВт, $E_{ion} \sim 0.34$ В/м) (панель a2). Панели б1 и б2 показывают распределения $S_{PL}(f, h)$ невозмущенной ионосферы в 13.15.58 UT перед началом цикла X-нагрева и в $t=13.17.30$ UT при излучении $ERP=27$ МВт, $E_{ion} \sim 0.24$ В/м. На панелях a1, б1 можно видеть профили распределения максимумов ленгмюровских частот фоновой ионосферы слоя F2 по высоте $f_{PL, fon}(h)$. Панели a2 и б2 даны для

иллюстрации одновременного наблюдения высотного профиля $f_{PL, fon}(h)$ и максимумов S_{PL} , вызванных возбуждением HFPL вблизи f_H . Если интенсивность максимума S_{PL} становится выше фоновый уровень $S_{PL, fon}$ более чем в 5–7 раз, профиль $f_{PL, fon}(h)$ на распределении $S_{PL}(f, h)$ в период нагрева при обработке спектральных данных не виден и на $S_{PL}(f, h)$ наблюдается только максимум S_{PL} на частоте f_H . На панелях a1, a2, б1, б2 изменения частот показаны со знаком минус, но в направлении возрастания значений. Распределения $S_{PL}(f, h)$ показаны для диапазона высот 210–270 км при изменении частоты f_{PL} от -6.9 до -7.5 МГц. На ионограммах ВЗ (панели a, б) на оси частот прямоугольником отмечен диапазон изменения f_{PL} распределений $S_{PL}(f, h)$. На панелях a3, б3 показаны спектры $S_{PL}(f)$ для моментов $t=12.33.00$ UT O-нагрева на заданной высоте 216 км и для X-нагрева $t=13.17.29$ UT на заданной высоте 219 км, соответствующие распределениям $S_{PL}(f, h)$, представленным на панелях a2, б2.

Для условий излучения $ERP=190$ МВт O-нагрева (панель a2) одновременно можно видеть профиль $f_{PL}(h)$ максимумов ленгмюровских частот слоя F2 и возбуждение каскада плазменных линий около частоты накачки $f_H=7.1$ МГц. Небольшой максимум на этой частоте (панели a2, a3) свидетельствует о возникновении стоячей ленгмюровской волны, т. е. возбуждении OTSI. Максимум S_{PL} на частоте $f_H-0.01$ МГц соответствует «материнской» ленгмюровской волне, а на частоте $f_H-0.03$ МГц — «дочерней». Наблюдается также возрастание интенсивности S_{PL} около частоты 7.3 МГц.

При X-нагреве (панель б2) максимумы S_{PL} возбуждаются вблизи частоты $f_H-0.01$ МГц, смещенной от частоты накачки f_H .

На панелях a2, б2 можно видеть, что возбуждение неустойчивости HFPL происходит на высоте в ионосфере, где выполняется условие $f_H \approx f_{PL}$ фоновой плазмы.

На рис. 5 показаны частотные распределения по высоте параметров ионосферы для эксперимента 20 октября 2012 г. Ионограммы ВЗ ионосферы, полученные перед началом O- и X-нагрева в 13.30.30, 13.45.30 UT показаны на панелях a, б соответственно. Распределения $S_{PL}(f, h)$ для этих же моментов времени без нагрева показаны на панелях a1, б1. Диапазон частот $S_{PL}(f, h)$ отмечен прямоугольником на оси частот ионограмм ВЗ (панели a, б). На панелях a2, б2 показана $S_{PL}(f, h)$ в возмущенной ионосфере для O- и X-нагрева при условии, когда одновременно наблюдались профили $f_{PL, fon}(h)$ и максимумы ленгмюровских волн S_{PL} при возбуждении HFPL около частоты $f_H=7.953$ МГц для моментов 13.34.30 и 13.46.30 UT O- и X-нагрева. Поле волны накачки в ионосфере $E_{ion} \sim 0.56$ В/м в $t=13.34.30$ UT цикла O-нагрева и $E_{ion} \sim 0.28$ В/м в $t=13.46.30$ UT цикла X-нагрева.

