

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН НА ВЫСОКОШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

д-р физ.-мат. наук Н.Ф.БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, nataly@aari.ru

Представлены результаты комплексных экспериментов по воздействию мощных КВ радиоволн на высокоширотную ионосферу, выполненных специалистами ААНИИ в 2009 г. (эпоха минимума солнечной активности) с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT. Проведено исследование пространственной структуры искусственно возмущенной F-области ионосферы (ИВО). Детально изучены явления, происходящие в искусственно модифицированной F-области ионосферы, при нагреве на частотах вблизи частоты третьей гармоники гирочастоты электронов. Впервые обнаружено возбуждение интенсивных мелкокомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) при нагреве F-области ионосферы мощной КВ радиоволной X-поляризации в условиях нагрева на критической частоте необыкновенной волны. В вечерние часы при непрерывном нагреве высокоширотной F-области ионосферы мощной КВ радиоволной O-поляризации обнаружено явление выноса ионов, сопровождавшееся сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км. Одновременное возрастание плотности ионов O⁺ было зарегистрировано на спутнике DMSP F15 на высоте порядка 850 км.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, модификация, искусственное радиоизлучение ионосферы, мелкокомасштабные искусственные ионосферные неоднородности.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие резко возрос интерес к проблеме модификации высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами как в сугубо научном, так и прикладных аспектах. В значительной степени это вызвано завершением строительства супермощного КВ нагревного комплекса в Гаконе на Аляске, США (проект HAARP), на котором развернуты ширококомасштабные научные и прикладные исследования явлений, инициированных взаимодействием мощных КВ радиоволн с высокоширотной ионосферной плазмой. В 2004 г. Великобритания построила на арх. Шпицберген КВ нагревной комплекс (SPEAR), который является единственным нагревным комплексом в мире, расположенным в полярной шапке. В сентябре 2009 г. завершена полная модернизация КВ нагревного комплекса в Аресибо (Пуэрто-Рико, США). Наиболее совершенными в техническом отношении (высокая эффективная мощность излучения, широкий диапазон частот нагрева, возможность излучения в различных режимах, включая непрерывное, импульсное и амплитудно-модулированное с частотой модуляции в ОНЧ-СНЧ диапазонах, автоматическое управление работой нагревного стенда, возможность сканирования диаграммы направленности и т.д.) являются супермощные нагревные комплексы HAARP на Аляске и EISCAT/Heating в Тромсё. Несомненным достоинством зарубежных КВ нагревных комплексов является их пространственное совмещение с

радары некогерентного рассеяния (НР) радиоволн. Использование радаров НР в нагревных экспериментах представляется исключительно важным при исследованиях эффектов модификации высокоширотной ионосферы.

Учитывая, что Россия не располагает аналогичными высокоэффективными техническими средствами в высоких широтах и вряд ли сможет их построить в обозримом будущем, в конце 2008 г. было заключено Соглашение между Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) и Европейской научной ассоциацией EISCAT (European incoherent scatter — Европейские радары некогерентного рассеяния). В рамках этого Соглашения специалисты ААНИИ получили право на проведение экспериментов с использованием всех технических средств Европейской Ассоциации EISCAT, не имеющих аналогов в России как по своим техническим параметрам, так и по географическому расположению (КВ нагревной комплекс EISCAT/HEATING в г. Тромсё, Норвегия и система высокоширотных радаров некогерентного рассеяния радиоволн в северной Скандинавии и арх. Шпицберген).

При воздействии мощным КВ радиоизлучением на ионосферную плазму наблюдается развитие широкого комплекса явлений. К основным из них следует отнести развитие в плазме параметрических (стрикционной и тепловой) неустойчивостей вблизи уровня отражения мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации (О-поляризация), вызывающих генерацию интенсивных плазменных колебаний, повышение температуры электронов, возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей ($f_{\perp} < 30$ м), искусственного радиоизлучения (ИРИ), ускорение электронов фоновой плазмы до сверхтепловых скоростей, что в свою очередь приводит к искусственному оптическому излучению из возмущенной области ионосферы и искусственной ионизации плазмы. Необходимо отметить, что 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. Следует иметь в виду, что эффективность воздействия мощных КВ радиоволн на ионосферу в существенной степени зависит от фоновых геофизических условий. Поэтому для исследования эффектов модификации высокоширотной ионосферы необходима диагностика фонового состояния ионосферы и магнитного поля Земли.

