

Искусственные ионосферные возмущения, вызванные воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации при различных углах излучения

А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38
E-mail: askalishin@aari.ru*

Представлены результаты мультиинструментальных исследований эффекта магнитного зенита при X-нагреве высокоширотной ионосферы на стенде EISCAT/Heating. Получены оценки возмущений параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации и температуры), характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) при различных углах излучения мощной КВ радиоволны.

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, высокоширотная ионосфера, обыкновенная и необыкновенная поляризация, магнитный зенит, узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности

Artificial ionospheric disturbances induced by the extraordinary polarized powerful HF radio waves injected at different angles

A.S. Kalishin, N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova

Arctic and Antarctic Research Institute

We present results from multi-instrument diagnostics in the course of the X-mode HF pumping at EISCAT/Heating facility to study the magnetic zenith effect. Estimates of disturbances of ionospheric plasma parameters (electron density and temperature), characteristics of small-scale artificial ionospheric irregularities (AFAI) and narrow-band stimulated electromagnetic emission (NSEE) at different radiation angles of a powerful HF radio wave were obtained.

Keywords: powerful HF radio wave, high latitude ionosphere, ordinary and extraordinary polarization, magnetic zenith, narrowband stimulated electromagnetic emission, small-scale artificial field-aligned irregularities

Введение

Воздействие мощного радиоизлучения на плазму является одним из эффективных методов ее исследования. В настоящее время активно проводятся экспериментальные работы на стендах HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program), расположенном на Аляске, EISCAT/Heating в окрестности г. Тромсо, Норвегия и Сура, п. Васильсурск [1]. Воздействие мощного КВ радиоизлучения (волны накачки) приводит к сильным локальным возмущениям в ионосферной плазме. В результате взаимодействия волны накачки в ионосферной плазме возбуждается целый ряд нелинейных явлений: генерация продольных и поперечных волн, нагрев, изменение электронной концентрации, аномальное широкополосное поглощение радиоволн, генерация искусственного свечения и радиоизлучения, ускорение электронов и многое другие [2]. Эффективность воздействия зависит от совокупности условий, таких как соотношения частот собственных колебаний плазмы и частоты воздействующей волны, ее моды поляризации и направления излучения.

Как правило, при активных воздействиях используется обыкновенная поляризация волны накачки (О-мода), которая характеризуется вращением вектора электрического поля E в направлении, противоположном направлению ларморовского вращения электрона. При этом, наиболее сильная модификация ионосферной плазмы происходит при резонансном взаимодействии волны накачки и собственных колебаний ионосферной плазмы, что ограничивает область высот наиболее эффективного взаимодействия мощного КВ радиоизлучения нагревного стенда высотой верхнегибридного резонанса и высотой отражения. Этой области высот может достигнуть только радиоволна О-моды, поскольку высота отражения волны Х-моды (необыкновенной поляризации) находится ниже. Именно по этой причине в активных экспериментах наибольшее предпочтение отдается волне обыкновенно поляризации.

Ряд экспериментов, выполненных на стенде EISCAT/Heating выявил сильную зависимость эффективности воздействия волны накачки обыкновенной поляризации от направления излучения нагревного стенда. Было обнаружено, что интенсивное искусственное свечение регистрируется вблизи магнитного зенита – в области существенно меньшей, чем ширина диаграммы направленности (ДН) нагревного стенда [3, 4]. Эксперименты на стенде HAARP также показали, что даже при вертикальном нагреве искусственное свечение наблюдалось вблизи магнитного зенита в виде яркого дискретного пятна [5]. Последующие исследования, выполненные авторами работы [6] показали, что усиление яркости свечения, которое вызвано воздействием волны накачки, совпадает с повышением температуры электронов. На основе экспериментальных данных Гуревичем была предложена теория самофокусировки волны накачки магнито-ориентированными мелкомасштабными неоднородностями ММН вдоль силовых линий, приводящая к усилению яркости свечения [7].