На панелях a2, б2 видно также, что возбуждение максимума $S_{PL, fh}$ около $f_H=7.953$ МГц происходит на высоте в ионосфере, на которой значения f_H и f_{PL} фоновой плазмы близки.

На рис. 6 для эксперимента 20 октября 2012 г. показаны примеры спектров усиленных нагревом плазменных ленгмюровских волн на высотах с макси-

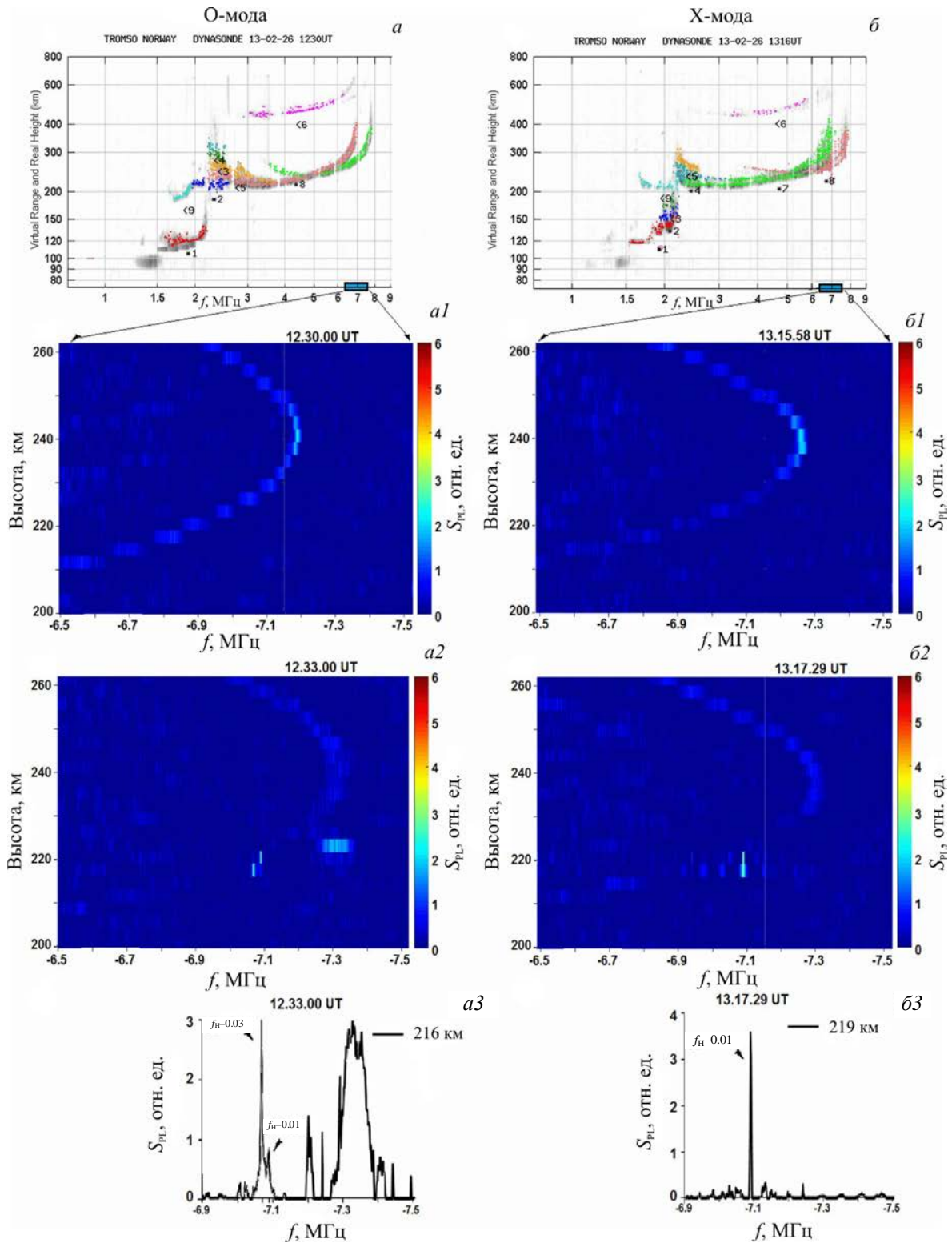


Рис. 4. Ионограммы ВЗ (Тромсё), полученные 26 февраля 2013 г. перед началом циклов нагрева на частоте накачки $f_H=7.1$ МГц О-моды (а) и Х-моды (б). Распределения плазменных (ленгмюровских) частот ионосферы $S_{PL}(f, h)$, построенные по данным радара HP EISCAT, для моментов времени 12.31.00 UT ($ERP=0$ МВт перед началом О-нагрева) (а1) и 12.33.00 UT (в цикле О-нагрева, $ERP=190$ МВт) (а2); спектр $S_{PL}(f)$ для момента $t=12.33.00$ UT на высоте 216 км (а3); при Х-нагреве 13.15.58 UT ($ERP=0$ МВт перед началом нагрева) (б1); 13.17.29 UT (в цикле Х-нагрева, $ERP=27$ МВт) (б2) и $S_{PL}(f)$ для момента $t=13.17.29$ UT на высоте 219 км (б3)

максимальными амплитудами S_{PL} при излучении волны накачки О-поляризации (а) и Х-поляризации (б). На панели а показаны спектры $S_{PL}(f)$ для интервалов времени 13:31–13:36 и 14:01–14:06 UT (О-нагрев), на панели б — для периодов 13.46–13.51 и 14:16–

14:21 UT (Х-нагрев) на фазе роста ERP в диапазоне от $f_H=7.953$ до $f_H-0.05$ МГц. Спектры рассчитаны без «момента включения».

При О-нагреве наблюдается последовательность нескольких максимумов. Небольшой максимум около

