

## **Генерация искусственных ионосферных неоднородностей в высокоширотной ионосфере при воздействии мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации**

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

<sup>1</sup> Арктический и антарктический научно исследовательский институт

199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д.38.

E-mail: [aaricoop@ari.ru](mailto:aaricoop@ari.ru)

*Представлены результаты исследований возможного механизма возбуждения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в экспериментах по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации в условиях, когда частота накачки радиоизлучения  $f_{\text{нх}}$  как выше, так и ниже критической частоты ионосферного слоя F2. Предполагается, что генерация МИИН происходит в результате двухэтапного процесса возбуждения ионосферных неустойчивостей: первоначально возбуждается неустойчивость Рэлея-Тейлора, в результате которой формируются крупномасштабные неоднородности высокоширотной ионосферы, и далее при развитии градиентно-дрейфовой неустойчивости формируются МИИН. Анализ проведен по данным экспериментов и численных расчетов, выполненных для условий изучаемых экспериментов.*

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

## **Generation of large-scale and small-scale ionospheric irregularities under the influence of HF radio waves of extraordinary polarization on the auroral ionosphere**

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

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

*The article presents the results of a study of a possible mechanism for the excitation of small-scale artificial ionospheric irregularities (AIIRs) in experiments modifying the ionosphere with high-power HF radio waves of extraordinary polarization. It is hypothesized that AIIR excitation occurs through a two-stage process of ionospheric instabilities: initially, the Rayleigh-Taylor instability is excited, resulting in the formation of large-scale irregularities in the high-latitude ionosphere, and then, with the development of gradient-drift instability, AIIRs are formed. The analysis is based on experimental data and numerical simulations conducted under conditions where the radio pump frequency  $f_{\text{хн}}$  is both above and below the critical frequency of the F2 ionospheric layer.*

### **Введение**

Впервые мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН) в F-области высокоширотной ионосферы при излучении мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации нагретом стендом EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия), были зарегистрированы в экспериментах 2011 г. [1]. Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что МИИН при X-нагреве возбуждаются в 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. Время возбуждения МИИН при X-нагреве зависит от частоты накачки ( $f_{\text{нх}}$ ) и предыстории нагрева (“холодный” старт в первом цикле X-нагрева или последующие циклы X-нагрева) и составляет от 10 до 150 с от начала цикла [1 - 3].

Авторы [4] теоретически объясняют возбуждение искусственных неоднородностей в F- слое высокоширотной ионосферы в результате воздействия КВ радиоволны необыкновенной поляризации с помощью тепловой самофокусирующей неустойчивости. В работе [3] формирование искусственных плазменных неоднородностей в высокоширотной ионосфере при воздействии волны накачки X-моды 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  $N_e$ .

В настоящей работе продолжено изучение механизма формирования МИИН в высокоширотной ионосфере в результате двухэтапного процесса возбуждения ионосферных неустойчивостей [5] при излучении нагревным стендом мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации. Первоначально возбуждается неустойчивость Рэлея-Тейлора, в результате которой формируются крупномасштабные неоднородности высокоширотной ионосферы, и далее при развитии градиентно-дрейфовой неустойчивости формируются МИИН. Исследование выполнено по результатам анализа экспериментальных измерений и данных численных расчетов, проведенных в условиях, когда частота накачки радиоизлучения  $f_{Hx}$  как выше, так и ниже критической частоты ионосферного слоя F2.

Целью настоящей работы является, показать возможность генерации МИИН в высокоширотной ионосфере, в спокойных геомагнитных условиях при воздействии мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации в результате последовательного возбуждения неустойчивостей (первоначально) Рэлея-Тейлора и далее в скрещенных электрическом и магнитном полях. (В англоязычной литературе - неустойчивость перекрестного поля  $E \times B$ ). 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 высокоширотных структур в естественных условиях.

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

### Экспериментальные измерения

В эксперименте 23 октября 2013г. нагрев ионосферы проводился с 16 до 18 UT излучением КВ нагревного стенда EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия, 69.6° с.ш., 19.2° в.д.) в направлении ориентации магнитного поля Земли на частотах  $f_{H1}=7.1$  и  $f_{H2}=6.2$  МГц. Циклы работы стенда: (5 минут излучение  $f_{H2}$ / 2.5 минуты пауза /5 минут излучение  $f_{H1}$ / 2.5 минуты пауза) O- нагрев и (5 минут излучение  $f_{H2}$ / 2.5 минуты пауза /5 минут излучение  $f_{H1}$ / 2.5 минуты пауза) X- нагрев.