В данной статье представлены результаты комплексных экспериментов по воздействию мощных КВ радиоволн на высокоширотную ионосферу, выполненных специалистами ААНИИ в 2009 г. с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT. В рамках экспериментов решались следующие научные задачи:

- исследование пространственной структуры искусственно возмущенной области ионосферы (ИВО) при излучении мощной КВ радиоволны в магнитный зенит и в вертикальном направлении;
- комплексное изучение поведения и свойств мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) и параметров искусственно возмущенной ионосферной плазмы в F-области ионосферы (по данным радара некогерентного рассеяния в Тромсё) при нагреве ионосферы на частотах вблизи третьей гармоники гирочастоты электронов;
- возбуждение МИИН при нагреве ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации (X-мода);
- исследование возможности выноса потоков ионов из ионосферы в магнитосферу, инициированного воздействием мощных КВ радиоволн по данным ко-

ординированных наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн и на спутнике DMSP;

— изучение электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ радиоизлучением комплекса EISCAT/HEATING, по данным наблюдений на спутнике DEMETER.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН НА ВЫСОКОШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ

2.1. Описание экспериментов и методы исследований

В 2009 г. было выполнено две серии экспериментов: с 3 по 12 марта и с 29 октября по 6 ноября. При проведении экспериментов модификация высокоширотной ионосферы осуществлялась с помощью КВ нагревного комплекса EISCAT/HEATING (69,6° с.ш., 19,2° в.д., $L = 6,2$, $I = 78$). В период экспериментов эффективная мощность излучения составляла 190–210 МВт, частота нагрева изменялась от 3,9 до 4,9 МГц. В основном излучение мощной КВ радиоволны осуществлялось на О-моду поляризации циклами 2 мин нагрев/2 мин пауза, 4 мин нагрев/4 мин пауза, 5 мин нагрев/5 мин пауза, 10 мин нагрев/5 мин пауза, 10 мин нагрев/10 мин пауза. Нагрев ионосферы под пролеты спутников DMSP и DEMETER осуществлялся в режиме непрерывного излучения в течение 20–30 мин при использовании как О-, так и Х-моды поляризации (с модуляцией 1178 или 3 Гц). В большинстве экспериментов мощная КВ радиоволна излучалась в магнитный зенит (диаграмма направленности антенны нагревного комплекса была наклонена на 12 градусов от вертикали на юг). В высоких широтах при излучении в магнитный зенит наблюдаются наиболее сильные возмущения ионосферной плазмы [Благовещенская, 2001; Rietveld et al., 2003; Гуревич, 2007]. В ряде экспериментов проводилось излучение мощной КВ радиоволны вертикально вверх с целью сравнения эффектов воздействия мощных КВ радиоволн при вертикальном излучении и при излучении волны в магнитный зенит.

Эффективность исследований процессов модификации ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами определяется не только техническими характеристиками КВ нагревных комплексов, но и в значительной степени использованием разнообразных и высокоэффективных средств диагностики. В экспериментах, выполненных в марте и октябре–ноябре 2009 г., использовались следующие методы и средства для диагностики явлений, инициированных воздействием мощных КВ радиоволн на высокоширотную ионосферу:

— радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц вблизи Тромсё, обеспечивающий проведение измерений с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте 3 км;

— система КВ радаров CUTLASS (SUPERDARN) в Финляндии и Исландии;

— приемник и спектроанализатор для регистрации ИРИ (искусственного радиоизлучения ионосферы) в Тромсё;

— ионозонд в Тромсё, обеспечивающий получение ионограмм вертикального зондирования 1 раз в 4 минуты;

— средства дистанционной диагностики на обсерватории ААНИИ «Горьковская» под Санкт-Петербургом, включая многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс для регистрации диагностических сигналов методом ракурсного рассеяния и приемный комплекс для контроля за излучением нагревного стенда в Тромсё.

На рис. 1 показана карта-схема, поясняющая геометрию расположения нагревного стенда EISCAT/HEATING, а также диагностических средств наблюдений, использованных в экспериментах.

