

Ионосферные и оптические явления при X-нагреве на разных частотах

Н.Ф. Благовещенская¹, Т.Д. Борисова¹, А.С. Калишин¹, М. Кош², И.М. Егоров¹, Г. А. Загорский¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38

E-mail: nataly@ari.nw.ru

² Национальное космическое агентство южной Африки

E-mail: mkosch@sansa.org.za

Представлены результаты исследований ионосферных и оптических явлений, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации стенда EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) на высокоширотную F-область ионосферы.

Рассмотрены характеристики параметров ионосферной плазмы и искусственного оптического излучения при альтернативном X-нагреве на разных частотах.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, электронная концентрация, продольные плазменные волны, искусственное оптическое излучение

Ionospheric and optical phenomena produced by HF pumping at different frequencies

N.F. Blagoveshchenckaya¹, T.D. Borisova¹, A.S. Kalishin¹, M. Kosch², I.M. Egorov¹, G.A. Zagorskiy¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute

² South African National Space Agency

PO Box 32, Hermanus 7200, Western Cape, South Africa

The results of studies of the ionospheric and optical phenomena in the high latitude F-region of the ionosphere produced by powerful extraordinary (X-mode) polarized HF radio waves from the EISCAT/Heating facility (Tromsø, Norway) are presented. Features of the ionospheric plasma parameters and artificial optical emission under alternative X-mode HF pumping at different frequencies are analyzed.

Keywords: high latitude ionosphere, powerful HF radio wave, electron density, elongated plasma waves, artificial optical emission

Введение

Для модификации верхней ионосферы (F-область) традиционно на всех нагревных стендах мира используются мощные КВ радиоволны обыкновенной (O-мода) поляризации. Это вызвано тем, что радиоволны необыкновенной (X-мода) поляризации отражаются существенно ниже высоты отражения мощной КВ радиоволны O-поляризации и, более того, ниже области существования квазиэлектростатических плазменных волн (ленгмюровских и верхнегибридных). Вследствие этого они не могут вызвать генерацию этих волн и, как следствие, возбуждение искусственной ионосферной турбулентности и явлений, её сопровождающих [1, 2]. Тем не менее результаты многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на высокоширотном КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия), убедительно продемонстрировали, что воздействие мощной КВ радиоволны X-поляризации на F-область ионосферы вдоль магнитного поля (в магнитный зенит)

приводит к генерации искусственных возмущений, которые могут превосходить по интенсивности возмущения при O-нагреве (см., например, [3 – 9] и ссылки там). Исследования нелинейных явлений при X-нагреве требуют дальнейшего серьезного изучения как в экспериментальном, так и теоретическом плане.

Целью данной статьи является исследование характеристик и поведения разнообразных нелинейных явлений в высокоширотной F -области ионосферы при альтернативном X-нагреве на различных частотах. К числу рассмотренных явлений относятся: искусственное оптическое излучение в красной (630.0 нм) и зеленой (577.7 нм) линиях атомарного кислорода, параметры ионосферной плазмы (электронная концентрация и температура, N_e и T_e), продольные плазменные волны (ленгмюровские и ионно-акустические), мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности.

Используемые средства и методы диагностики

Супермощный КВ нагревной стенд EISCAT/Heating (69.6° N, 19.2° E, $L=6.2$, $I=78^\circ$), расположенный в г. Тромсе, северная Норвегия, технические характеристики которого приведены в [10], использовался для модификации высокоширотной F -области ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной (X-мода) поляризации. Эксперимент выполнялся 25 октября 2013 г. в вечерние часы при высокой солнечной (относительное число солнечных пятен $W = 138$) и низкой магнитной ($K_p = 1 -$) активности. Мощная КВ радиоволна излучалась альтернативно на частотах $f_H = 7.1/6.2$ МГц в направлении магнитного поля в Тромсе (12° на юг от вертикали) циклами 5 мин нагрев, 2.5 мин пауза. Излучение проводилось на фазированную антенную решетку с шириной диаграммы направленности 5 - 6° (на уровне - 3 дБ), обеспечивая эффективную мощность излучения 650/460 МВт на частотах нагрева 7.1 и 6.2 МГц соответственно.

