

**Пороговые мощности волны накачки при O- и X- нагреве с частотой близкой критической частоте слоя F2 и гиросгармонике электронов при возбуждении плазменных волн**

Т.Д. Борисова<sup>1</sup>, Н.Ф. Благовещенская<sup>1</sup>, А.С. Калишин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт  
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.  
E-mail: [borisova@ari.ru](mailto:borisova@ari.ru)

*Представлены результаты экспериментальных исследований возбуждения продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) в высокоширотной F области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) или необыкновенной (X-мода) поляризации. Частота излучения комплекса  $f_H$  EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) была близка критической частоте слоя F2  $f_H \sim f_oF2$  и частоте гиросрезонанса электронов  $f_H \sim \nu_{ce}$ . Определены пороговые (минимальные) значения электрического поля волны накачки, необходимые для возбуждения плазменных (ленгмюровских)  $E_{ionPL}$  и ионно-акустических  $E_{ionLL}$  волн.*

*Ключевые слова: Высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, электрическое поле, ленгмюровская волна, ионно-акустическая волна, радар некогерентного рассеяния радиоволн, EISCAT*

**The threshold values of the electric field of high-power shortwave radio waves by O-mode or X-mode polarization HF heating near the critical frequency of the F2 layer and the electron gyroresonance frequency by the excitation of Langmuir and ion-acoustic plasma waves**

T.D. Borisova<sup>1</sup>, N.F. Blagoveshchenskaya<sup>1</sup>, A.S. Kalishin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arctic and Antarctic Research Institute.

*We present experimental results related to the studies of the excitation of elongated plasma waves (Langmuir and ion-acoustic) in the high latitude ionosphere F-region induced by the ordinary (O-mode) and extraordinary (X-mode) HF heating near the critical frequency of the F2 layer and electron gyroresonance frequency. Experiments have been carried out at the EISCAT/Heating facility located near Tromsø by using the power stepping of effective radiated power. The threshold values of the electric field required for the excitation of Langmuir and ion-acoustic plasma waves, were determined.*

*Keywords: High latitude ionosphere, powerful HF radio wave, electric field, Langmuir wave, ion-acoustic wave, incoherent scatter, 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 широкого спектра различных искусственных неустойчивостей и неоднородностей, например, к генерации искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждению плазменных волн, искусственного радиоизлучения ионосферы и т.д. [1, 2 и цитируемая литература]. Возбуждение и развитие

параметрических распадных неустойчивостей: периодической стрикционной (англ. parametric decay instability, PDI) и аperiodической стрикционной (англ. oscillating two stream instability, OTSI) [1] в нагревных экспериментах регистрируются в спектрах радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) 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). В работе представлены результаты определения экспериментальных порогов возбуждения (минимальных значений напряженности электрического поля мощной КВ радиоволны), необходимых для возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн при О- и Х-нагреве высокоширотной F области ионосферы.

### Результаты наблюдений

Наблюдения условий и характеристик 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 EISCAT выполнены радаром НР (930 МГц). 26 февраля 2013 г. мощная КВ радиоволна излучалась на частоте  $f_H = 7.1$  МГц, близкой к критической частоте слоя F2 ( $f_H / f_oF2 \sim 1$ ), и превышала частоту пятой гирогармоники электронов ( $f_H > 5f_{ce}$ ). 20 октября 2012 г.  $f_H = 7.953$  МГц, была ниже  $f_oF2$  ( $f_H / f_oF2 \sim 0.89 - 0.94$ ) и ниже частоты шестой гирогармоники электронов ( $f_H < 6f_{ce}$ ). Нагревной стенд EISCAT/Heating излучал мощные КВ радиоволны в направлении магнитного зенита, циклами 10 минут нагрев, 5 минут пауза. Мощность излучения ERP ступенчато изменялась в цикле нагрева.