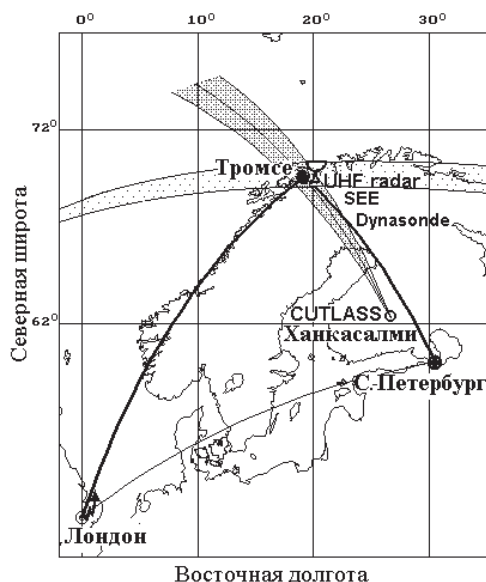


Рис. 1. Карта-схема, поясняющая геометрию расположения нагревного стенда EISCAT/HEATING, а также диагностических средств наблюдений, использованных в экспериментах

2.2. Пространственная структура искусственно возмущенной области ионосферы

Сведения о размере и пространственной структуре искусственно возмущенной области ионосферы (ИВО) являются чрезвычайно важными и необходимыми как для научных исследований, так и для планирования нагревных экспериментов в различных геофизических условиях. Горизонтальный размер ИВО приближенно оценивается шириной главного лепестка диаграммы направленности антенной системы КВ нагревного комплекса и зависит от высоты расположения ИВО. Для КВ нагревного комплекса EISCAT/HEATING при применении фазированной антенной решетки № 2, использованной во всех экспериментах ААНИИ в 2009 г., и всех 12-ти передатчиков формируется апертура шириной порядка $\sim 12\text{--}14^\circ$ в зависимости от частоты излучения мощной КВ радиоволны. В реальных условиях высокоширотной ионосферы размер ИВО существенно зависит от угла излучения мощной КВ радиоволны относительно направления магнитного поля Земли. В [Благовещенская, 2001; Rietveld et al., 2003] по данным радара некогерентного рассеяния (НР) в Тромсё 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 Тромсё. Зависимости возмущений электронных температур от направления излучения волны накачки дают представление о пространственном распределении возмущений в ИВО. В то время как вертикальный нагрев ионосферной плазмы приводит к равномерному повышению температур в пятне нагрева, накачка мощной КВ радиоволны вдоль направления магнитного поля приводит к фокусировке нагретой области. Пред-

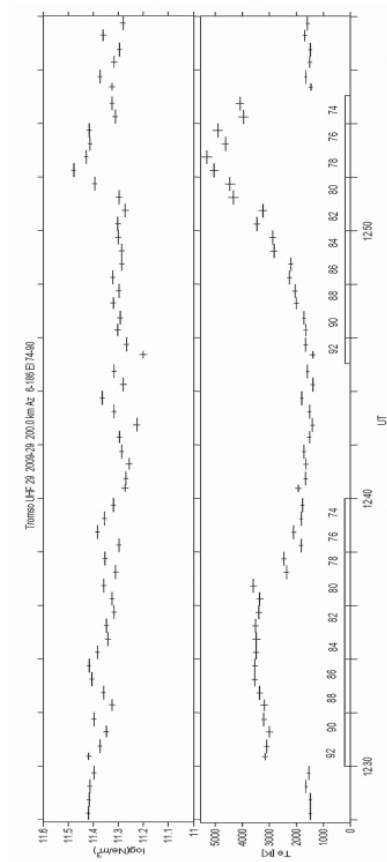


Рис. 2. Временные вариации логарифма электронной концентрации $\log N_e$ и температуры электронов T_e на фиксированной высоте 200 км по данным измерений СВЧ радара 29 октября 2009 г. с 12.28 до 12.58 UT. Рисунок выполнен с помощью программных средств Европейской научной ассоциации EISCAT