Использовалась фазированная антенная решетка №1 (ФАР1), ориентированная в магнитный зенит (наклон 12° к югу от вертикали, азимут 185°) при излучении  $f_{H2}$  мощность излучения ERP = 810 МВт и при излучении  $f_{H1}$  – ERP = 1040 МВт. Отметим, что волны X- моды с частотами 6.2 и 7.1 МГц отражаются в ионосфере на высотах с плазменными частотами 5.4-5.5 и 6.43-6.44 МГц соответственно. В исследовании рассматривали циклы X-нагрева в периоды времени 16:16-16:28:30; 16:46-16:58:30; 17:16-17:28:30 и 17:46-17:58:30 UT.

23 октября вариации параметров ионосферы регистрировались:

- Радаром некогерентного рассеяния EISCAT 930 МГц в г.Тромсе, пространственно совмещенным с нагревным стендом, в режиме beata. 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.

23 октября 2013 г. геомагнитные условия в период с 16 до 18 UT были спокойными  $K_p=0$ . Солнечная активность, выраженная числом Вольфа, составила  $W=160$ .

Данные измерений 23 октября 2013 г. радаром HP EISCAT, ионозондом ВЗ и КВ радаром CUTLASS, представленные на рис.1, демонстрируют ранее исследованные эффекты, вызванные модификацией высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами на частотах накачки X- моды и O- моды [9]. На рис.1 b приведены вариации критических частот регулярного слоя F2 ( $f_oF2$ ), значения  $f_{H1}$ ,  $f_{H2}$  (прямые линии) и соответствующие частоты отражения в ионосфере  $f_{Href1}$  и  $f_{Href2}$  (пунктирные линии). На оси времени отмечены циклы нагрева и соответствующие значения частот и поляризации КВ волны накачки. Из рис.1b следует, что радиосигнал на частоте  $f_{HX2}=6.2$  МГц весь период эксперимента отражался от ионосферного слоя F2. Для волны накачки на частоте  $f_{HX1}=7.1$  МГц существовали периоды, когда волна X- моды от ионосферы не отражалась: 16:53:30-16:58:30 UT и с 17:38:30 UT.

Данные измерений радаром HP EISCAT в диапазоне высот от 90 до 670 км демонстрируют возрастание электронной концентрации  $N_e$  (рис.1a1) в циклах X- нагрева на высотах выше максимума слоя F2,  $h_mF2$ , по сравнению с фоном на 60–80 % ( $h_mF2 \sim 270 - 280$  км в периоды пауз). Плазменные частоты на высотах максимума слоя F2 26.10.2013г. в циклах X- нагрева возрастали на 2- 2.5 МГц по сравнению с фоновыми. При X- нагреве на высотах отражения волны накачки (около 230 - 250 км) наблюдается возрастание температуры электронов  $T_e$  (рис.1a2) вследствие омического нагрева на 1500-1700 К относительно фона в диапазоне высот  $\sim 50$  км. В циклах O- нагрева диапазон высот возрастания  $T_e$  расширяется до 100 км, а в условиях  $f_H \sim f_oF2$  возрастание  $T_e$  наблюдается в широком диапазоне высот до 500 км. В условиях близости  $f_H$  критической частоте слоя F2,  $f_oF2$ , в циклах O- нагрева наблюдается небольшое возрастание  $N_e$ .

Результаты измерений КВ радаром CUTLASS (рис1.c1-c3) представлены в виде изменения мощности обратно рассеянных сигналов радара,  $P$ , во времени на частотах 16.3 и 18 МГц (рис1.c1) и в виде сонограмм (c2,c3), представленных в координатах расстояние (range gate) – время. Временное разрешение измерений составляло 3 с, разрешение по дальности «ворота» — 15 км. Во всех нагревных циклах регистрировались обратно рассеянные на МИИН сигналы. Отметим возрастание уровня мощности обратно рассеянных на МИИН сигналов  $P$  в циклах O- нагрева, когда  $f_H \sim f_oF2$ .

Результаты численной обработки данных измерений радара HP EISCAT концентрации электронов ионосферы  $N_e$  на высоте отражения волны накачки  $f_{HX}$  выявили наличие отрицательного тренда  $\partial N_e / \partial t$  в периоды циклов X- нагрева. (влияние неустойчивости Рэлея-Тейлора).

На высоте отражения волны накачки необыкновенной поляризации ориентация векторов электрического поля и магнитного поля приблизительно взаимно перпендикулярны.

