

УДК: 533.951 + 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.624-627

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ И МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Т.Д. Борисова, Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, Н.А. Степанов, А.О. Мингалева

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д.38, тел.8(812)337-3123, e-mail: aaricoop@aari.ru

**Аннотация.** Рассматривается возможный механизм возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в экспериментах по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации. Предложен двухэтапный механизм возбуждения ионосферных неустойчивостей: первоначально возбуждается неустойчивость Рэлея-Тейлора, в результате которой формируются крупномасштабные неоднородности ионосферы, и далее при развитии градиентно-дрейфовой неустойчивости формируются МИИН.

**Ключевые слова:** модификация; высокоширотная ионосфера; мощная КВ радиоволна; необыкновенная поляризация; неустойчивость; искусственные неоднородности

## ORIGIN OF LARGE-SCALE AND SMALL-SCALE IONOSPHERIC INHOMOGENEITIES DURING IONOSPHERE MODIFICATION BY POWERFUL HF RADIO WAVES OF EXTRAORDINARY POLARIZATION

T. D. Borisova, N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, A.S. Stepanov, A.O. Mingaleva

**Abstract.** The plausible mechanism of excitation of small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAI) induced by powerful HF radio waves of extraordinary polarization is considered. A mechanism for the excitation of ionospheric instabilities is proposed: initially, instability is excited in crossed electric and magnetic fields, as a result of which large-scale ionospheric inhomogeneities are formed, and then, as the instability develops, AFAI are formed.

**Keywords:** modification; high-latitude ionosphere; powerful HF radio wave; extraordinary polarization; instability; artificial irregularities

### Введение

В экспериментах, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия), впервые были обнаружены мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН), вызванные воздействием на высокоширотную F-область ионосферы мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации [1]. Результаты экспериментальных исследований показали, что МИИН при X-нагреве возбуждаются при спокойных магнитных условиях в регулярной F-области ионосферы при излучении мощной КВ радиоволны в магнитный зенит на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F2. Времена нарастания МИИН при X-нагреве зависят от частоты и предыстории нагрева (“холодный” старт в первом цикле X-нагрева или последующие циклы X-нагрева) и составляют от 10 до 150 с [1–3].

Авторы [4] теоретически объясняют возбуждение искусственных плазменных неоднородностей в высокоширотной ионосфере при воздействии мощной КВ радиоволны X-моды с помощью тепловой самофокусировочной неустойчивости.

Формирование искусственных плазменных неоднородностей в высокоширотной ионосфере в работе [3] объясняется возбуждением неустойчивости Рэлея – Тэйлора [7]. Неустойчивость развивается на горизонтальных градиентах дактов электронной концентрации ионосферы,  $N_e$ , в присутствии напряженности электрического поля мощной КВ радиоволны, ортогональной к магнитному полю и горизонтальным градиентам  $N_e$ .

Целью настоящей работы является, показать возможность генерации МИИН в высокоширотной ионосфере в спокойных геомагнитных условиях при воздействии мощных КВ радиоволн X – поляризации в результате возбуждения ионосферных неустойчивостей в

скрещенных электрическом и магнитном полях. (В англоязычной литературе - неустойчивость перекрестного поля  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ). Эта неустойчивость, для которой необходимы электрическое поле, магнитное поле и градиент плотности, ортогональные друг другу [5–7]. Именно эта неустойчивость структурирует края пятен и закладывает основу для различных высокоширотных структур в естественных условиях.

Исследования выполнены по результатам анализа данных экспериментальных наблюдений и численных расчетов.

### Экспериментальные измерения

В рассматриваемых экспериментах излучение волн Х-поляризации нагревным стендом EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия, координаты 69.6°с.ш., 19.2°в.д.; магнитное наклонение  $I = 78^\circ$ ) в ионосферу высоких широт проводилось в направлении ориентации магнитного поля Земли. Электрическое поле волны Х-моды ориентировано перпендикулярно направлению распространения и ориентации магнитного поля. Использовалась фазированная антенная решетка №1 (ФАР1), ориентированная в магнитный зенит (наклон  $12^\circ$  к югу от вертикали, азимут  $185^\circ$ ) при ERP > 350–400 МВт. Использовались циклы 10 минут излучение / 5 минут пауза. В рассматриваемых экспериментах частота накачки  $f_H$  превышала критическую частоту слоя F2 обыкновенной поляризации,  $f_0F2$ ,  $f_H > f_0F2$ . В экспериментах 15 октября 2012 г. использовалась  $f_H = 5.423$  МГц и 3 ноября 2013 г. –  $f_H = 6.2$  МГц. На высоте отражения волны накачки Х-моды электрическое поле перпендикулярно магнитному полю.

