

Методы дистанционной диагностики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн

Егоров И.М.¹, Н.Ф. Благовещенская¹, А.С. Калишин¹, Т.Д. Борисова¹,
Загорский Г.А.¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38
E-mail: egorovneva@gmail.com

Рассмотрены возможности различных методов дистанционной диагностики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), вызванных воздействием мощных КВ радиоволн. МИИН вызывают интенсивное ракурсное и обратное рассеяние КВ и УКВ радиосигналы, тем самым обеспечивая их распространение в диапазонах частот и на дальностях, недостижимых в естественных ионосферных условиях. В статье представлены результаты дистанционного исследования характеристик МИИН в F-области ионосферы в период экспериментов на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия). Совместное использование различных средств и методов дистанционной диагностики, таких как многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс, комплексы наклонного зондирования ионосферы и когерентный радар обратного рассеяния CUTLUSS обеспечивает более полное и всестороннее изучение МИИН, включая размеры искусственно возмущенной области, полосу частот и тонкую структуру ракурсно-рассеиваемых сигналов, интенсивность, время нарастания и релаксации МИИН.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, дистанционная диагностика, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, мощная КВ радиоволна, нагревной стенд, ракурсное рассеяние.

Remote sensing methods for diagnostics of small-scale artificial field-aligned irregularities induced by powerful HF radio waves

Egorov I.M.¹, N.F. Blagoveshchenskaya¹, A.S. Kalishin¹, T.D. Borisova¹,
Zagorskiy G.A.¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute
38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397

We have considered various remote sensing methods for diagnostics small-scale artificial field-aligned irregularities (FAFI) induced by powerful HF radio waves.. FAFI induce bi-static scattering of HF and VHF signals, providing their propagation in the frequency range and over distances unattainable in the natural ionosphere. We present results of investigations of FAFI in the ionospheric F-region in the course of EISCAT/Heating (Tromsø, Norway) experiments. Joint usage of various remote diagnostics tools, including the multichannel HF Doppler equipment, oblique sounding and the CUTLUSS backscatter radar provides more comprehensive and complete study of the FAFI, including the size of the artificially disturbed region occupied with the FAFI, the frequency band of bi-static scatter signals (BSS), the fine structure of BSS, the intensity, growth and decay times of FAFI.

Keywords: high latitude ionosphere, remote sensing, artificial field-aligned irregularities, powerful HF radio wave, Heating facility, bi-static radio scatter

Введение

Диагностика и прогноз явлений, происходящих в околоземном космическом пространстве и обусловленных солнечно-земными связями, становится все более актуальной задачей, поскольку там функционируют автоматические космические аппараты, работают космонавты на пилотируемых космических станциях. Кроме того, ионосфера является средой, оказывающей влияние на распространение радиоволн, тем самым влияя на работоспособность систем радиосвязи, навигации и телекоммуникаций. Одним из методов изучения ионосферы является воздействие на нее мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением с помощью специальных наземных КВ радиопередатчиков большой мощности, так называемых КВ нагревных стендов. Мощные КВ радиоволны, взаимодействуя с ионосферой, ускоряют или «разогревают» электроны, выводя ионосферную плазму из состояния равновесия. Исследования возникающей при этом искусственно возмущенной локальной области ионосферы привлекают значительное внимание ученых возможностью изучения не до конца понятных на сегодняшний день физических особенностей вариаций параметров ионосферы по сравнению с их наблюдениями в естественных условиях. Взаимодействие мощной КВ радиоволны с ионосферой вызывает создание разнообразных нелинейных явлений в ионосфере, которые могут изучаться на контролируемой и повторяемой основе. Одним из наиболее выдающихся явлений, обнаруженных в экспериментах по воздействию мощных КВ радиоволн на ионосферу, является генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН). МИИН вызывают ракурсное и обратное рассеяние коротковолновых и ультракоротковолновых (КВ и УКВ) сигналов, обеспечивая их распространение в диапазоне частот и на дальностях, недостижимых в естественной ионосфере. Таким образом, появляется возможность создания управляемых каналов радиосвязи.

В данной работе представлены результаты исследования МИИН F-области ионосферы на основе использования различных дистанционных методов диагностики.

Методы диагностики

В качестве иллюстрации возможностей различных дистанционных методов диагностики МИИН были рассмотрены результаты экспериментов 19 октября 2012 г. и 20 октября 2016 г., выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating в г. Тромсе, Норвегия (69.6 с.ш., 19.2 в.д.) [1].

19 октября 2012 г. мощная КВ радиоволна обыкновенной (О-мода) поляризации излучалась на частоте $f_H = 7953$ кГц в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности антенны была наклонена на 12° от вертикали к югу) циклами 30 минут нагрев, 30 минут пауза. Эффективная мощность излучения составляла $P_{эфф} \sim 840$ МВт. 20 октября 2016 г. осуществлялся альтернативный О-/Х-нагрев, когда мощная КВ радиоволна обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась на частоте $f_H = 4544$ кГц в направлении магнитного зенита при $P_{эфф} \sim 190$ МВт циклами 10 минут нагрев, 5 минут пауза.