В качестве основных средств диагностики ионосферы в период эксперимента использовался EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц [11], пространственно совмещенный с нагревным стендом, и когерентный КВ радар CUTLASS (SuperDARN) [12] в Финляндии (63° N, 27° E), расположенный южнее нагревного стенда EISCAT/Heating на ~ 1000 км. Регистрация искусственного оптического излучения проводилась в Тромсе с помощью камеры DASI-2, оснащенной телецентрической оптикой и узкополосными интерференционными фильтрами для всех основных эмиссий излучения. Угол обзора, последовательность изменения используемых фильтров и время интегрирования можно варьировать в соответствии с целями эксперимента.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано высотное-временное распределение электронной концентрации и температуры (N_e и T_e), интенсивностей инициированных нагревом плазменных линий и мощности рассеянного сигнала (обозначенной как «raw electron density») по данным измерений радара некогерентного рассеяния в Тромсе при альтернативном X-нагреве высокоширотной F -области ионосферы на частотах 7.1 и 6.2 МГц в период эксперимента 25 октября 2013 г. Как следует из рис 1, сильные возрастания электронной плотности N_e до высот порядка 550 км, образующие дакты повышенной плотности электронов вдоль магнитной силовой трубки, наблюдались при излучении мощной X-волны как на частоте $f_H = 7.1$ МГц, так и $f_H = 6.2$ МГц. Дакты N_e отвечают за генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) вследствие развития неустойчивости Рэлея - Кельвина на градиентах N_e [9]. По данным радара CUTLASS возбуждение МИИН с поперечными к магнитному полю масштабами

7.5 - 10 м наблюдалось во всех циклах X-нагрева в период эксперимента. Инициированные нагревом плазменные линии, сосуществующие с МИИН в течение всего нагревного цикла, непосредственно регистрировались в спектрах сигнала радара HP на высотах вблизи отражения волны накачки и являются прямым указанием на возбуждение ленгмюровских волн.