Диагностика параметров ионосферы в периоды экспериментов проводилась:

- Радаром некогерентного рассеяния EISCAT 930 МГц в Тромсе в режиме beata, пространственно совмещенным с нагревным стендом. Луч радара ориентирован в магнитный зенит;

- КВ радаром CUTLASS в Ханкасалми, (луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область (ИВО) ионосферы над нагревным стендом);

- Ионозондом ВЗ ионосферы комплекса EISCAT.

Геомагнитные условия в периоды наблюдений были спокойными: 15 октября 2012 г. индекс магнитной активности  $K_p = 1$ - и солнечная активность (число Вольфа)  $W = 98$  и 3 ноября 2013 г. –  $K_p = 0$ ,  $W = 123$ .

Данные измерений 15 октября 2012 г. и 3 ноября 2013 г. радаром НР EISCAT и КВ радаром CUTLASS, представленные на (рис. 1), демонстрируют ранее исследованные эффекты, вызванные модификацией высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами на частотах накачки Х-моды в условиях  $f_H > f_0F2$ .

### Исследование данных наблюдений и численные оценки

Анализ данных EISCAT радара  $N_e(h)$ -профилей ионосферы продемонстрировал резкое уменьшение  $N_e$  на высотах близких максимуму слоя  $h_mF2$  в начальный момент воздействия волны накачки (см. пример на рис. 2). Можно видеть увеличение  $N_e$  на высотах выше  $h_mF2$  при последующем «нагреве».

Эффекты уменьшений  $N_e$  в моменты включений передатчиков мощных КВ радиоволн наблюдаются, благодаря возрастанию дрейфовой скорости электронов  $V_e$ . Ориентация напряженности электрического поля волны накачки Х-моды  $\mathbf{E}$  в области отражения перпендикулярна направлению силовой линии магнитного поля. В скрещенных полях электрон испытывает действие силы Лоренца. Скорость дрейфа, электронов  $V_{e\perp} = E_{\perp}/B$ , где  $E_{\perp}$  – напряженность волны накачки,  $B$  – магнитная индукция. Численные оценки напряженности электрического поля волны накачки, выполненные для 3 ноября 2013 г. показали следующие значения: для высоты отражения волны 260 км  $E \sim 0.645$  В/м и для высоты близкой  $h_mF2 \sim 300$  км  $E \sim 0.560$  В/м. Скорости дрейфа электронов составляли  $V_{e\perp} \sim 1120\text{--}1300$  м/с.