Одним из используемых методов дистанционного диагностирования МИИН являлся приемный многоканальный КВ доплеровский комплекс, разработанный в ААНИИ и предназначенный для регистрации МИИН методом ракурсного рассеяния диагностических КВ сигналов. В качестве передающих устройств использовались радиопередатчики мировой сети радиовещательных станций КВ радиодиапазона, работающих в режиме амплитудной модуляции. Стационарный многоканальный доплеровский комплекс «Спектр» [2] установлен на научно-исследовательской станции ААНИИ «Горьковская», расположенной в Ленинградской области (60.27 с.ш., 29.38

в.д.). Расстояние от нагревного стенда EISCAT/Heating до НИС «Горьковская» составляет 1140 км.

Для диагностики МИИН также использовался когерентный КВ доплеровский радар CUTLASS (SuperDARN) [3] в Ханкасалми, Финляндия (63 с.ш., 27 в.д.), находящийся примерно на 1000 км южнее КВ нагревного стенда в Тромсе. В период работы группы ученых из ФГБУ «ААНИИ» на нагревном стенде EISCAT/Heating радар CUTLASS работал в нестандартном режиме с излучением на узконаправленную антенну с шириной луча примерно $3,3^\circ$, ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над г. Тромсе («луч» 5) с временным разрешением 3 с и разрешением по дальности 15 км. Измерения проводились одновременно на частотах 12,3-12,5; 13,2-13,3; и 16,2-16,4 МГц, что позволяло контролировать поведение МИИН с поперечными к магнитному полю размерами $l_\perp \sim 12,1$; 11,3 и $l_\perp \sim 9,2$ м соответственно ($l_\perp = c / 2f$, где f – частота радара). Выбор и контроль частот нагрева осуществлялся по данным ионозонда в г. Тромсе.

Помимо выше перечисленных средств для регистрации ракурсно-рассеянных сигналов на МИИН применялась автоматизированная цифровая аппаратура наклонного зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ (далее Комплекс НЗИ с ЛЧМ, ЛЧМ комплекс), предназначенная для измерения методом наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) и получения цифровых ионограмм, характеризующих состояние ионосферного канала распространения КВ радиоволн [4]. В период экспериментов использовался приемно-передающий комплекс НЗИ с ЛЧМ, установленный на геофизической станции НИС «Горьковская». Он принимал сигналы ЛЧМ передатчика из Швеции (65.82 с.ш., 21.70 в.д.), мощность которого была ~ 200 Вт.

Результаты наблюдений

Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН) являются одним из наиболее значимых явлений, обнаруженных в нагревных экспериментах. МИИН интенсивно изучались на всех КВ нагревных стендах мира, расположенных как в средних, так и высоких широтах, см., например, [5 – 10]. Эффекты, вызванные воздействием мощных КВ радиоволн О-поляризации, зарегистрированные станцией наклонного зондирования ионосферы на радиотрассе Швеция — Тромсё — Санкт-Петербург, представлены на рис. 1. Левая ионограмма была получена в отсутствии нагрева (off), а правая – в цикле нагрева (on). Из рис. 1 следует, что на ионограмме в цикле нагрева наблюдался дополнительный трек, обусловленный ракурсным рассеянием диагностических сигналов на МИИН. Дополнительный трек регистрировался в диапазоне частот 16 – 26 МГц, превышающих максимально наблюдаемую частоту слоя F2 (MUF2) с временной задержкой, соответствующей времени распространения на направлении Швеция – Тромсё – Горьковская. Диапазон частот 16 – 26 МГц, в котором регистрировались ракурсно-рассеянные сигналы (bi-static scattered signals, BSS), соответствует поперечным к магнитному полю масштабам МИИН $l_\perp \sim 5,7$ – 9,3 м.