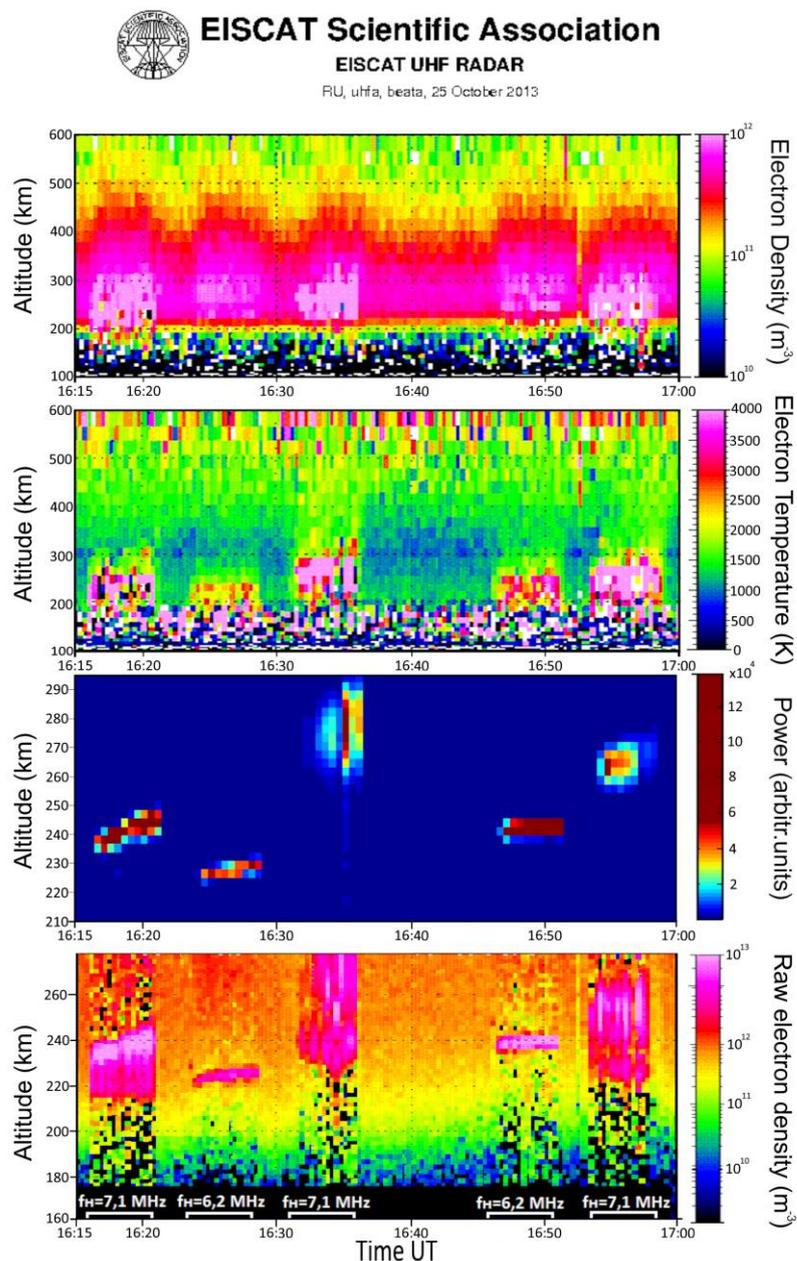


Рис. 1. Высотно-временное распределение N_e и T_e , интенсивностей инициированных нагревом плазменных линий и мощности рассеянного сигнала (обозначенной как «raw electron density») по данным измерений радара HP при альтернативном X-нагреве в магнитный зенит на частотах 7.1 и 6.2 МГц 25 октября 2013 г. Периоды излучения и частоты нагрева приведены на нижней панели.

На рис.2 показано поведение интенсивностей искусственных эмиссий красной (630 нм) и зеленой (577.7 нм) линий атомарного кислорода (верхняя панель), а также критических частот обыкновенной (f_oF2) и необыкновенной (f_xF2) компонент слюя $F2$

по данным ионозонда в Тромсе и частоты нагрева f_H (нижняя панель) 25 октября 2013 г. Как видно из рис. 2, искусственное оптическое излучение на $f_H = 7.1$ МГц регистрировалось на частотах нагрева в диапазоне между f_oF2 и f_xF2 ($f_oF2 < f_H \leq f_xF2$). В этом случае интенсивности эмиссий в линиях 630 and 577.7 нм составляли $I_{630.0} = 180 - 350$ и $I_{577.7} = 75 - 125$ R относительно фона соответственно, а отношение интенсивностей эмиссий составляло $I_{577.7} / I_{630.0} = 0.35 - 0.4$. На частоте $f_H = 6.2$ МГц нагрев проводился в условиях $f_H < f_oF2$. Здесь интенсивности красной и зеленой линий имели значения $I_{630.0} = 120 - 150$ R и $I_{577.7} = 75 - 100$ R соответственно с отношением $I_{577.7} / I_{630.0} = 0.4 - 0.6$.

