

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 (Х-моды) поляризации [1]. Результаты экспериментальных исследований показали, что МИИН при Х-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 Х-нагреве зависят от частоты и предыстории нагрева (“холодный” старт в первом цикле Х-нагрева или последующие циклы Х-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 Х-моды с помощью тепловой самофокусировочной неустойчивости.

Формирование искусственных плазменных неоднородностей в высокоширотной ионосфере в работе [3] объясняется возбуждением неустойчивости Рэлея – Тейлора [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 Х – поляризации в результате возбуждения ионосферных неустойчивостей в

скрещенных электрическом и магнитном полях. (В англоязычной литературе - неустойчивость перекрестного поля ExB). Эта неустойчивость, для которой необходимы электрическое поле, магнитное поле и градиент плотности, ортогональные друг другу [5–7]. Именно эта нестабильность структурирует края пятен и закладывает основу для различных высоколатитных 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 $69.6^{\circ}\text{с.ш.}, 19.2^{\circ}\text{в.д.}$; 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° к югу от вертикали, азимут 185°) при $ERP > 350\text{--}400$ МВт. Использовались циклы 10 минут излучение / 5 минут пауза. В рассматриваемых экспериментах частота накачки f_H превышала критическую частоту слоя F2 обычной 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 проводились:

- 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 В3 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 HP EISCAT и КВ радаром CUTLASS, представленные на (рис. 1), демонстрируют ранее исследованные эффекты, вызванные модификацией высоколатитной 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 $V_{e\perp}$. Ориентация напряженности электрического поля волны накачки Х-моды 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 напряженность 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.

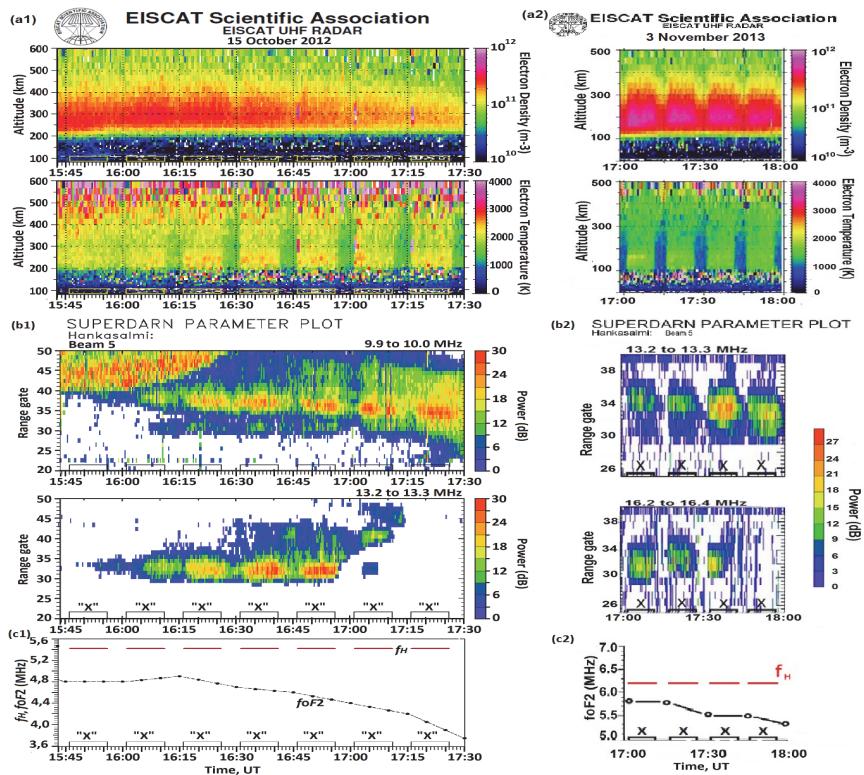


Рис. 1. Высотно-временные распределения параметров ионосферы, измеренные радаром НР EISCAT в диапазоне высот от 90 до 670 км : (a1,a2) электронная плотность N_e и температура электронов T_e ; (b1,b2) мощности обратного рассеяния сигналов КВ радара CUTLASS. Сонограммы представлены в координатах расстояние (range gate) – время. Временное разрешение измерений составляло 3 с, разрешение по дальности «ворота» – 15 км. На оси времени отмечены циклы нагрева и поляризация КВ волны накачки. (c1, c2) Вариации критических частот регулярного слоя F2 (f_0F2) и значение f_H . Цифрами отмечены панели: «1» – данные измерений 15 октября 2012г. и «2» – 3 ноября 2013 г.

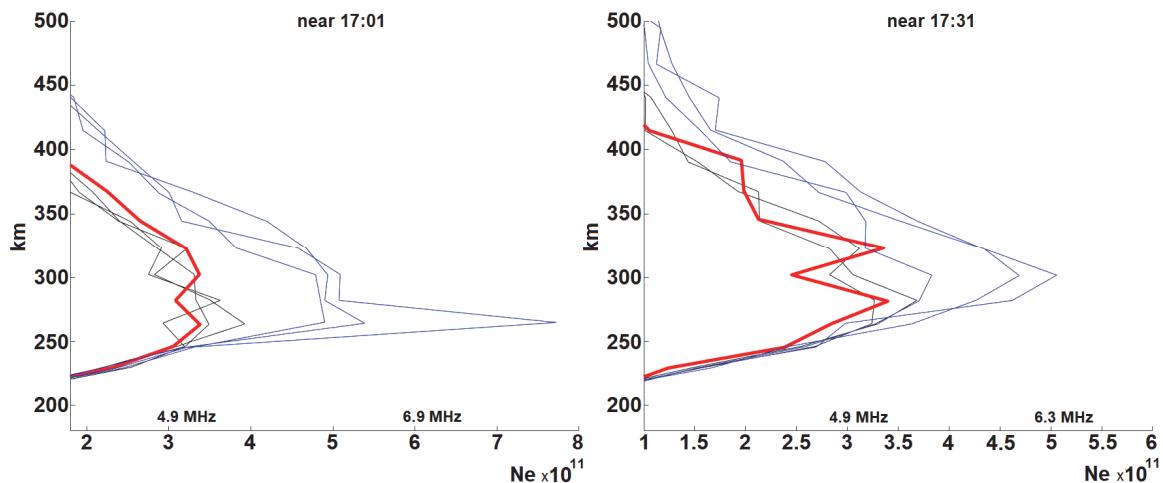


Рис. 2. Приведены вариации во времени $N_e(h)$ профилей ионосферы в диапазоне высот 180–500 км в периоды (-1–+1) минуты от момента начала излучения f_H для первого и третьего циклов нагрева эксперимента 13.11.2013г. Черным цветом отмечены $N_e(h)$ перед «нагревом»; красным – в первые 10 секунд нагревного 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 ∇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 γ_{EB} – инкрементом развития неустойчивости, L – характерный размер распределения градиента электронной плотности ионосферной плазмы. $L^{-1}=1/N_e \cdot \partial N_e / \partial x$ – x-горизонтальная координата.

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

Численные расчеты значений γ_{EB} и γ_{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 λ 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 $\lambda \sim 25\text{-}31$ м, для $L \sim 5$ км $\lambda \sim 18\text{-}22$ м, для $L \sim 1$ км $\lambda \sim 8\text{-}11$ м.

Заключение

Результаты исследований данных экспериментальных наблюдений и численных расчетов дают основание предполагать, что в высоколатитудной 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 высоколатитудной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации // Геомагнетизм и аэрономия. – 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.