Существование электрического поля необыкновенной волны  $\mathbf{E}$ , магнитного поля  $\mathbf{B}$  и градиента плотности  $\nabla N_e$ , ортогональных друг другу создают условия развития ионосферной неустойчивости в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Согласно [5 – 7] инкремент развития неустойчивости,  $\gamma_{EB}$ , есть

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

где  $L$ - 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 в скрещенных электрическом и магнитном полях необходимым условием является условие  $\gamma_{EB} > \gamma_{dc}$ ,  $\gamma_{dc}$  - инкремент поперечной диффузии [5 – 7]:

$$\gamma_{dc} = k_B T_i / M_i (v_{in} / \Omega_i^2)$$

где  $\Omega_i$  - гирочастота ионов

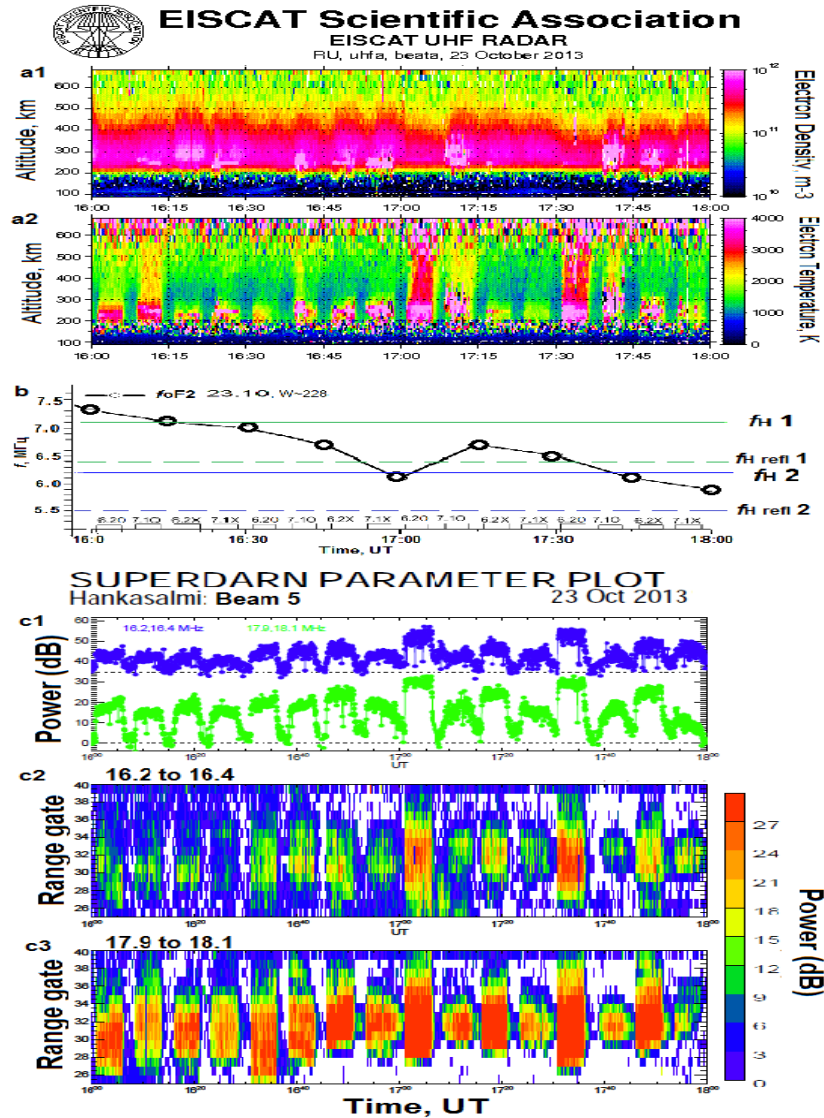
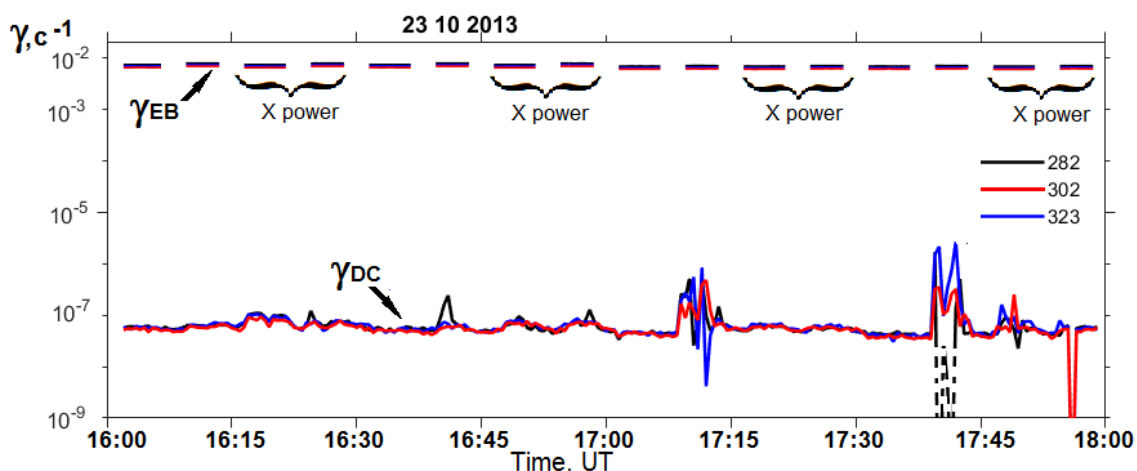