Результаты многочисленных экспериментов, выполненных на стенде EISACT, впервые показали, что воздействие волны накачки Х-поляризации приводит к возбуждению сильной ионосферной турбулентности, в отдельных случаях, превышающей интенсивность воздействия О-моды. Волна накачки Х-моды, инжектируемая исключительно в окрестности магнитного зенита, способна генерировать ММН [8], искусственное свечение ионосферы в красной (630 нм) и зеленой (557,7 нм) линиях, увеличение электронной концентрации N_e , ионно-акустические и ленгмюровские электростатические волны, а также спектральные компоненты узкополосного искусственного излучения ионосферы (УИРИ) [9]. Авторами работы [10] показано, что максимальная интенсивность возбуждаемых ионных и плазменных линий, при излучении Х-волны, наблюдалась в окрестности магнитного зенита.

В данной работе представлены результаты мультиинструментальных исследований эффекта магнитного зенита при Х-нагреве полярной ионосферы на стенде EISCAT/Heating. При проведении исследований использовались различные средства диагностирования, размещенные непосредственно рядом с нагревным стендом, так и на значительном расстоянии от него. Выполнены оценки поведения интенсивности температуры, электронной концентрации, характеристик ММН и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы от направления излучения нагревного стенда.

Описание экспериментов и средств диагностики

Воздействие на ионосферу мощным КВ радиоизлучением выполнялось стендом EISCAT/Heating, расположенным в г. Тромсе, Норвегия (69,6° с. ш., 19,2° в. д., $L=6.2$, $I=78^\circ$). Нагревной стенд представляет собой универсальный научно-исследовательский инструмент для искусственной модификации высокоширотной ионосферы и диагностирования состояния высокоширотной ионосферы [11]. В состав стенда входит 12 радиопередатчиков с номинальной мощностью в режиме непрерывного излучения 100 кВт.

Важным обстоятельством является пространственное совмещение нагревного комплекса EISCAT/Heating со средствами диагностирования фоновых геофизических условий и эффектов активных воздействий. Непосредственно, рядом со стендом, установлен радар некогерентного рассеяния, камера всего неба, ионозонд, приемник для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы.

Для диагностики параметров ионосферной плазмы (температуры T_e и концентрации электронов N_e) в экспериментах использовался радар некогерентного рассеяния (НР) [12]. Анализ поведения ММН выполнялся на основе данных КВ радара CUTLASS (The Collaborative UK Twin Located Auroral Sounding System) расположенного в Ханкасалми, Финляндия ($62,3^\circ$ с. ш., $26,6^\circ$ в.д) на удалении 880 км от нагревного стенда [13]

Регистрация излучения нагревного стенда и УИРИ выполнялась на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская» ($60,27^\circ$ с. ш., $29,38^\circ$ в.д.), расположенной в Ленинградской области, на расстоянии 1140 км от стенда EISCAT/Heating. Для регистрации излучения применялся многоканальный доплеровский комплекс, с шириной полосы анализа 100 Гц [14].

Результаты и обсуждение

Для исследования зависимости эффективности воздействия волны накачки необыкновенной поляризации от угла излучения были проанализированы серии экспериментов, в которых осуществлялось сканирование луча ДН нагревного стенда в некотором диапазоне углов, в том числе и в магнитный зенит. Напомним, что направление магнитного зенита составляет угол в 78° от горизонтали (12° от вертикали в южном направлении). Эксперименты с изменением направления излучения нагревного стенда выполнялись в октябре 2012 и октябре 2013 г.г.

Характерным примером зависимости параметров ионосферной турбулентности от направления излучения волны накачки Х-поляризации являются результаты, полученные 22 октября 2012г. Эксперименты проводились в период с 13 до 16 UT, нагревной стенд работал циклами 10 минут нагрев и 5 минут пауза на частоте 7,953 МГц, в циклах изменялась мода поляризации и направление излучения. Эксперименты проводились в спокойных геофизических условиях $Kp = 1$ -, при суммарном значении за сутки $\Sigma Kp = 4$. Значение критических частот ионосферы f_oF2 находилось в диапазоне 8,7 – 9,9 МГц.