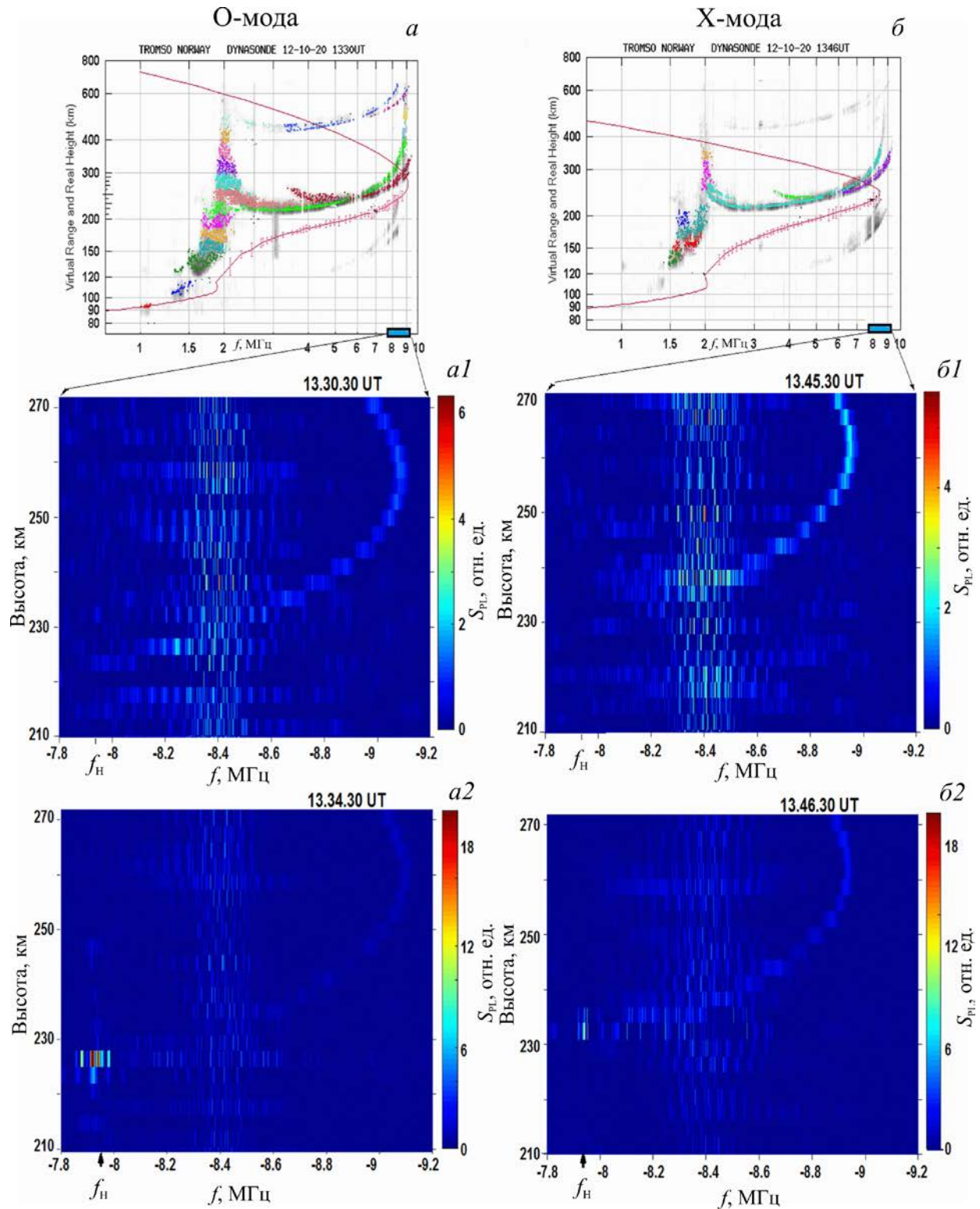


Рис. 5. Ионограммы ВЗ (Тромсё), полученные 20 октября 2012 г. перед началом циклов нагрева на частоте накачки $f_H=7.953$ МГц О-моды (а, слева) и Х-моды (б, справа). Распределения плазменных (ленгмюровских) частот ионосферы $S_{PL}(f, h)$, построенные по данным радара HP EISCAT, для моментов времени (а1) 13.30.30 UT ($ERP=0$ MW перед началом О-нагрева) и (а2) 13.34.30 UT (в цикле О-нагрева, $ERP=190$ MW); при Х-нагреве (б1) 13.45.30 UT ($ERP=0$ MW перед началом нагрева); (б2) 13.46.30 UT (в цикле Х-нагрева, $ERP=27$ MW)

$f_H=7.953$ МГц свидетельствует о возбуждении OTSI. Следующий максимум, сдвинутый на частоту ионных колебаний (~ 0.01 МГц), указывает на появление материнской ленгмюровской волны, обусловленной возбуждением электромагнитной параметрической распадной неустойчивости PDI. Спектральный мак-

симум со сдвигом порядка 0.02 МГц от частоты материнской ленгмюровской волны связан с процессом развития электростатической PDI, в котором дочерняя ленгмюровская волна возникает вследствие распада основной ленгмюровской моды. Особенность поведения S_{PL} проявилась в том, что интенсивности