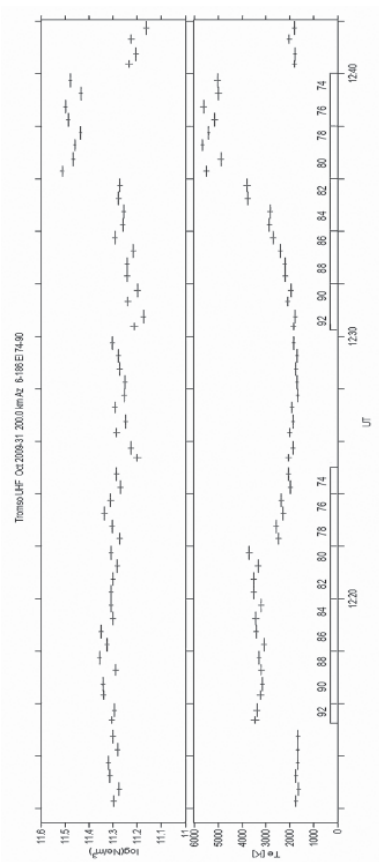


Рис. 3. Временные вариации логарифма электронной концентрации $\log N_e$ и температуры электронов T_e на фиксированной высоте 200 км по данным измерений СВЧ радара 31 октября 2009 г. с 12.08 до 12.38 UT. Рисунок выполнен с помощью программных средств Европейской научной ассоциации EISCAT

ставляет несомненный интерес исследовать структуру ИВО при ее сканировании с помощью радара НР с шагом по углам возвышения не 6° , как это было сделано в [Благовещенская, 2001; Rietveld et al., 2003], а существенно меньшим, что позволит детально и с высокой точностью исследовать пространственную структуру искусственно возмущенной области ионосферы.

В октябре–ноябре 2009 г. в Тромсё специалисты ААНИИ выполнили серию экспериментов по сканированию ИВО радаром НР с шагом 2° по углам возвышения. Исследования тонкой структуры ИВО проводились как при нагреве вертикально вверх, так и при нагреве в магнитный зенит. Эксперименты по сканированию искусственно возмущенной области ионосферы выполнялись 29 и 31 октября, а также 5 ноября 2009 г. В этих экспериментах излучение мощной КВ радиоволны O -поляризации производилось на одной из частот нагрева (4912,8; 4544 или 4040 кГц) в вертикальном или в направлении магнитного зенита 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 190–210 МВт. Для каждого из двух фиксированных углов излучения мощной КВ радиоволны с помощью радара НР в течение 10-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 мин.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены данные измерений параметров ионосферной плазмы (электронной плотности N_e и температуры электронов T_e) при сканировании ИВО в диапазоне углов от 92 до 74° с помощью радара НР 29 и 31 октября 2009 г. соответственно. Приведены данные, полученные на фиксированной высоте 200 км вблизи высоты отражения мощной КВ радиоволны от слоя F2. В анализируемый период времени 29 октября мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 4912,8 кГц с 12.30 до 12.40 UT в вертикальном направлении ($\Theta = 90^\circ$), а с 12.45 до 12.55 UT – в направлении магнитного поля (магнитный зенит, $\Theta = 78^\circ$). 31 октября волна накачки 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.

Анализ данных, приведенных на рис. 2 и 3, позволяет выделить следующие характерные особенности в распределении возмущений внутри ИВО при углах излучения мощной КВ радиоволны $\Theta = 90^\circ$ и 78° . Во-первых, максимальные возмущения T_e существенно больше при нагреве в магнитный зенит ($T_{e_{max}} = 5400 - 5700$ К) по сравнению с вертикальным нагревом ($T_{e_{max}} = 3400 - 3600$ К) при одних и тех же фоновых значениях T_e в паузах между нагревными циклами порядка $T_{e_0} \approx 1500 - 1800$ К. Из рис. 2 и 3 также следует, что при вертикальном нагреве ($\Theta = 90^\circ$) максимальные возмущения температуры электронов T_e (см. нижнюю панель) равномерно распределены в широком диапазоне углов сканирования от 92 до 80° . Излучение мощной КВ радиоволны в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) приводит к фокусировке нагретой области относительно направления магнитного поля, и максимальные возмущения T_e сосредоточены в узком диапазоне углов сканирования от 80 до 74° . Рассмотрение поведения вариаций электронной плотности N_e по данным радара НР (см. верхнюю панель на рис. 2 и 3) показывает, что при излучении мощной КВ радиоволны в магнитный зенит ($\Theta = 78^\circ$) в узком диапазоне углов от 80 до 74° отмечалось локальное возрастание электронной концентрации. В рассматриваемых условиях по данным измерений радаром НР в спектрах сигналов регистрировались усиленные нагревом ионные и плазменные линии (heater-enhanced ion and plasma lines), что является указанием на возбуждение сильной Лэнгмюровской турбулентности.

