

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ИСКУССТВЕННО ВОЗМУЩЕННОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

И.М. Иванова¹, Н.Ф. Благовещенская¹, Т.Д. Борисова¹, Т. Yeoman², М. Rietveld³

¹ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² Лейстерский университет, Великобритания

³ EISCAT, Тромсё, Норвегия

Введение

Воздействие мощного коротковолнового радиоизлучения от специальных наземных КВ нагревных комплексов на ионосферу приводит к генерации целого ряда физических явлений, к числу которых относятся и возбуждение искусственных ионосферных неоднородностей различных пространственных масштабов (мелко-, средне- и крупномасштабных). Горизонтальный размер искусственно возмущенной области (ИВО) приблизительно оценивается шириной главного лепестка диаграммы направленности антенной системы КВ нагревного комплекса и зависит от высоты расположения ИВО.

В реальных условиях высокоширотной ионосферы размер ИВО существенно зависит от угла излучения мощной КВ радиоволны относительно направления магнитного поля Земли. В [1, 2] по данным радара некогерентного рассеяния (НР) в Тромсе исследовалась пространственная структура ИВО при различных углах излучения волны накачки (вертикальном, $\Theta = 90^\circ$, вдоль направления магнитного поля $\Theta = 78^\circ$ и промежуточном между ними направлении $\Theta = 84^\circ$) в эпоху максимума солнечной активности. При каждом из трех фиксированных углов излучения мощной КВ радиоволны с помощью радара НР осуществлялось последовательное сканирование искусственно возмущенной F-области ионосферы в направлениях 84° , 90° и 78° . Было установлено, что при любом направлении излучения волны накачки наиболее сильные возмущения температуры электронов T_e наблюдались в направлении магнитного поля в Тромсе.

Представляет несомненный интерес исследовать тонкую структуру ИВО при ее сканировании с помощью радара НР с шагом по углам возвышения не 6 градусов, как это было сделано в [1, 2], а существенно меньшим, что позволит детально и с высокой точностью исследовать пространственную структуру искусственно возмущенной области ионосферы.

Экспериментальные наблюдения

Эксперименты по определению пространственной структуры искусственно возмущенной высокоширотной F-области ионосферы (ИВО)

выполнялись в октябре-ноябре 2009 года на нагревном комплексе EISCAT/ HEATING вблизи г. Тромсё, Норвегия (географические координаты: 69.6° N, 19.2° E; угол наклона магнитного поля: $I=78^\circ$) (рис. 1) в дневные часы, в спокойных магнитных условиях. Основные технические характеристики этого комплекса приведены в [3]. При использовании фазированной антенной решетки №2, используемой во всех экспериментах ААНИИ в 2009 г., и работе всех 12-ти передатчиков формируется апертура шириной порядка $\sim 12 - 14^\circ$ в зависимости от частоты излучения мощной КВ радиоволны.

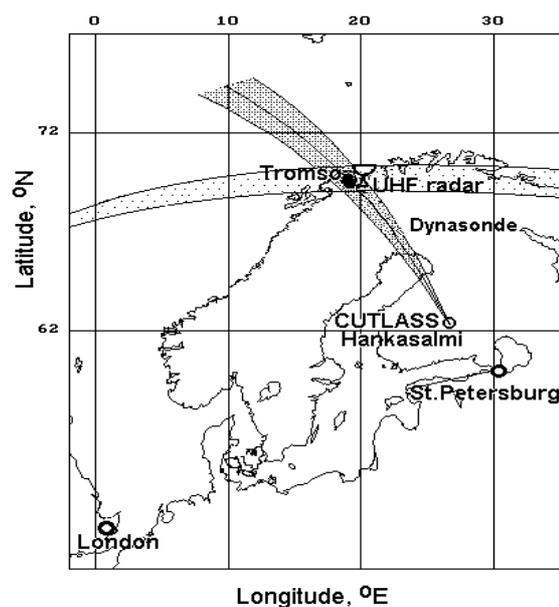


Рис. 1. Карта-схема, поясняющая геометрию расположения нагревного стенда EISCAT/HEATING, а также диагностических средств наблюдений, использованных в экспериментах ААНИИ с 29 октября по 6 ноября 2009 г.

В этих экспериментах излучение мощной КВ радиоволны O-поляризации производилось на частотах нагрева 4912.8, 4544 и 4040 кГц в вертикальном направлении или вдоль магнитного поля (в магнитный зенит) циклами 10 мин нагрев/5 мин пауза. Отношение частоты нагрева к критической частоте слоя F2 менялось в пределах $f_H / foF2 \approx 0.9 - 1.0$. Эффективная мощность излучения составляла 190 - 250 МВт. Для каждого из двух

фиксированных углов излучения мощной КВ радиоволны с помощью радара НР в течение 10-ти минутного цикла нагрева осуществлялось последовательное сканирование искусственно возмущенной F-области ионосферы в направлениях 92-90-88-86-84-82-80-78-76-74 градусов. При каждом значении угла возвышения измерения проводились в течение 1 минуты.