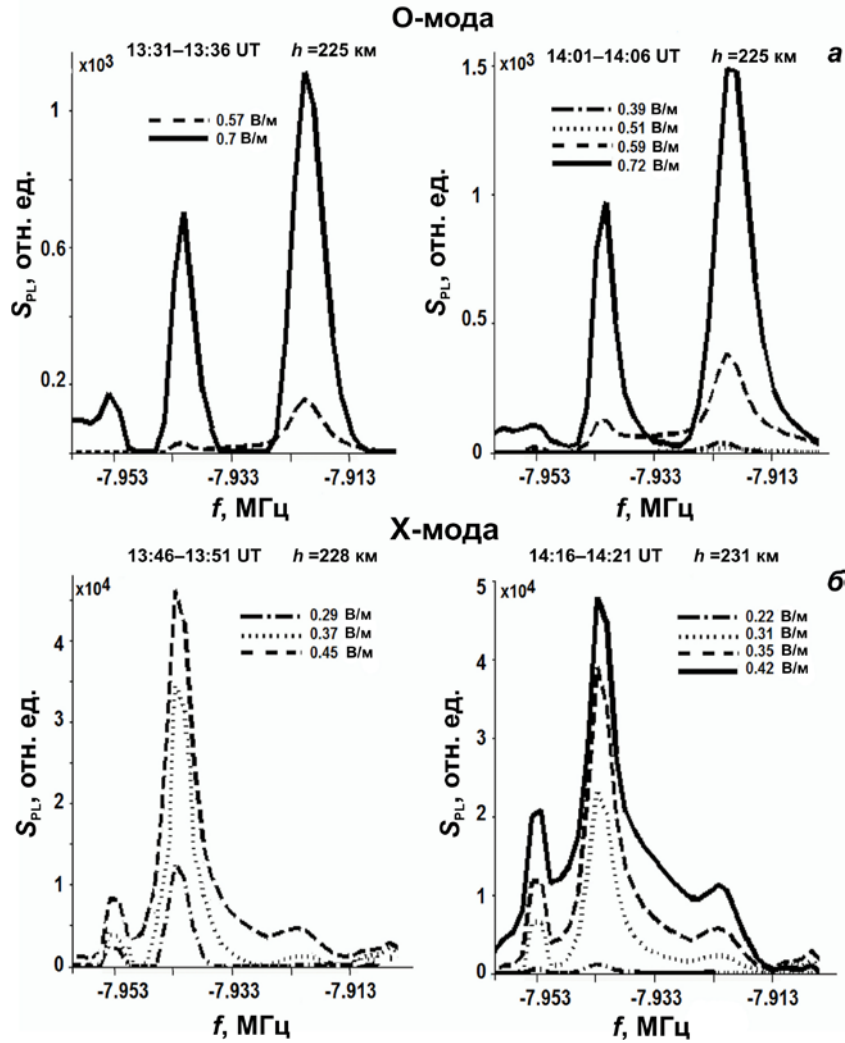


Рис. 6. Спектры плазменных волн $S_{PL}(f)$, инициированных нагревом в ионосфере волной накачки с $f_H = 7.953$ МГц 20 октября 2012 г. для условий $f_H/f_oF2 < 0.95$, показаны для первой половины циклов излучения комплекса EIS-CAT/Heating (стадия увеличения ERP): а — О-нагрев; б — Х-нагрев. Разными линиями показаны $S_{PL}(f)$ при изменении уровня поля $E_{iон}$ волны накачки, рассчитанного с учетом затухания на пути распространения

дочерних ленгмюровских волн были существенно выше амплитуд материнской волны. Данная особенность, согласно [Mishin, et al., 1997; Kuo, Lee, 2005], является отличительной для нерезонансного механизма (НРМ) возбуждения ленгмюровских волн. В НРМ возбуждения каскадов ленгмюровских волн учитываются эффекты затухания Ландау на ионах и они происходят на той же высоте, что и распад волны накачки. В этом случае дисперсионные соотношения при генерации дочерних волн Ленгмюра (каскада) не выполняются.

При Х-нагреве (панель б) значения максимумов амплитуд S_{PL} значительно выше (в 10–15 раз) по сравнению с О-нагревом. Спектры показывают наличие максимумов на частоте f_H и $f_H - 0.01$ МГц, что свидетельствует о возбуждении неустойчивостей OTSI и PDI.

2. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных (рис. 4, а, а1, б, б1) показывает различие значений критической частоты f_oF2 и частоты Ленгмюра $f_{PL,max}$ на высоте максимума слоя F2,

измеренных одновременно перед началом нагрева в 12.30 или 13.16 UT. Несоответствие объясняется дисперсией ленгмюровской волны в плазме с конечной температурой электронов. Дисперсионное уравнение для плазменной частоты волны Ленгмюра имеет вид [DuBois et al., 2001]

$$f_{PL}^2 = f_{pe}^2 + f_{ce}^2 \sin^2 \theta + \frac{3k^2 k_{Blz} T_e}{(2\pi)^2 m_e}, \quad (1)$$

где f_{pe} — плазменная частота ионосферы; f_{ce} — гирочастота электронов; θ — угол между направлением магнитного поля и ориентацией луча радара ($\theta = 0^\circ$ для 26 февраля 2013 г.); k — волновой вектор ленгмюровской волны; k_{Blz} — постоянная Больцмана; T_e , m_e — температура и масса электронов; для радара EISCAT на частоте 930 МГц $k = 38.23 \text{ м}^{-1}$.