В области сильной Лэнгмюровской турбулентности вблизи уровня отражения мощной КВ радиоволны происходит ускорение электронов до энергий, способных вызвать повышение ионизации.

Анализ всего объема полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующее заключение о пространственной структуре искусственно возмущенной области ионосферы. При излучении волны накачки вертикально вверх ($\Theta = 90^\circ$) максимальные возмущения температур электронов достигали значений $Te_{max} = 3200 - 4000$ К (при фоновых значениях в паузах между нагревными циклами $Te_0 \approx 1200 - 1800$ К). При этом максимальные возмущения Te равномерно распределены внутри области шириной порядка $\sim 20-24^\circ$ с учетом симметричности диаграммы направленности антенны нагревного комплекса относительно направления $\Theta = 90^\circ$. Пространственный размер области с возмущениями температур электронов, превышающих фоновые значения на 50 % ($Te/Te_0 = 1,5$), достигает больших размеров и составляет $24-32^\circ$. Таким образом, при вертикальном излучении волны накачки фактический пространственный размер ИВО по горизонтали существенно превышает размер области возмущения, определяемый шириной диаграммы направленности антенны ($\sim 12-14^\circ$).

Совсем иная ситуация имеет место при излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$). Здесь возмущения температур электронов достигали существенно более высоких значений $Te_{max} = 4100 - 5800$ К (при тех же фоновых значениях $Te_0 \approx 1200 - 1800$ К). Однако в этих условиях наблюдается сильная фокусировка ИВО, и максимальные возмущения Te сосредоточены в узкой области шириной $\sim 6-8^\circ$, центрированной относительно направления магнитного поля. Пространственный размер ИВО, в которой возмущения температур электронов на 50 % превышают фоновые значения ($Te/Te_0 = 1,5$), достигает больших размеров и соизмерим с шириной диаграммы направленности антенны КВ нагревного комплекса EISCAT/HEATING в Тромсё ($\sim 12-14^\circ$).

2.3. Явления в искусственно возмущенной F-области высокоширотной ионосферы при нагреве на частотах вблизи третьей гармоники гирочастоты электронов

При определенных частотах мощной КВ радиоволны f_H в ионосфере могут быть реализованы одновременно два резонансных эффекта. Первый — это обычный резонанс между f_H и верхнегибридной (ВГ) частотой f_{UH} . Второй резонанс — это резонанс с частотой, кратной частоте гироманитного вращения электронов: $f_H = n f_{ce}$. Таким образом, двойной резонанс возникает в тех областях ионосферы, где выполняется условие $f_H = n f_{ce} = f_{UH}$. Вблизи двойного резонанса происходят очень сильные изменения всех явлений, возникающих в области ВГ-резонанса при воздействии мощной волны на ионосферу: подавление генерации верхнегибридной плазменной турбулентности и уменьшение интенсивности мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (МИИН), вплоть до их полного исчезновения, полная трансформация спектра искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) и т.п. Это объясняется появлением так называемых бернштейновских мод, связанных с гироманитным вращением электронов вокруг направления магнитного поля. Общая ширина частотного диапазона, в котором происходят сильные искажения эффектов модификации, составляет около 2–3 % от частоты резонанса, т.е. 100–200 кГц [Гуревич, 2007]. Важно отметить сильную зависимость наблюдаемых явлений вблизи гирорезонанса от номера гирогармоники n . В ряде экспериментов для разных n могут наблюдаться различные эффекты относительно частоты гирогармоники электронов. В настоящее время отсутствуют систематические и комплексные исследования различных характеристик плазменной турбулентности в зависимости от отстройки по частоте δf относительно частоты гирорезонанса, выполненных при различных номерах гармоник.