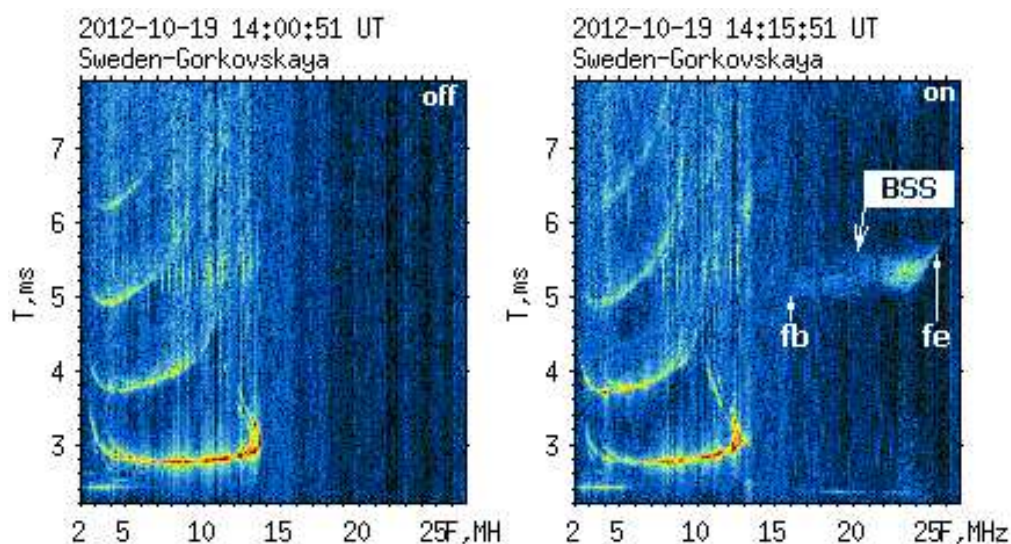


Рис. 1. Ионограммы наклонного зондирования ионосферы на трассе Швеция – Горьковская 19 октября 2012 г при отсутствии нагрева (off) и в цикле нагрева (on). Мощная КВ радиоволна обыкновенной (О-мода) поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 7953$ кГц на фазированную антенную решетку ФАР 1, обеспечивающую эффективную мощность излучения $P_{эф} = 840$ МВт.

На рис. 2 представлены объединенные данные радара CUTLASS (луч 5) на частотах $\sim 12, 13$ и 16 МГц и динамические доплеровские спектры, полученные с помощью многоканального приемного КВ доплеровского комплекса на протяженных радиотрассах Окичеби (США) – Тромсё - С.-Петербург на частотах ~ 17750 и 21675 МГц в период эксперимента 20 октября 2016 г. Все графики имеют единую временную шкалу. Из данных радара CUTLASS следует, что горизонтальный размер возмущенной области, занятой МИИН при О-нагреве, составлял $L = 100 - 120$ км, в то время как при переходе на Х-нагрев размер области уменьшился до $L = 60 - 80$ км. После 15:000 UT критические частоты слоя F2 ($foF2$) уменьшались и после 15:30 UT Х-нагрев осуществлялся на частотах, выше $foF2$. При этом размер области, занятой МИИН, стал увеличиваться, достигнув к 16 UT ~ 200 км на частотах ~ 12 и 13 МГц, а на частоте 16 МГц МИИН исчезли. Характерной особенностью поведения МИИН при Х-нагреве является большое время релаксации МИИН, которое превышает длительность пауз (5 мин), т.е. МИИН регистрируются непрерывно с увеличением их интенсивностей в циклах нагрева. Принципиально важным обстоятельством, обнаруженным в эксперименте 20 октября 2016 г., является факт влияния МИИН на дальнейшее распространение декаметровых волн, как при О-, так и Х-нагреве F2 слоя ионосферы.

