

Возбуждение искусственных ионосферных неоднородностей в полярной ионосфере при излучении мощного коротковолнового излучения необыкновенной поляризации (X- моды)

Т.Д. Борисова¹, Н.Ф. Благовещенская¹, А.С. Калишин¹, Л. Баддели²

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

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

E-mail: borisova@aari.ru

² UNIS, Шпицберген, Норвегия

Представлены результаты экспериментальных исследований ААНИИ по воздействию мощных КВ радиоволн, излучаемых нагревным комплексом SPEAR (пос. Лонгьир, арх. Шпицберген), на полярную ионосферу. Результаты экспериментов периода 2010—2013 гг. свидетельствуют о том, что станция, не имеющий в мире аналогов по своему географическому расположению, эффективно модифицирует полярную ионосферу, вызывая генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН). Приведены результаты наблюдений МИИН в экспериментах, выполненных преимущественно при излучении мощной КВ радиоволны необыкновенной поляризации (X- мода) в полярную ионосферу в направлении магнитного зенита. Наблюдения МИИН проводились одновременно системой КВ радаров CUTLASS (SUPERDARN) в Финляндии и Исландии и многоканальным приемным КВ доплеровским комплексом в обсерватории "Горьковская" вблизи Санкт-Петербурга, расположенной на расстоянии около 2000 км от SPEAR.

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, необыкновенная поляризация, модификация, полярная ионосфера, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности

Excitation of artificial ionospheric irregularities in the polar ionosphere by radiation powerful short-wave radiation of extraordinary polarization (X-mode)

T.D. Borisova¹, N.F. Blagoveshchenskaya¹, A.S. Kalishin¹, L.J. Baddeley²

¹ Arctic and Antarctic Research Institute.

² UNIS, Svalbard, Norway

We present the experimental results related to the impact of powerful HF radio waves radiated by the SPEAR heating facility (Longyearbyen, Spitsbergen archipelago) on the polar ionosphere. The results of the experiment, carried out in 2010–2013, clearly demonstrate that the facility, which has no analogues in the world in terms of its geographical location, is able to modify the polar ionosphere, producing the generation of the small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAI). In the course of experiments the powerful HF radio waves with the extraordinary (X-mode) polarization were radiated toward the magnetic zenith. The AFAI observations were carried out simultaneously by the CUTLASS (SUPERDARN) HF radar system in Finland and Iceland and by the HF multichannel Doppler equipment at the Gorkovskaya observatory near St. Petersburg, located at a distance of about 2000 km from SPEAR facility.

Keywords: powerful HF radio wave, extraordinary polarization, modification, polar ionosphere, small-scale artificial field-aligned irregularities

Введение

Модификация высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами, где в естественных условиях наблюдаются интенсивные горизонтальные (электроджет) и продольные токи, естественные неоднородности различных масштабов, потоки

высыпающихся частиц, неустойчивости в плазме и т. д., приводит к генерации новых явлений, принципиально невозможных в средних широтах. SPEAR, (Space Plasma Exploration by Active Radar), расположен на архипелаге Шпицберген рядом с г. Лонгьир и является самым высокоширотным КВ нагревным комплексом (78.15°N ; 16.05°E , магнитное наклонение $I=82^{\circ}$). Эффективная мощность излучения нагревного комплекса составляет $P_{\text{эфф}} = 15 \text{ МВт}$ [1]. Нагревные эксперименты по воздействию мощного КВ-радиоизлучения комплекса SPEAR на ионосферную плазму продемонстрировали развитие широкого комплекса явлений, вызванных развитием параметрических и резонансной неустойчивостей, см. например [2-4].

Впервые мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН), вызванные воздействием на высокоширотную F-область ионосферы мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации, были обнаружены в экспериментах, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) [1]. Экспериментальные исследования показали, что МИИН при X-нагреве возбуждаются при спокойных магнитных условиях в регулярной высокоширотной F-области ионосферы при излучении мощной КВ радиоволны в магнитный зенит на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F2. Экспериментально наблюдаются МИИН с поперечными масштабами $l_{\perp} \sim 8 - 20 \text{ м}$ [2-3].

Целью работы является анализ характеристик МИИН возбуждаемых в F- области полярной ионосферы при воздействии мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации с эффективной мощностью нагревного комплекса $P_{\text{эфф}} \sim 15 \text{ МВт}$.

Описание экспериментов и методов наблюдений

Для модификации полярной ионосферы использовался КВ нагревной комплекс SPEAR, технические характеристики которого приведены в работе [1]. Диаграмма направленности антенны была наклонена на 8° к югу от вертикали, обеспечивая излучение мощной КВ радиоволны в направлении магнитного зенита.