Рассмотрим данные измерений радара НР в Тромсе в период эксперимента 31 октября 2009 г. На рис.2 приведено пространственно-временное распределение электронной плотности (N_e), температуры электронов (T_e), температуры ионов (T_i) и скорости (V_i) в диапазоне высот 90–550 км с 12.12 до 12.42 UT в режиме последовательного сканирования искусственно возмущенной области ионосферы в диапазоне углов возвышения от 92 до 74 градусов с шагом 2 градуса по углам возвышения. Мощная КВ радиоволна обыкновенной поляризации (O-мода) на частоте 4544 кГц излучалась в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$) с 12.15 до 12.25 UT, а затем в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) с 12.30 до 12.40 UT. Нагрев ионосферы проводился вблизи критической частоты слоя F2.

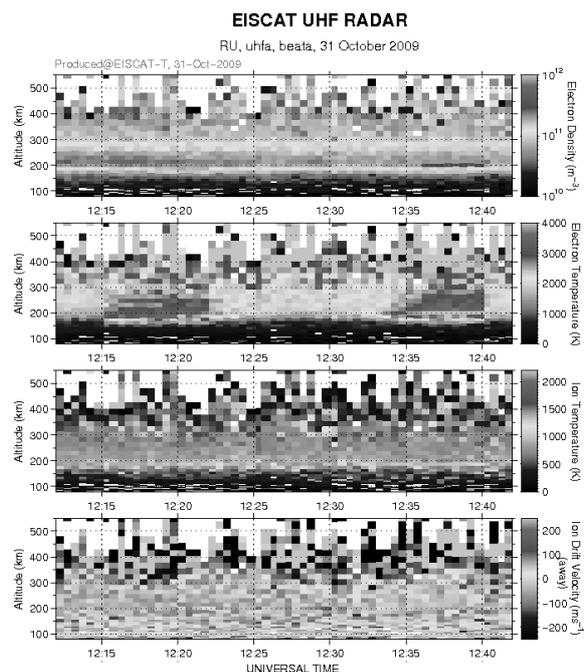


Рис. 2. Пространственно-временное распределение электронной плотности (N_e), температуры электронов (T_e), температуры ионов (T_i) и скорости (V_i) в диапазоне высот 90–550 км по данным радара НР в Тромсе.

На рис. 3 приведены данные измерений радара НР в Тромсе, полученные на

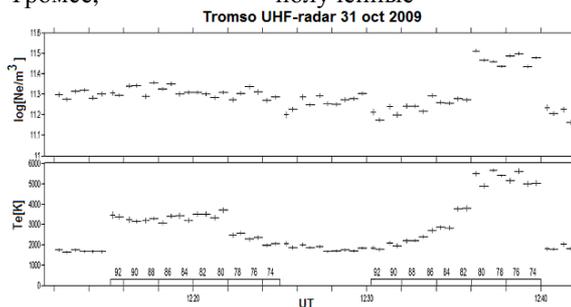


Рис. 3. Временные вариации электронной плотности N_e и температуры электронов T_e на фиксированной высоте 200 км по данным измерений радара НР в Тромсе.

фиксированной высоте 200 км вблизи высоты отражения мощной КВ радиоволны от слоя F2, в режиме последовательного сканирования искусственно возмущенной F-области ионосферы в направлениях 92-90-88-86-84-82-80-78-76-74 градусов. Измерения для каждой угловой позиции проводились в течение 1 мин.

На рис. 4а изображены высотные профили электронной температуры для различных углов возвышения радара НР (от 92 до 74 градусов) при излучении мощной КВ радиоволны в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$).

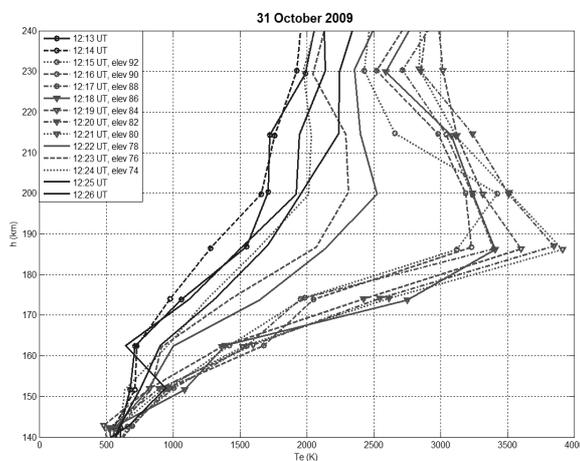


Рис. 4а. Высотные профили температуры электронов по данным измерений радара НР в Тромсе 31 октября 2009 г.