Регистрация УИРИ выполнялась с 13:00 до 15:00 UT на НИС «Горьковская». Спектры УИРИ в координатах время – частота отстройки – интенсивность представлены на рисунке 1, периоды излучения обозначены белыми прямоугольниками, также указана мода поляризации и угол наклона диаграммы направленности. Нулевая частота отстройки соответствует частоте излучения нагревного стенда. Как видно из спектрограммы, в циклах излучения на О-моду, независимо от угла излучения, УИРИ не регистрировалось. При этом, в циклах излучения на Х-моду наблюдалось возбуждение спектральной линии УИРИ в области отрицательных отстроек частоты, интенсивность которой зависела от направления главного максимума фазированной антенной решетки нагревного стенда. Наибольшая интенсивность наблюдалась при Х-нагреве в магнитный зенит (-12°), при этом, средняя мощность УИРИ была на 27 – 47 дБ ниже мощности волны накачки. При излучении в направлении -6° от вертикали, интенсивность УИРИ уменьшалась на 10 – 15 дБ и составляла от -43 до -57 дБ.

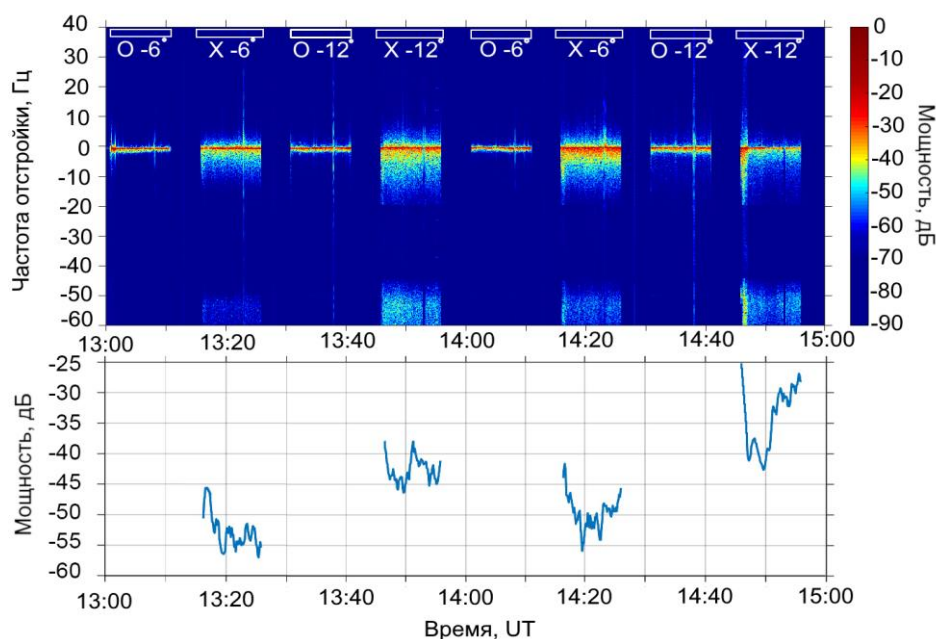


Рис. 1. Результаты регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы в период проведения эксперимента с 13:00 до 15:00 UT 22 октября 2012г. Спектрограмма (верхняя панель) и интенсивность спектральной линии в области отрицательных отстроек (нижняя панель).

Наблюдения ММН радаром CUTLASS 22 октября 2012г проводилось с 14:30 до 16:00 UT. Радар работал в «стандартном режиме» [13] на частоте 12,5 МГц. Излучение радара на данной частоте обеспечивало обратное рассеяние на ММН с поперечным размером $l_{\perp} \approx 12$ м. На рисунке 2 приведены результаты регистрации ММН, циклы излучения нагревного стенда обозначены прямоугольниками. Возбуждение неоднородностей в циклах О-нагрева наблюдалось независимо от угла наклона диаграммы направленности, интенсивность рассеянных сигналов находилась в диапазоне от 12 до 21 дБ, при среднем значении 16 дБ. По данным радара, ММН занимали пространственную область от 900 до 1035 км, то есть область, протяженностью 135 км.

При Х-нагреве отражения от ММН регистрировались только при излучении под углом -12° от вертикали, диапазон мощностей рассеянных сигналов составлял 9 – 15 дБ, при средней мощности 12 дБ. Отражения регистрировались на дальностях 945 – 1035 км, то есть были локализованы в области с поперечным размером 45 и 90 км.