Эксперименты проводились в октябре 2010, 2011 и 2012 гг. Излучение мощной КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (X-мода) поляризации проводилось на частотах f_H , равных 4450, 4600 и 4900 кГц, в магнитный зенит. В основном нагрев проводился циклами 5 мин нагрев - 5 мин пауза. Для условий проведения экспериментов при излучении X-волны «просачивание» О- волны не превышало 10—15 %.

Регистрация МИИН осуществлялась следующими методами и средствами.

Многоканальный приёмный КВ доплеровский комплекс [5], предназначенный для регистрации нагревных КВ сигналов стенда SPEAR и диагностических КВ радиосигналов методом ракурсного рассеяния (РР) на МИИН. Комплекс установлен в обсерватории ААНИИ "Горьковская", расположенной на расстоянии 70 км от Санкт-Петербурга и примерно 2000 км от комплекса SPEAR. Приём сигналов, рассеянных над комплексом SPEAR, проводился на двойную ромбическую антенну, ориентированную на комплекс SPEAR.

Система КВ радаров CUTLASS (SUPERDARN) в Финляндии и Исландии [6]; оба радара CUTLASS излучали на узконаправленную антенну с шириной луча примерно $3,3^{\circ}$, ориентированную на искусственно возмущённую область ионосферы над Лонгьиром («луч» 9 и 5 для радаров в Финляндии и Исландии соответственно).

Результаты наблюдений МИИН в полярной ионосфере при X- нагреве

В период модификации полярной ионосферы мощной КВ радиоволной необыкновенной (X-мода) поляризации в октябре 2010-2012 гг. были зарегистрированы диагностические КВ радиосигналы, ракурсно рассеянные на МИИН, возбуждаемые в F-

области полярной ионосферы над нагревным комплексом SPEAR. Эксперименты проводились в дневное время при спокойных магнитных условиях. Ракурсно рассеянные на МИИН сигналы регистрировались в периоды излучения стенда SPEAR как в отрицательной части доплеровского спектра, так и положительной и характеризовались спектральным рассеянием 2 - 9 Гц.

На рис. 1 а,б в качестве примера представлены результаты измерений методом ракурсного рассеяния 7 октября 2010 г. с 12:19 до 12:26 UT. На рис. 1 а приведена сонограмма диагностического радиосигнала на частоте $f_{\text{диагн}} = 9610$ кГц на трассе Ситкунай - SPEAR - Санкт-Петербург протяженностью 4605 км, а на рис. 1 б — сонограмма радиосигнала на $f_{\text{диагн}} = 9710$ кГц на трассе Лондон - SPEAR - Санкт-Петербург протяженностью 5185 км. В нагревном цикле 12:20-12:25 UT мощная КВ радиоволна X- моды излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 4450 кГц.

Для обоих диагностических сигналов в цикле излучения наблюдались интенсивные сигналы, ракурсно рассеянные на МИИН. Нулевые значения сдвига доплеровской частоты $f_D = 0$ на сонограммах на рис. 1 а,б соответствуют распространению сигнала от передатчика к приёмнику по дуге большого круга («прямой» сигнал). Ракурсно рассеянные сигналы на обеих диагностических трассах с частотами $f_{\text{диагн}} = 9610$ кГц и $f_{\text{диагн}} = 9710$ кГц характеризовались диффузными спектральными компонентами в области положительных значений f_D . На сонограммах рассеянные сигналы формировали диффузные треки в положительной области f_D в течение цикла нагрева 12:20 - 12:25 UT. Полосы частот ракурсно-рассеянных сигналов составили от 6—8 Гц для КВ радиосигнала из г. Ситкунай и до 9 Гц для радиосигнала из Лондона.

На рис. 1 в качестве примера приведены результаты измерений 8 октября 2010 г. с 13:18 до 13:57 UT радаром CUTLASS в Финляндии на частоте порядка 10 МГц. Поведение рассеянных сигналов (рис. 1 в) представлено в координатах дальность (Range gate) - мировое время UT. Регистрация рассеянных сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 1980 до 2880 км, соответствующем «воротам» от 40 до 60. Нагрев ионосферы проводился на частоте $f_H = 4450$ кГц циклами 5 мин нагрев — 5 мин пауза. В первых двух циклах нагрева с 13:20 до 13:35 UT излучалась мощная КВ радиоволна О-поляризации в магнитный зенит. В данный интервал времени для частоты нагрева f_H и критической частоты ионосферного слоя F2 обыкновенной поляризации f_oF2 выполнялось соотношение $f_H \leq f_oF2$. Из рис. 1 в видно, что циклах нагрева 13:20 - 13:25 и 13:30 - 13:35 UT регистрировались достаточно интенсивные сигналы, рассеянные на МИИН. Далее с 13:35 до 13:50 UT была пауза в работе нагревного стенда. В следующем цикле нагрева (13:50 - 13:55 UT), когда значения f_oF2 до начала нагревного цикла составляли уже 4,2-4,3 МГц, была изменена поляризация мощной КВ радиоволны с О- на Х-моду. Из рис. 1 в по данным радара CUTLASS можно видеть возникновение интенсивных сигналов, рассеянных на МИИН с 13:50 до 13:55 UT при Х-нагреве полярной ионосферы.