При вычислении f_{PL} на высоте максимума слоя F2 с использованием (1) и данных измерений радара (температуры и плазменных частот электронов) (см. рис. 1 в [Борисова и др., 2023]) для времени $t1 = 12.30 \text{ UT}$ $T_e = 1550 \text{ К}$, $f_{pe} = f_oF2 = 7.0 \text{ МГц}$; для $t2 = 13.15:58 \text{ UT}$ $T_e = 1600 \text{ К}$, $f_{pe} = f_oF2 = 7.1 \text{ МГц}$ были

получены численные значения $f_{PL,max}=7.18$ МГц и $f_{PL,max}=7.28$ МГц для моментов $t1$ и $t2$, близкие к значениям измеренных радаром НР максимальных ленгмюровских частот (см. рис. 4, $a1$, $b1$) $f_{PL,max} \sim 7.18$ и 7.27 МГц соответственно для циклов О- и Х-нагрева.

Данные, показанные на рис. 4, $a2$, $b2$ и 5, $a2$, $b2$, получены в периоды излучения нагревным комплексом EISCAT/Heating при низких значениях эффективной мощности, когда создавалась возможность одновременного наблюдения профилей ленгмюровских частот ионосферы $S_{PL}(f, h)$ и проявления возбуждения неустойчивости HFPL около частоты накачки, инициированной нагревом плазменной линии, $S_{PL,PH}$. Возбуждение неустойчивости HFPL (см. рис. 4, $a2$, $b2$ и 5, $a2$, $b2$) происходит на высоте в ионосфере, где выполняется условие $f_H \approx f_{PL}$ фоновой плазмы. Возрастание высот возбуждения HFPL 20 октября 2012 г. ($f_H/f_oF2 < 1$) (см. рис. 1) наблюдается в циклах Х-нагрева, при этом возбуждение HFPL происходит на постоянной высоте при увеличении ERP в цикле О-нагрева. В эксперименте 26 февраля 2013 г. ($f_H/f_oF2 \sim 1$) (см. рис. 2) высоты возбуждений HFPL снижаются по мере возрастания ERP в циклах О-нагрева и остаются постоянными при Х-нагреве. Вариации высот возбуждения HFPL в нагревных циклах можно объяснить изменением распределения ленгмюровских частот ионосферы f_{PL} вследствие вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн изменений температуры T_e и концентрации N_e ($f_{pe} \sim \sqrt{N_e}$).

В работе [Борисова и др., 2018] исследовалось возбуждение ленгмюровских волн в периоды длительного нагрева на частотах, смещенных от частоты накачки f_H на сотни килогерц в сторону увеличения. Рассматривались возможные объяснения генерации на смещенных частотах спектральных максимумов ленгмюровских волн $S_{PL,out}$ благодаря дисперсионным свойствам ленгмюровской волны в плазме при учете конечной температуры электронов (free mode) [DuBois et al., 2001], а также в результате четырехволнового процесса взаимодействия волн Бернштейна и ионосферных плазменных и верхнегибридных волн, инициированных трансформацией волны накачки. Для условий 26 февраля 2013 г. и времени 12.33 UT на высоте 220 км плазменная частота $f_{pe}=6.62$ МГц, $f_{ce} \sim 1.395$ МГц, $T_e=3700$ К. Используя (1) получаем $f_{PL} \sim 7.1$ МГц.

Частота $f_H=7.1$ МГц выше пятой гармоники гирорезонанса $5f_{ce}$. Рассмотрим возможность объяснения генерации плазменных волн на частотах $f_{PL,out}$ при взаимодействии на высоте возбуждения PDI трех плазменных волн: продольной волны Ленгмюра с частотой f_{PL} , поперечной верхней гибридной волны на частоте $f_{UH} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{ce}^2}$ и поперечной волны Бернштейна с частотой $f_B=5f_{ce}$. Предположим, что в результате взаимодействия трех волн возникает четвертая продольная плазменная волна с частотой $f_{PL,out}$. Пусть для четырех частот высокочастотных волн f_B, f_{UH}, f_{PL} и $f_{PL,out}$ выполняется соотношение

$$f_B + f_{PL} = f_{UH} + f_{PL,out} \quad (2)$$

При этом условие волнового синхронизма имеет вид

$$\mathbf{k}_B - \mathbf{k}_{PL} = \mathbf{k}_{PL,out} - \mathbf{k}_{UH}$$

или

$$\mathbf{k}_B + \mathbf{k}_{UH} = \mathbf{k}_{PL} + \mathbf{k}_{PL,out}$$

где \mathbf{k}_{PL} , $\mathbf{k}_{PL,out}$ — волновые векторы продольных ионосферных плазменных волн; \mathbf{k}_B , \mathbf{k}_{UH} — волновые векторы поперечных магнитному полю бернштейновских и верхнегибридных волн.