Одной из научных задач экспериментов ААНИИ в марте 2009 г. на высокоширотном КВ нагревном комплексе в г. Тромсё являлось исследование явлений в искусственно модифицированной ионосферной плазме в области двойного резонанса, когда частота нагрева близка частоте третьей гармоники гирочастоты электронов, $f_H = 3f_{ce} = f_{UH}$. Изучение явлений вблизи двойного резонанса производилось по данным комплексных наблюдений на основе использования самых разнообразных современных средств диагностики, расположенных как непосредственно вблизи нагревного комплекса (радар некогерентного рассеяния радиоволн, специальный приемный комплекс для регистрации ИРИ, ионозонд), так и дистанционных средств наблюдений, включая систему КВ радаров CUTLASS и многоканальный КВ доплеровский комплекс вблизи Санкт-Петербурга в режиме ракурсного рассеяния. Для реализации поставленной задачи был выбран особый режим работы КВ нагревного комплекса EISCAT/HEATING, обеспечивающий ступенчатое изменение частоты нагрева на 5–10 кГц (в диапазоне частот от 3,9 до 4,2 МГц) в каждом 2-минутном цикле нагрева, что обеспечило получение детальной информации об явлениях в ионосферной плазме как вблизи гирорезонанса, так и в диапазоне частот выше ($f_H > 3f_{ce}$) и ниже ($f_H < 3f_{ce}$) частоты третьей гармоники гирорезонанса.

Дата	Время, UT	f_H , кГц	h_{refl} , км	foF2, кГц
6 марта 2009 г.	12.40–12.42	4100	185	4200
6 марта 2009 г.	14.12–14.28	4090–4050	200	4150
7 марта 2009 г.	13.12–13.14	4100	185	4500
9 марта 2009 г.	13.12–13.14	4100	185	4500
9 марта 2009 г.	15.00–15.02	4100	185	4050
10 марта 2009 г.	14.00–14.02	4100	185	4400
11 марта 2009 г.	16.20–16.30	4040	220	4070–3900

В таблице приведены времена прохождения частоты нагрева через третью гармонику гирорезонанса, значения частоты нагрева и высоты ее отражения от слоя F2 ионосферы, а также значения критических частот для различных дней экспериментов, выполненных в марте 2009 г. Времена прохождения частоты нагрева через гирорезонанс идентифицировались по исчезновению DM компоненты в спектре ИРИ (downshifted maximum [Leyser, 2001] – дополнительный максимум

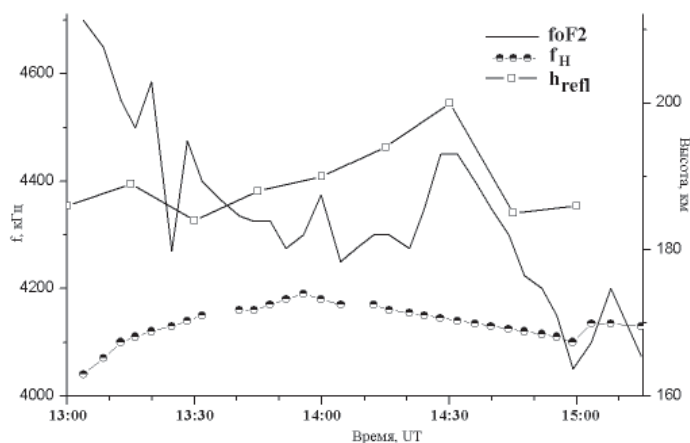


Рис. 4. Вариации во времени частоты нагрева (f_H), высоты отражения мощной КВ радиоволны от ионосферы (h_{refl}), а также критической частоты слоя F2 (foF2) в период проведения эксперимента по модификации ионосферы в Тромсё 9 марта 2009 г. с 13 до 15.15 UT