Выводы

Результаты экспериментальных измерений показали, что генерация МИИН в F-области полярной ионосферы возможна в периоды излучения мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации (Х-мода). Возбуждение МИИН происходит в экспериментах Х-нагрева с использованием частот накачки как выше, так и ниже критической частоты слоя F2.

Для исследования механизмов возбуждения МИИН в ионосферных нагревных экспериментах с использованием мощных КВ радиоволн Х- поляризации необходимо проводить дальнейшие исследования как экспериментально, так и теоретически.

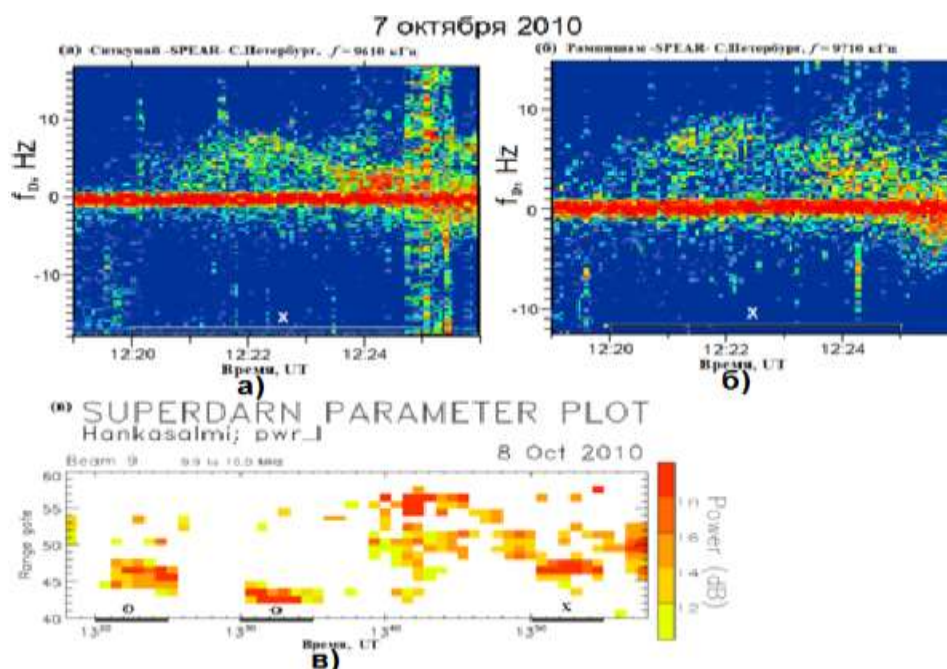


Рис. 1. Динамические доплеровские спектры диагностических КВ сигналов во время нагревного эксперимента с использованием стенда SPEAR 7 октября 2010 г. (а и б) и данные наблюдений с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми (луч 9, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над пос. Лонгьер) на частоте порядка 10 МГц 8 октября 2010 г. (в).

Циклы нагрева поляризация мощной КВ радиоволны отмечены на оси времени

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00020П).

Литература

1. Robinson T.R., Yeoman T.K., Dhillon R.S., Lester M., Thomas E.C., Thornhill J.D., Wright D.M., van Eyken A.P., McCrea I.W. First observations of SPEAR induced artificial backscatter from CUTLASS and the EISCAT Svalbard radars // Ann. Geophys., 24, 291–309, 2006. <http://www.ann-geophys.net/24/291/2006/>
2. 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.
3. Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Корниенко В.А., Янжура С.А., Калишин А.С., Робинзон Т.Р., Йоман Т.К., Райт Д.М., Баддели Л.Дж. Явления в полярной ионосфере, инициированные воздействием мощных КВ радиоволн комплекса SPEAR // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. №11. С. 939-950.
4. 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 аэрономия. 2019. Т.59. №6. С. 759–773.
5. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов. // Метеорология и гидрология. 2021. Т. 46, № 4. С. 22–36.
6. 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.