Поведение температуры и концентрации электронов по данным радара некогерентного рассеяния приведено на рисунке 3. Измерения проводились с 13 до 15 UT в режиме сканирования искусственно-возмущенной области, каждые две минуты изменялся угол возвышения антенны радара в последовательности $76^{\circ} - 78^{\circ} - 80^{\circ} - 82^{\circ} - 84^{\circ}$.

В циклах О-нагрева, независимо от угла излучения нагревного стенда, возрастание N_e не наблюдалось при этом регистрировалось сильное возрастание температуры электронов T_e . При излучении в направлении магнитного зенита возмущения T_e фиксировались в диапазоне углов радара 6° , максимум возрастания T_e наблюдался в направлении -12° . При излучении нагревного стенда под углом -6° , возмущения T_e регистрировались в более широком диапазоне углов сканирования радара, который составлял 10° .

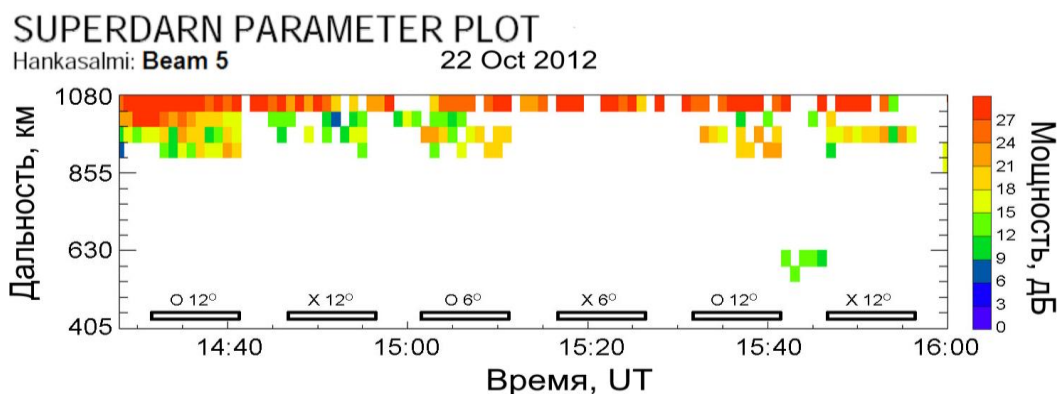


Рис. 2. Результаты регистрации рассеянного на ММН сигнала радаром CUTLASS 22 октября 2012г

Возрастания электронной концентрации N_e наблюдалось только в циклах излучения волны накачки X-поляризации при излучении в магнитный зенит, то есть в циклах с 13:46 по 13:56 и с 14:46 по 14:56 UT. При этом, максимальные возрастания N_e (на 70–80 %) наблюдались в направлении вдоль магнитного поля, то есть при угле поворота антенны радара, равном, -12° от горизонтали (или 78° от вертикали). Диапазон высот, в котором наблюдалось увеличение N_e составлял от 300 до 500 км. Возрастание N_e сопровождалось увеличением температуры электронов на 40–60 %, которое также наблюдалось вдоль направления магнитного поля, но в достаточно узком диапазоне высот от 220 до 260 км. Диапазон высот максимальных возмущений N_e и T_e не совпадал.