На рис.1 показаны результаты спектральной обработки сигналов радара НР 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, a) и ионно-акустических волн  $S_{ILO}(t,h)$ ,  $S_{ILD}(t,h)$ ,  $S_{ILU}(t,h)$  для максимумов, несмещенного относительно нулевой частоты и смещенных в отрицательную и положительную стороны (рис.1, c, b, d). Значения  $S_{PL}$  и  $S_{IL}$  приводятся в относительных единицах (о.е.) в логарифмическом масштабе. Схема изменения мощности излучения ERP с учетом поляризации нагревного сигнала и уровня электрического поля волны накачки в ионосфере  $E_{ion}$ , рассчитанного с учетом поглощения в ниже лежащих слоях показаны на рис. 1, e. В циклах Х-нагрева наблюдается возрастание высоты возбуждения HFPL (рис.1, a). Особенностью Х-нагрева явилось усиление максимума  $S_{ILO}$  (рис.1, c), возрастание которого указывает на возбуждение в резонансной области двухпоточковой неустойчивости (OTSI). Интенсивности  $S_{ILD}$ ,  $S_{ILO}$ ,  $S_{ILU}$  и  $S_{PL}$  в циклах Х-нагрева на порядок выше, чем  $S_{IL}$  и  $S_{PL}$  в циклах О-нагрева. В моменты включений для волны накачки О-моды наблюдались «эффекты включения» – кратковременные всплески интенсивностей рассеянных сигналов  $S_{IL}$  и  $S_{PL}$  (<200ms), которые являются типичным проявлением неустойчивости PDI при О-нагреве. Эффекты «включения» при Х-нагреве не наблюдались и проявления HFIL и HFPL начинались только через 10 – 20 с после включения передатчика нагревного стенда.

### Расчет электрического поля мощной КВ радиоволны $E_{ion}$ в ионосфере

Напряженность электрического поля мощной КВ радиоволны стенда EISCAT/Heating с учетом потерь радиоволны при распространении в ионосфере определяется выражением [3, 4]

$$E_{ion} \left[ \frac{V}{m} \right] = \frac{0.25 \sqrt{ERP[kW]}}{h[km]} \cdot e^{-A},$$