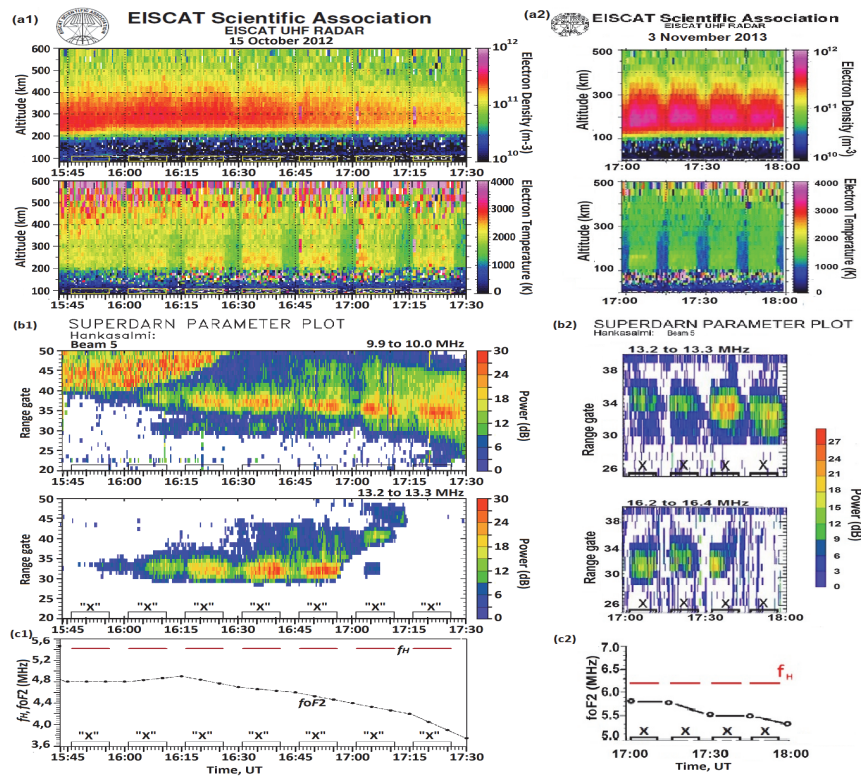


Рис. 1. Высотно-временные распределения параметров ионосферы, измеренные радаром HP EISCAT в диапазоне высот от 90 до 670 км : (a1,a2) электронная плотность  $N_e$  и температура электронов  $T_e$ ; (b1,b2) Мощности обратного рассеяния сигналов КВ радара CUTLASS.

Сонограммы представлены в координатах расстояние (range gate) – время. Временное разрешение измерений составляло 3 с, разрешение по дальности «ворот» – 15 км. На оси времени отмечены циклы нагрева и поляризация КВ волны накачки. (c1, c2) Вариации критических частот регулярного слоя F2 ( $f_oF2$ ) и значение  $f_H$ . Цифрами отмечены панели: «1» – данные измерений 15 октября 2012 г. и «2» – 3 ноября 2013 г.

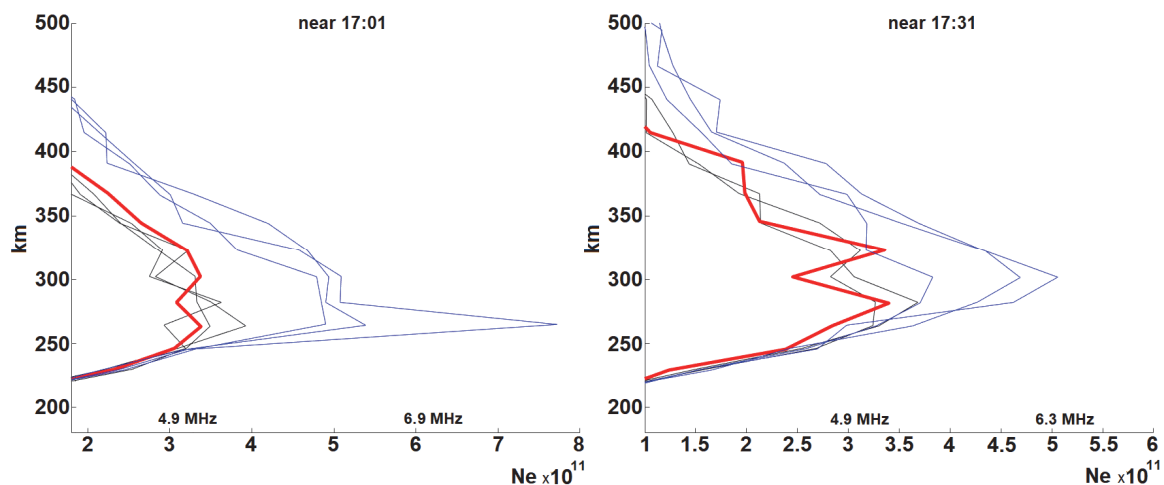


Рис. 2. Приведены вариации во времени  $N_e(h)$  профилей ионосферы в диапазоне высот 180–500 км в периоды  $(-1 \rightarrow +1)$  минуты от момента начала излучения  $f_H$  для первого и третьего циклов нагрева эксперимента 13.11.2013 г. Черным цветом отмечены  $N_e(h)$  перед «нагревом»; красным – в первые 10 секунд нагревного цикла и синими линиями - после включения передатчика нагрева через 20, 30 и 40 с.