Для условий 26 февраля 2013 г., используя данные ионосферы на высоте $h \sim 220$ км: $f_{pe}=6.62$ МГц, $f_{ce}=1.395$ МГц, $f_B=6.975$ МГц, $f_{UH} \sim 6.765$ МГц, $f_{PL}=7.1$ МГц и соотношение (2), получаем значение $f_{PL,out} \sim 7.3$ МГц.

Отметим, что вопрос о возбуждении максимума на частоте $f_{PL,out}$ остается спорным и требует дальнейших исследований генерации ленгмюровских волн в нагревных экспериментах.

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 альтернативном О-/Х-нагреве высокоширотной F-области ионосферы в направлении магнитного зенита при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения ERP . Изучение спектральных характеристик плазменных волн ионосферы, возбуждаемых мощными КВ-радиоволнами на частотах излучения вблизи гирогармоник электронов и критической частоты слоя F2, проводилось по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT (930 МГц), пространственно-совмещенного с нагревным стендом.

Показано, что в условиях $ERP < 200$ МВт возбуждение HFPL регистрировалось на высотах в ионосфере, где выполняется условие близости частоты накачки и ленгмюровской частоты ионосферы $f_H \approx f_{PL}$. Значение f_{PL} определяется температурой электронов и ионизацией как фоновой ионосферы, так и дополнительной, вызванной воздействием волны накачки в циклах О- или Х-нагрева.

Для условий $f_H/f_oF2 < 1$ отмечалось возрастание высоты возбуждения HFPL в циклах Х-нагрева, при этом возбуждение HFPL наблюдалось на постоянной высоте при увеличении ERP в цикле О-нагрева.

В случае $f_H/f_oF2 \sim 1$ высоты возбуждений HFPL снижались по мере возрастания ERP в циклах О-нагрева и оставались постоянными при Х-нагреве.

Возбуждение HFIL наблюдалось на высотах, близких к возбуждению HFPL, с точностью шага измерений радара НР (3 км).

При воздействии мощных коротких радиоволн О-моды на высокоширотную F-область ионосферы в направлении магнитного зенита 26 февраля 2013 г. в условиях $f_H/f_oF2 \sim 1$ и $f_H > 5f_{ce}$ отмечалось следующее:

- возбуждение плазменных ленгмюровских волн HFPL одновременно на двух высотах (ниже и выше максимума F2-слоя);
- регистрация спектральных максимумов S_{PL} не только на частоте $f_H=7.1$ МГц, но и на частотах f_{out} , смещенных от f_H в сторону увеличения на $\Delta \sim 0.2 - 0.4$ МГц, $f_{out} = f_H + \Delta$.

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).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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., Рьетвельд М.Т., 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.

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).

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

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.

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.

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

DuBois D.F., Russell D.A., Cheung P.Y., Sulzer M.P. High-power high-frequency-induced Langmuir turbulence in the smooth ionosphere at Arecibo. I. Theoretical predictions for altitude-resolved plasma line radar spectra. *Physics of Plasmas*. 2001. Vol. 8, no. 3. P. 791. DOI: [10.1063/1.1345703](https://doi.org/10.1063/1.1345703).

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.

Mishin E., Hagfors T., Kofman W. On the origin of out-shifted plasma lines during HF modification experiments. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, no. A12. P. 27,265.

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.

Stubbe P. Review of ionospheric modification experiments in Tromsø. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. Vol. 58, no. 1-4. P. 349–386.

URL: <https://rscf.ru/project/22-17-00020/> (дата обращения 23 мая 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Спектральные характеристики плазменных волн ионосферы при возбуждении мощными КВ-радиоволнами на частотах излучения вблизи гирогармоник электронов и критической частоты слоя F2. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 101–110. DOI: [10.12737/szf-92202312](https://doi.org/10.12737/szf-92202312).