Рис. 4б показывает высотные профили электронной температуры для различных углов возвышения радара НР (от 92 до 74 градусов) при излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$).

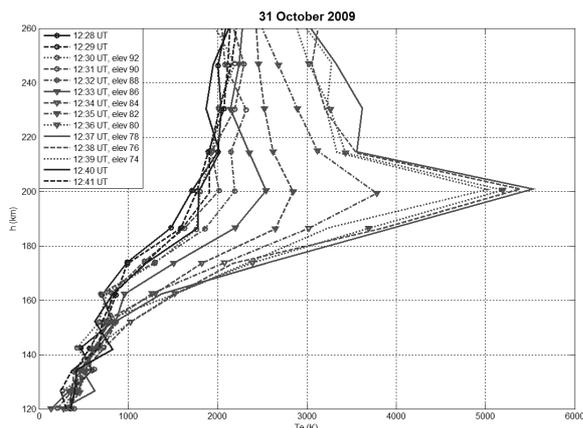


Рис. 46. Высотные профили температуры электронов по данным измерений радара HP в Тромсе 31 октября 2009 г.

В нагревных экспериментах были также задействованы когерентные КВ радары CUTLASS (Super DARN) в Ханкасалми (Финляндия) и Рейкьявике (Исландия), геометрия расположения которых относительно КВ нагревного комплекса в Тромсе (рис.1) позволяет оценить горизонтальные размеры ИВО как в северо-южном направлении (радар CUTLASS в Финляндии), так и в восточно-западном (радар CUTLASS в Исландии) [4]. Рассмотрим данные наблюдений с помощью радаров CUTLASS в период нагревного эксперимента 4 марта 2010 г. Мощная КВ радиоволна О-поляризации на частоте 4.544 кГц излучалась в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза.

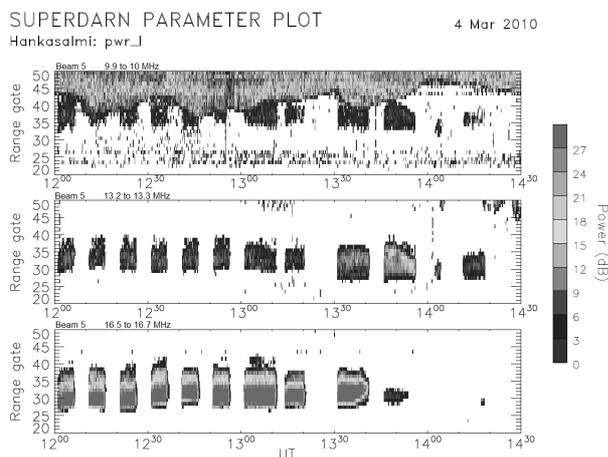


Рис. 5. Данные наблюдений с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия.

На рис. 5 приведены результаты наблюдений с помощью когерентного КВ радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на Тромсе) на частотах порядка 10, 13 и 17 МГц. Показано поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность (Range gate) – мировое время UT в период нагревного эксперимента в г.

Тромсе 4 марта 2010 г. с 12.00 до 14.30 UT. Разрешение по дальности составляет 15 км. SUPERDARN PARAMETER PLOT 4 Mar 2010 Pykkvibaer: pwr_1

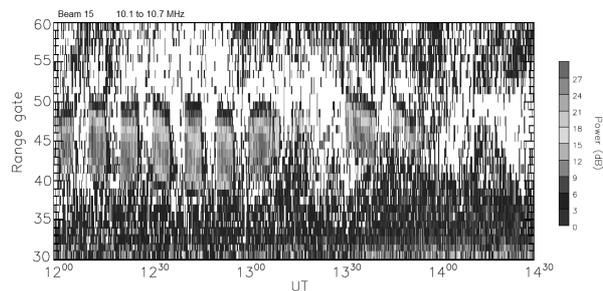


Рис. 6. Данные наблюдений с помощью с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Рейкьявике, Исландия.

На рис. 6 приведено поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность (Range gate) – мировое время (UT) в период нагревного эксперимента в г. Тромсе 4 марта 2010 г. с 12.00 до 14.30 UT по данным когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Рейкьявике, Исландия (луч 15) на частоте 10.5 МГц. Разрешение по дальности составляет 15 км.