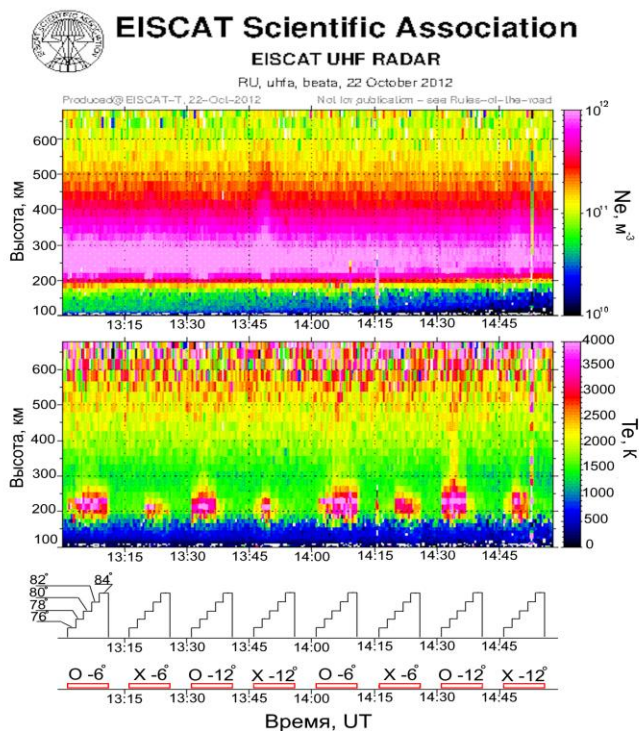


Рис. 3. Данные наблюдений радара некогерентного рассеяния EISCAT при сканировании искусственно-возмущенной области ионосферы по углам возвышения от 76° до 84° в период эксперимента 22 октября 2012 г. Мощная КВ радиоволна О/Х-поляризации излучалась на частоте 7,953 МГц в направлениях -6° и -12° от вертикали. Поляризация и направление излучения мощной КВ радиоволны, а также схема изменения углов возвышения радара НР показаны на нижней панели.

Заключение

По данным экспериментов, выполненных на стенде EISCAT/Heating, исследованы параметры области искусственной турбулентности ионосферы при различных углах излучения мощной КВ радиоволны необыкновенной поляризации: возмущение электронной концентрации и температуры, спектральная структура узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы и характеристики ММН.

Установлено, что наиболее сильные возмущения параметров ионосферной плазмы (создание дактов повышенных значений Ne), а также интенсивностей УИРИ и ММН создаются при излучении мощной X-волны вдоль направления магнитного поля Земли (78°). Интенсивность возмущений падала при увеличении отклонения ДН стенда от направления магнитного зенита.

Показано, что при излучении в магнитный зенит (78°) возрастания Ne, достигающие 50% относительно фона и сопровождаемые незначительным ($\sim 20 - 30\%$) повышением температуры электронов регистрировались в узком диапазоне углов возвышения радара $HR\ 77 - 79^\circ$, что свидетельствует о сильной нелинейной самофокусировке мощной X-волны вдоль магнитной силовой трубки.

Литература

1. Streltsov A.V., J.-J. Berthelier, A.A. Chernyshov et al. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space. *Space Sci Rev* (2018) 214:118 <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177. №11. С. 1145 – 1177.
3. Kosch, M. J., M. T. Rietveld, T. Hagfors, and T. B. Leyser, High-latitude HF-induced airglow displaced equatorwards of the pump beam // *Geophys. Res. Lett*, 2000, 27, 2817–2820 <https://doi.org/10.1029/2000GL003754>
4. Pedersen T.R., McCarrick M., Gerken E., et al. Magnetic zenith enhancement of HF radio-induced airglow production at HAARP // *Geophys. Res. Lett*. 2003. V. 30, N 4. P. 1169. doi:10.1029/2002GL016096
5. Pedersen, T. R., and H. C. Carlson, First observations of HF heater-produced airglow at the High Frequency Active Auroral Research facility: Thermal excitation and spatial structuring // *Radio Sci.*, 2001., 36, 1013–1026 <https://doi.org/10.1029/2000RS002399>
6. Rietveld M.T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K. Ionospheric electron heating, aurora and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: aspect angle dependence // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A4. P. 1141. doi:10.1029/2002JA009543
7. Gurevich A., Zybin K., Carlson H., Pedersen T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications // *Phys. Lett. A*. 2002. V. 305, N 5. P. 264–274
8. 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.
9. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kosch M., T. et al. Optical and ionospheric phenomena at EISCAT under continuous X-mode HF pumping // *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 2014. 10.1002/2014JA020658
10. 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 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. 135. 50–63 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.10.009>
11. 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.

12. 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.
13. 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.
14. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов / Метеорология и гидрология, 2021, № 4; DOI: 10.52002/0130-2906-2021-4-22-36