SUPERDARN PARAMETER PLOT

Hankasalmi Beam 5

20 Oct 2016

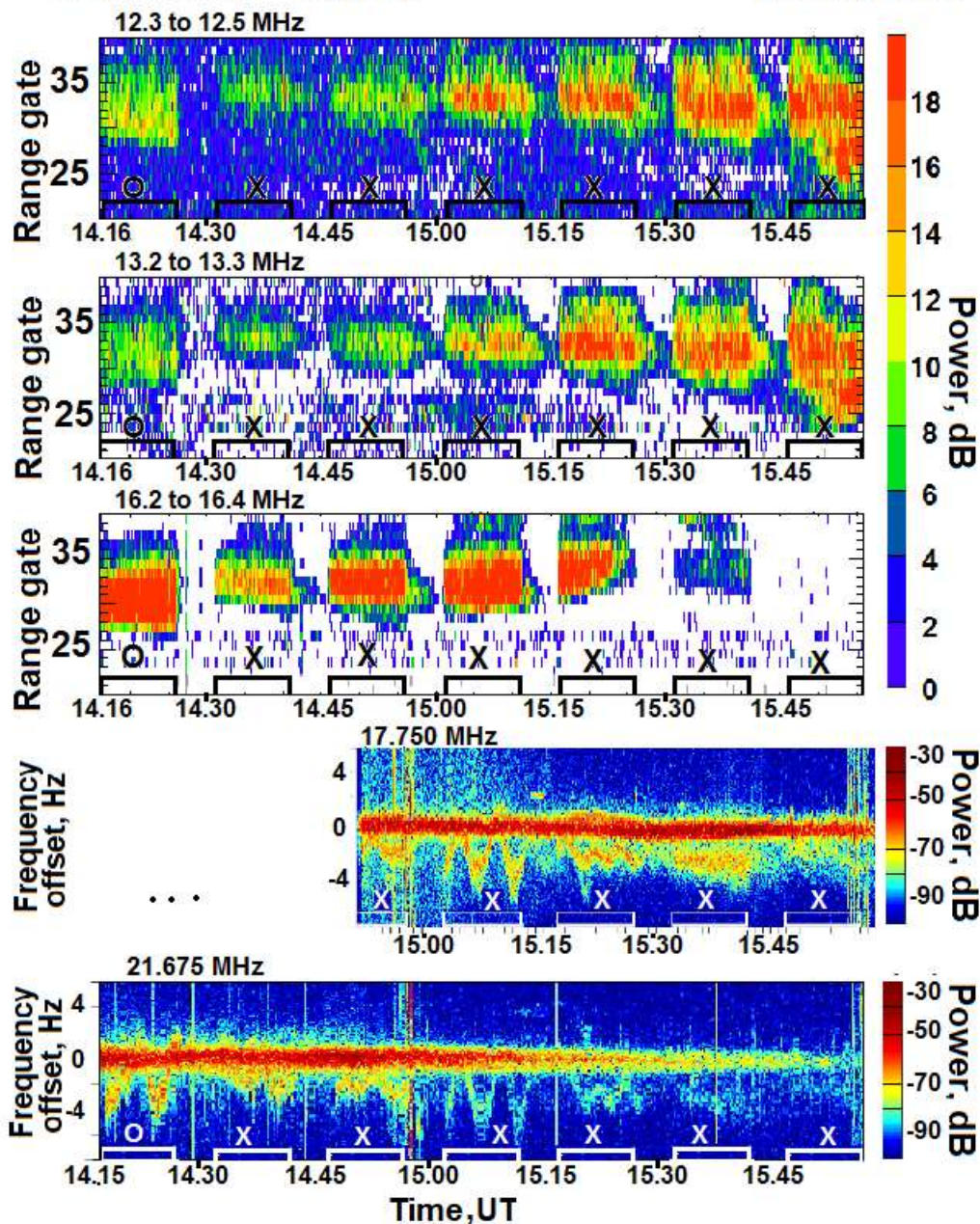


Рис. 2.Объединенные данные радара CUTLASS (луч 5) на частотах около 12, 13 и 16 МГц и динамические доплеровские спектры по данным многоканального приемного КВ доплеровского комплекса на радиотрассах Окичеби (США) – Тромсё - Санкт-Петербург во время О-/Х-нагрева 20 октября 2016 г. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 4544$ кГц циклами 10 минут нагрев и 5 минут пауза. Эффективная мощность излучения $P_{эф} \sim 190$ МВт. Циклы нагрева и моды поляризации указаны на временных осях.

Закключение

Представлены результаты исследования мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в F-области высокоширотной ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн О- и Х- поляризации с использованием трех различных методов дистанционной диагностики, включая метод ракурсного и обратного рассеяния диагностических КВ сигналов на МИИН по данным

наблюдений с использованием многоканального КВ доплеровского комплекса, станций наклонного зондирования ионосферы и радара CUTLASS. Совместное использование различных средств дистанционной диагностики МИИН позволяет более всесторонне и полно исследовать поведение и характеристики МИИН при О- и Х-нагреве, включая размер искусственно возмущенной области ионосферы, занятой МИИН, диапазон частот, в котором наблюдаются ракурсно-рассеянные сигналы (РРС), тонкую структуру РРС, интенсивности, времена нарастания и релаксации МИИН.

Литература

1. Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Science*. 2016. Vol. 51(9). P. 1533–1546.
2. 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.
3. 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.
4. Rogov D.D., Blagoveshchenskaya N.F., Yeoman T.K Features of Artificial Ionospheric Irregularities Induced by Powerful HF Radio // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. 24–28 June 2019. 10.1109/RSEMW.2019.8792727
5. Erukhimov L.M., Metelev S.A., Myasnikov E.N., Mityakov N.A., Frolov V.L. Artificial ionospheric turbulence (review) // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1987. T. 30. № 2. P. 156–171.
6. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Physics Reports*. 1989. Vol. 179. P. 79–209.
7. Gurevich A.V. Nonlinear effects in the ionosphere // *Physics-Uspekhi*. 2007. T. 50. № 11. P. 1091–1121.
8. 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. L08802. doi:10.1029/2011GL046724
9. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Häggström I., Kalishin A.S. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multiinstrument diagnostics // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. Vol. 135. P. 50–63.
10. Egorov I.M., Blagoveshchenskaya N.F., Kalishin A.S., Borisova T.D., Zagorskiy G.A. Features of small-scale artificial irregularities in the high latitude ionospheric F-region from remote sensing observations // *Arctic and Antarctic Research*. 2025. V. 71. №1. P. 6–16.