Рис. 1. Высотно-временные распределения параметров ионосферы, измеренные радаром НР EISCAT 23 октября 2013г в диапазоне высот от 90 до 670 км : (a1,a2) электронная плотность  $N_e$ (a1) и температура электронов  $T_e$  (a2). (b): - Вариации критических частот регулярного слоя F2 (foF2), значения  $f_{H1}$ ,  $f_{H2}$  (прямые линии) и соответствующие частоты отражения в ионосфере  $f_{H1ref1}$  и  $f_{H1ref2}$  (пунктирные линии). На оси времени отмечены циклы нагрева, значения частот и поляризации КВ волны накачки. (c1) Мощности обратного рассеяния сигналов КВ радара CUTLASS. (c2,c3) - сонограммы, представленные в координатах расстояние (range gate) – время. Временное разрешение измерений составляло 3 с, разрешение по дальности «ворота» — 15 км.)

Численные расчеты значений инкрементов  $\gamma_{EB}$  и  $\gamma_{dc}$  для 23 октября 2013г. с использованием данных радара EISCAT проведены для диапазона  $L$  от 500 до 50000 м.

Изменения инкрементов составили  $\gamma_{\text{EB}} \sim 0.5 : 2$  и  $\gamma_{\text{dc}} \sim 10^{-6} : 10^{-3}$ , следовательно,  $\gamma_{\text{EB}} > \gamma_{\text{dc}}$ .

На рис. 2 представлены примеры вычислений  $\gamma_{\text{EB}}$  и  $\gamma_{\text{dc}}$  для  $L \sim 50$  км на высотах в ионосфере близких максимуму слоя F2.



**Рис.2. Вычисления инкремента развития неустойчивости в скрещенных электрическом и магнитном полях  $\gamma_{\text{EB}}$  и инкремента поперечной диффузии  $\gamma_{\text{dc}}$  по данным радара HP в период с 16 до 18 UT 23 октября 2013г.**

Для определения параметров генерируемых волн, перпендикулярных градиенту, воспользуемся выражением для линейной скорости роста одномерной неустойчивости в скрещенных электрическом и магнитном полях, приведенное в [7, 8],

$$\gamma_{\text{EB}} = mE_{0\perp}/LB - k^2_m D_{\perp}$$

где  $m = (\Sigma_{\text{PF}} + \Sigma_{\text{PE}}) / \Sigma_{\text{PE}}$ ,  $\Sigma_{\text{PE}}$ ,  $\Sigma_{\text{PF}}$  – интегрированные проводимости Педерсена в направлении магнитного поля на высотах E- и F- областей ионосферы.

С учетом низкой фазовой скорости неустойчивости в скрещенных электрическом и магнитном полях в [7] показано, что на длинах волн порядка 10 - 20 м неустойчивость является устойчивой,  $\gamma_{\text{EB}} = 0$ .

Численные оценки для устойчивых условий  $\gamma_{\text{EB}} = 0$  для ионосферных условий 23 10.13 составили  $\gamma_{\text{EB}} \sim 0.02$ ,  $V \sim 2000$  м/с,  $L \sim 2000 - 5000$  м,  $m \sim 3-5$  для неоднородностей с поперечными размерами  $l_{\perp} \sim 10 - 23$  м. Значения согласуются результатами наблюдений радара HP CUTLASS.

## Выводы

Продолжены исследования поиска объяснения формирования ионосферных неоднородностей в авроральной ионосфере при воздействии мощной КВ радиоволны необыкновенной поляризации. Исследования, выполненные по данным экспериментальных наблюдений и численных расчетов, дают основание предполагать, что в высокоширотной ионосфере в спокойных геомагнитных условиях происходит возбуждение и развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора и неустойчивости в скрещенных электрическом и магнитном полях, вследствие которой образуются мелкомасштабные ионосферные неоднородности.

## Литература

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 аэронавтика*. 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. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Степанов Н.А., Мингалева А.О. Происхождение крупномасштабных и мелкомасштабных ионосферных неоднородностей при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации // *Распространение радиоволн: Труды XXIX Всероссийской открытой научной конференции (г. Казань, 30 июня - 4 июля 2025 г.)*. Казань. 2025. С. 624-627.

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. Elsevier. Amsterdam, Inc. International geophysics series v. 96 of International Geophysics. 2009(1989). 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.

9. Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С.. Условия генерации и характеристики каналов повышенной электронной плотности в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации // *Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2022* с.115 - 123.