Результаты вычислений по данным радара для эксперимента 3 ноября 2013 г. изменений во времени сглаженных значений градиента концентрации электронов ионосферы  $\partial N_e / \partial t$  на высоте около максимума слоя F2 выявили отрицательный тренд градиента  $\partial N_e / \partial t$  в периоды

нагревных циклов. Наличие **E** электрического поля, магнитного поля **B** и градиента плотности  $\nabla N_e$ , ортогональных друг другу создают условия развития ионосферной неустойчивости в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Согласно [5 – 7]

$$\gamma_{EB} = E_{0\perp}/BL = V_{0\perp}/L$$

где  $\gamma_{EB}$  – инкрементом развития неустойчивости,  $L$  – характерный размер распределения градиента электронной плотности ионосферной плазмы.  $L^{-1} = 1/N_{e0} \cdot \partial N_e / \partial x$  –  $x$ -горизонтальная координата.

Для развития неустойчивости необходимым условием является условие  $\gamma_{EB} > \gamma_{dc}$ ,  $\gamma_{dc}$  – инкремент поперечной диффузии.

Численные расчеты значений  $\gamma_{EB}$  и  $\gamma_{dc}$  для 3 ноября 2013г. по данным радара EISCAT для диапазона  $L$  от 500 до 10000 м изменения инкрементов составили  $\gamma_{EB} \sim 0.5 : 2$  и  $\gamma_{dc} \sim 10^{-6} : 10^{-3}$ , следовательно,  $\gamma_{EB} > \gamma_{dc}$ .

Для оценки длины волны  $\lambda$  возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) воспользовались исследованиями авторов [8]. Например, для 3 ноября 2013г.  $E_{0\perp} = 70$  мВ/м, получаем для  $L = 10$  км  $\lambda \sim 25$ -31 м, для  $L \sim 5$  км  $\lambda \sim 18$ -22 м, для  $L \sim 1$  км  $\lambda \sim 8$ -11 м.

### Заключение

Результаты исследований данных экспериментальных наблюдений и численных расчетов дают основание предполагать, что в высокоширотной ионосфере в спокойных геомагнитных условиях при воздействии мощной КВ радиоволны необыкновенной поляризации происходит возбуждение и развитие неустойчивости в скрещенных электрическом и магнитном полях, вследствие которой образуются ионосферные неоднородности.

### Список литературы

1. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T., Rietveld M.T., Ivanova I.M., Baddeley L.J. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – Vol. 38. – P. L08802.
2. Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Йоман Т.К., Шмелев Ю.А., Леоненко Е.Е. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации // *Геомагнетизм и аэронавигация*. – 2019. – Т. 59. – № 6. – С. 759–773.
3. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M. Artificial Ducts Created via High-Power HF RadioWaves at EISCAT. // *Remote Sens.* – 2023. – 15. – 2300. <https://doi.org/10.3390/rs15092300>.
4. Borisov N., Honary F., Li H. Excitation of plasma irregularities in the F region of the ionosphere by powerful HF radio waves of X-polarization. // *J. Geophys. Res.: Space Physics*, – 2018. – V. 123. – P. 5246–5260.
5. Ossakow S.L., Chaturvedi P.K. Morphological studies of rising equatorial spread F bubbles // *J. Geophys. Res.* – 1978. – V. 83. – P. 2085.
6. Keskinen M.J., Ossakow S.L., McDonald B.E. Nonlinear evolution of diffuse auroral F Region ionospheric irregularities // *GRL*. – 1980. – V. 7. – No. 8. – P. 573–576.
7. Kelley M.C. *The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics*. Second Edition. 2009 (1989). Elsevier. Amsterdam, Inc. International geophysics series; v. 96 of International Geophysics. – 580 p.
8. Vickrey J. F., Kelley M. C. The effects of a conducting E layer on classical F region cross-field plasma diffusion // *J. Geophys. Res.* – 1982. – V. 87. – P. 4461.