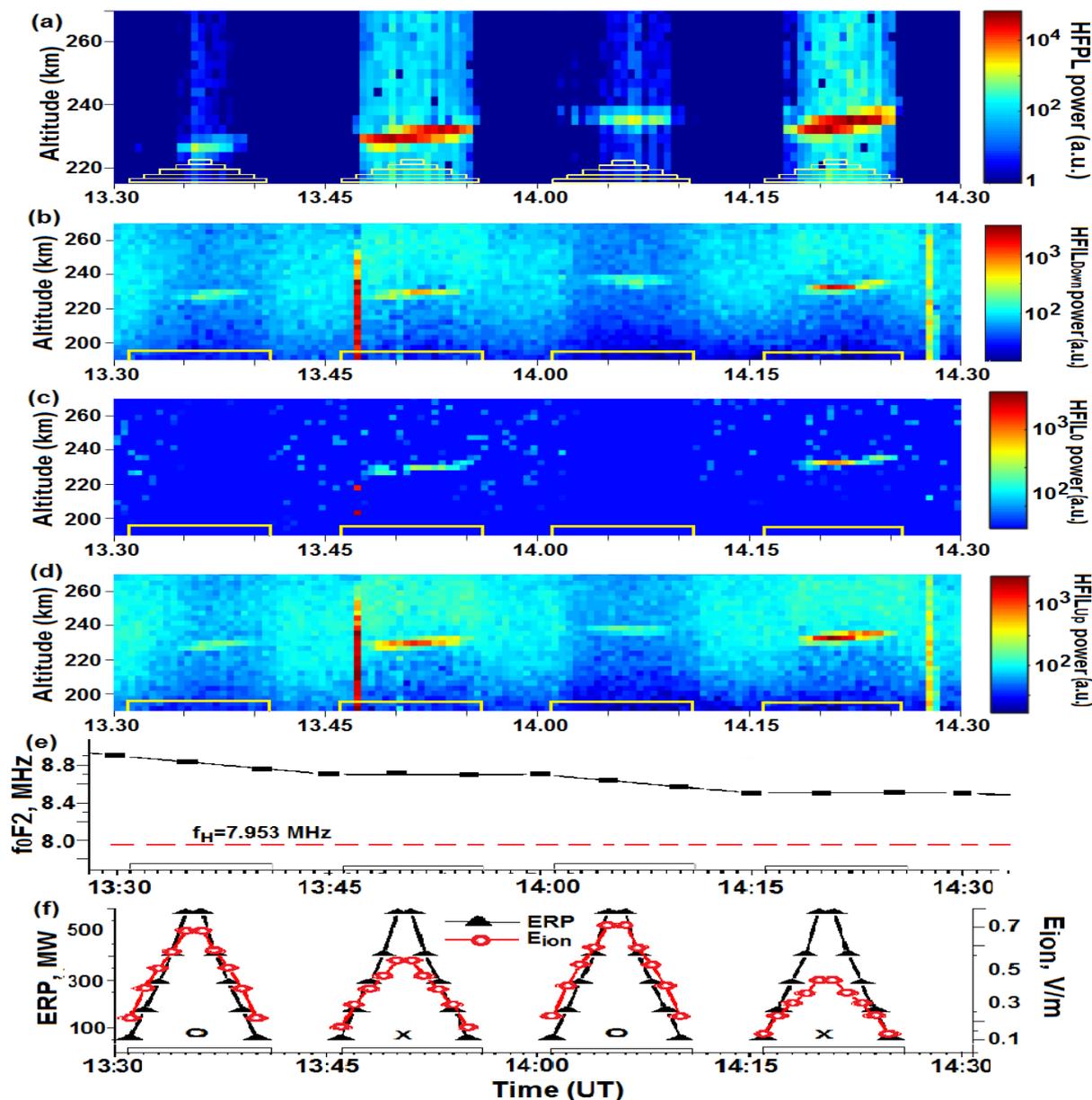


Рис. 1. Данные EISCAT радара HP для 20 октября 2012 г. с 13.30 до 14.30 UT: высотное – временные распределения максимумов спектральных линий плазменного (ленгмюровского) а) – SPL и ионно – акустического диапазонов: б) – $SIL_D$ , в) – $SIL_0$ , д) – $SIL_U$  в интервале высот 190–270 км. е) Изменение  $foF2(t)$ ; ф) - схемы изменения ERP,  $E_{ion}$  и поляризации нагревного сигнала.

где  $h$  – высота расположения возмущенной ионосферной области от поверхности Земли,  $A$  – потери напряженности радиоволны (дБ) на пути распространения  $s$ , рассчитываются как

$$A = -8.68 \int \kappa \cdot ds,$$

где  $\kappa$  – мнимая часть волнового вектора  $\mathbf{k} = \omega \cdot \mathbf{n} / c$ ,  $ds$  – расстояние вдоль пути распространения,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота радиосигнала,  $\mathbf{n} = (\mu + i\chi)$  – комплексный показатель преломления,  $\mu$  – действительная часть показателя преломления,  $\chi$  – мнимая часть показателя преломления,  $c$  – скорость света и для  $\kappa$  используется приближенное выражение

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

При расчете траекторий распространения и поглощения 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 НР (разрешение по высоте 3 км). Вычисления частот соударений электронов  $\nu_e(h)$  выполнены с учетом выражений, представленных в [5, 6], данных измерений радаром НР и модели MSIS [7].

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 прямое распространение волны накачки или до высоты отражения, или до максимума слоя F2, траекторные расчеты упростили, используя закон Снеллиуса и теорему Брейта—Тьюва [8]. Вычисления показателя преломления выполнены с учетом влияния магнитного поля и частоты соударений электронов [5].