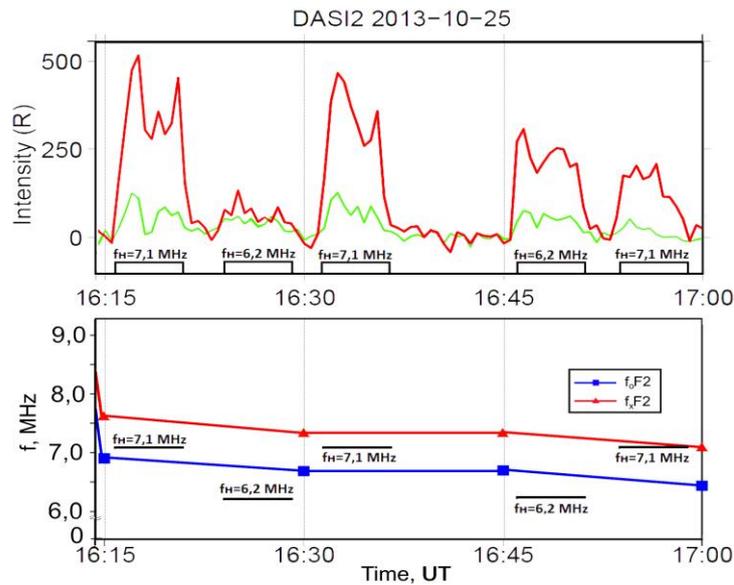


Рис. 2. Поведение интенсивностей эмиссий красной (630 нм) и зеленой (577.7 нм) линий атомарного кислорода (верхняя панель), критических частот f_oF2 и f_xF2 и частоты нагрева f_H (нижняя панель) 25 октября 2013 г.

Сравнение результатов наблюдений на рис 1 и 2 свидетельствует, что интенсивность оптических эмиссий красной и зеленой линий атомарного кислорода при X-нагреве F -области ионосферы находится в прямой зависимости от интенсивности ленгмюровских волн.

Выводы

Установлено, что интенсивные оптические эмиссии красной и зеленой линий атомарного кислорода в F -области высокоширотной ионосферы при X-нагреве возбуждались в условиях, когда частота нагрева была как ниже f_oF2 ($f_H < f_oF2$) на частоте $f_H = 6.2$ МГц, так и выше f_oF2 , но меньше f_xF2 ($f_oF2 < f_H \leq f_xF2$) на частоте $f_H = 7.1$. Показано, что искусственное оптическое излучение сопровождалось генерацией интенсивных продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) с поперечными к магнитному масштабам 7.5 - 10 м. При этом высота генерации оптических эмиссий происходила вблизи отражения волны накачки на высотах возбуждения искусственной ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности. Интенсивность оптических эмиссий красной и зеленой линий атомарного кислорода

при X-нагреве F -области ионосферы находится в прямой зависимости от интенсивности ленгмюровских волн.

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

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. 2007 Т.177. №11. С. 1145 – 1177.
2. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // Physics Reports. 1989. V. 179. P. 79 – 209.
3. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. et al. 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. V. 38. doi: 10.1029/2011GL046724.
4. Blagoveshchenskaya N. F. Perturbating the High-Latitude Upper Ionosphere (F Region) with Powerful HF Radio Waves: A 25-Year Collaboration with EISCAT // Radio Science Bulletin. 2020. № 373 (June 2020). P. 40 – 55. doi:10.23919/URSIRSB.2020.9318436.
5. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. et al. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2015. V. 135. P. 50–63.
6. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kosch M., et al. Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 10483–10498.
7. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kalishin A.S., Yeoman T. K., Häggström I. Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic Turbulences induced by O- and X-mode HF Pumping at EISCAT // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2020. V. 125. №7. <https://doi.org/10.1029/2020JA028203>.
8. Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Ion Gyro-Harmonic Structures in Stimulated Emission Excited by X-Mode High Power HF Radio Waves at EISCAT // J. Geophys. Res. Space Phys. 2021. V. 126 (8). <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>
9. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M. Artificial Ducts Created via High-Power HF Radio Waves at EISCAT // Remote Sens. 2023. V. 15 (9). 2300. <https://doi.org/10.3390/rs15092300>
10. Rietveld M. T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // Radio Sci. 2016. V. 51. №9. P. 1533–1546.
11. Rishbeth H, van Eyken T. EISCAT: Early history and the first ten years of operation // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 525 – 542.
12. Lester M., Chapman P. J., Cowley S. W. H et al. Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 459 -473.