Анализ полученных результатов

Анализ данных, приведенных на рис. 2-4б, показывает, что нагрев на частотах вблизи критической частоты слоя F2 вызывает сильные возмущения температуры электронов как при вертикальном нагреве, так и при излучении мощной КВ радиоволны в магнитный зенит. При излучении волны накачки вертикально вверх ($\Theta = 90^\circ$) максимальные возмущения температур электронов достигали значений $T_{e,max} = 3200 - 4000$ К (при фоновых значениях в паузах между нагревными циклами $T_{e,0} \approx 1200 - 1800$ К). При этом максимальные возмущения T_e равномерно распределены внутри области шириной порядка $\sim 20 - 24^\circ$ (с учетом симметричности распределения T_e относительно направления $\Theta = 90^\circ$). Пространственной размер области с возмущениями температур электронов, превышающих фоновые значения на 50 % ($T_e / T_{e,0} = 1.5$), достигает больших размеров и составляет $24 - 32^\circ$. Таким образом, при вертикальном излучении волны накачки фактический пространственный размер ИВО по горизонтали, где происходит значительный разогрев ионосферной плазмы, существенно превышает размер области возмущения, определяемый шириной диаграммы направленности антенны ($\sim 12 - 14^\circ$). При излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) температура электронов достигала существенно более высоких значений $T_{e,max} = 4100 - 5800$ К (при тех же фоновых значениях $T_{e,0} \approx 1200 - 1800$ К). Наблюдалась сильная фокусировка ИВО, и максимальные возмущения T_e были сосредоточены в узкой области шириной $\sim 6 - 8^\circ$, центрированной

относительно направления магнитного поля. В основе этого явления лежит эффект магнитного зенита, интерпретация которого для ионосферы высоких широт была развита в [5, 6]. Пространственный размер ИВО, в которой возмущения температур электронов на 50 % превышают фоновые значения ($T_e/T_{e0} = 1.5$), достигал больших размеров и был соизмерим с шириной диаграммы направленности антенны КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating в Тромсе (~ 12 - 14°). В соответствии с угловыми (в градусах) и горизонтальными (в км) размерами ИВО при вертикальном излучении ВН на высоте 200 км угловой размер 28° соответствует ~ 100 км, а при излучении в магнитный зенит угловой размер 16° соответствует ~70 км. По данным измерений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми (рис. 5) размер области мелкомасштабных ионосферных искусственных неоднородностей (МИИН) в северо-южном направлении составляет ~ 150 - 180 км. При этом наиболее интенсивные МИИН расположены в южной части ИВО и сосредоточены в области протяженностью порядка 90 км. Горизонтальные размеры области МИИН в восточно-западном направлении (рис. 6) достигают 120 км, а область наиболее интенсивных МИИН занимает протяженность ~60 - 75 км. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что горизонтальные размеры области МИИН существенно превышают горизонтальный размер ИВО, в которой возмущения температур электронов на 50 % превышают фоновые значения ($T_e/T_{e0} = 1.5$), а также размер ИВО, определяемый по ширине диаграммы антенны КВ нагревного комплекса. Следует также отметить, что размер области МИИН в северо-южном направлении (вдоль магнитного поля) превышает размер в восточно-западном направлении ~ в 1.3 - 1.5 раза.

Заключение

Впервые с высоким пространственным разрешением детально исследована пространственная структура распределения возмущений температуры электронов в искусственно возмущенной F-области ионосферы (ИВО). Показано, что размеры ИВО существенно зависят от угла излучения мощной КВ радиоволны относительно направления магнитного поля Земли. При излучении волны накачки

вертикально вверх ($\Theta = 90^\circ$) максимальные возмущения температур электронов равномерно распределены внутри области шириной порядка ~ 24-32° (с учетом симметричности относительно направления 90°). При излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) возмущения температур электронов достигали существенно более высоких значений ($T_{e_{max}} = 4100 - 5800$ К). Однако в этих условиях наблюдается сильная фокусировка ИВО, и максимальные возмущения T_e сосредоточены в узкой области шириной ~ 6 - 8°, центрированной относительно направления магнитного поля. По данным измерений с помощью радаров CUTLASS получены сведения о пространственном размере области МИИН. В северо-южном направлении размер области, где возбуждаются МИИН, составляет ~ 150 - 180 км, а в восточно-западном - ~60 - 75 км.

Список литературы

1. Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. – С. Петербург: Гидрометеоиздат, 2001. –287с.
2. Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N. F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence // J. Geophys. Res. – 2003 – Vol.108 (A4), 1141, doi:10.1029/2002JAA009543.
3. Rietveld, M. T., Kohl, H., Kopka, H., and Stubbe, P.: Introduction to ionospheric heating at Tromsø – I. Experimental overview, J. Atmos. Terr. Phys., 55, 577–599, 1993.
4. Greenwald, R.A., Baker, K.B., Dudeney, J.R., et al.: DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection, Space Sci.Rev., 71, 761–796, 1995.
5. Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C., Pedersen T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications. //Phys. Lett. A. 305. P.264-274. (2002).
6. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. //Успехи физических наук, 2007. Т.177.С.1145