Оценка поглощения электрического поля  $E_{ion}$  мощной КВ-радиоволны проводилась с учетом изменений ERP каждую минуту излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating. Результаты вычислений поглощения радиоволны в ионосфере, A, и наименьшие уровни поля  $E_{ion}$ , необходимые для возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн,  $E_{ionPL}$  и  $E_{ionIL}$ , для циклов нагрева 26 февраля 2013 г. и 20 октября 2012 г. представлены в Таблице.

**Таблица – Оценки поглощения мощной КВ радиоволны в ионосфере, A, значения ERP и наименьшие уровни электрических  $E_{ionPL}$  и  $E_{ionIL}$  для O- и X- циклов нагрева 26 февраля 2013 г. и 20 октября 2012 г.**

Поляризация, период цикла нагрева, UT	$f_H / f_oF2$	A, dB	ERP MBТ (start/end) $E_{ionPL}$ В/м	ERP MBТ (start/end) $E_{ionIL}$ В/м
1	2	3	4	5
26 февраля 2013 г.				
O 12.31-12.41	0.99	1.0	(186/186) 0.45 / 0.45	(380/380) 0.64/ 0.64
X 12.46-12.56	1.03	7.8	(186/186) 0.22 / 0.22	(380/380) 0.32/ 0.32
O 13.01-13.11	1.05	1.5	(186/83) 0.43 /0.28	(380/186) 0.6/0.43
X 13.16-13.26	0.99	3.5	(186/186) 0.34 / 0.34	(186/380) 0.34 / 0.48
20 октября 2012 г.				
O 13.31-13.41	0.89	1.5	(410/176) 0.57 / 0.37	(585/585) 0.68/0.68
X 13.46-13.56	0.91	3.8	(176/59) 0.29/ 0.17	(176/176) 0.29/ 0.29
O 14.01-14.11	0.91	1.0	(176/176) 0.39/ 0.39	(293/293) 0.5/ 0.5
X 14.16-14.26	0.94	5.7	(176/59) 0.22/ 0.13	(293/293) 0.29/ 0.29

Анализ данных вычислений значений минимальных  $E_{\text{ion}}$ , необходимых для непрерывного возбуждения плазменных максимумов (ленгмюровских и ионно-акустических) в экспериментах 26.02.13г. и 20.10.12г. показал, что возбуждение ленгмюровских максимумов начиналось при более низких значениях ERP излучения волны накачки, чем возбуждение ионно-акустических волн. Минимальные значения составляли:  $E_{\text{ionPL}} \sim 0.4 - 0.57$  В/м и  $E_{\text{ionIL}} \sim 0.5 - 0.68$  В/м для O- моды нагрева и  $E_{\text{ionPL}} \sim 0.22 - 0.34$  В/м и  $E_{\text{ionIL}} \sim 0.29 - 0.34$  В/м для X- моды соответственно. Значения  $E_{\text{ionPL}}$  и  $E_{\text{ionIL}}$  в циклах O- нагрева выше, чем в циклах X- нагрева. При X- нагреве для возбуждения ленгмюровских и ионных волн при различных условиях  $f_H/f_oF2 \sim 1$  и  $f_H/f_oF2 < 1$  требуются близкие минимальные значения  $E_{\text{ion}} \sim (0.22 - 0.34$  В/м).

### Выводы

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 O- /X- нагреве F-области высокоширотной ионосферы в направлении магнитного зенита и ступенчатом изменении эффективной мощности излучения. Выполнены оценки порогов возбуждения (минимальных значений напряженности электрического поля мощной КВ-радиоволны в ионосфере), необходимых для возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн при O- и X-нагреве F-области высокоширотной ионосферы. Оценки получены с учетом потерь мощной волны при распространении в нижележащих слоях.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>.*

### Литература

1. 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).
2. 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).
3. 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.
4. 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)
5. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме – М.: Наука, 1967. 684 с.
6. Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 554 p.
7. [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php)
8. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере – М.: Мир, 1973. 504 с.