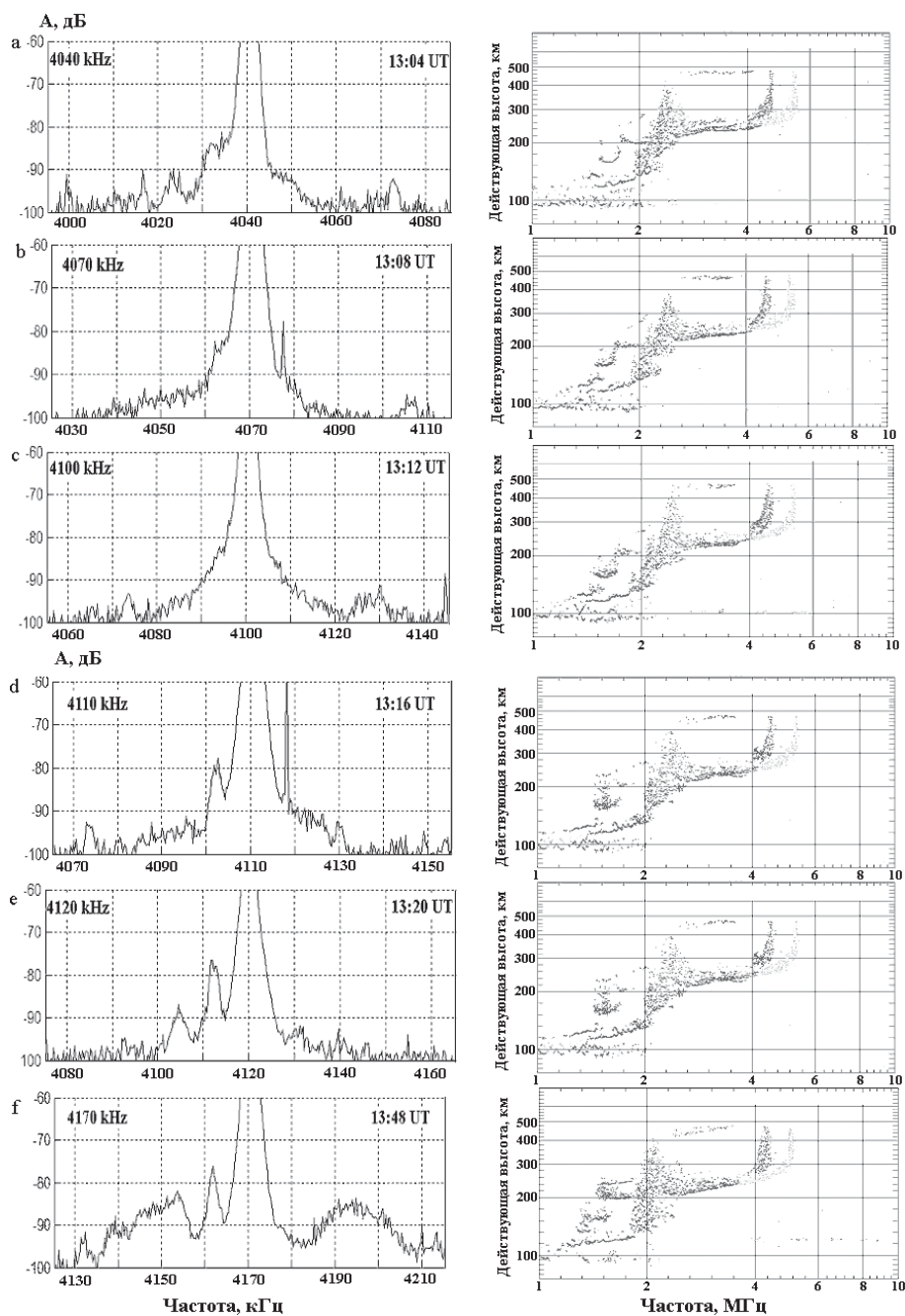


Рис. 6. Спектры искусственного радиоизлучения ионосферы (слева) и соответствующие им по времени ионограммы ВЗ (справа), измеренные в Тромсё 9 марта 2009 г., при ступенчатом изменении частоты нагрева в различные интервалы времени: a – 13.04 UT; b – 13.08 UT; c – 13.12 UT; d – 13.16 UT; e – 13.20 UT; f – 13.48 UT

в спектре ИРИ, сдвинутый вниз по частоте на величину 8–10 кГц относительно частоты нагрева) и ослаблению (или полному исчезновению) мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН).

В качестве типичного примера рассмотрим поведение параметров ионосферной плазмы при нагреве вблизи частоты третьей гармоники гирорезонанса 9 марта 2009 г. На рис. 4 показаны вариации частот нагрева, высоты отражения мощной КВ радиоволны от ионосферы, а также критической частоты слоя F2 в период проведения эксперимента 9 марта 2009 г. Рис. 5 цв. вклейки иллюстрирует данные системы радаров CUTLASS, а рис. 6 – спектры ИРИ для того же эксперимента 9 марта 2009 г.

Отметим, что для всех рассмотренных случаев явлений гирорезонанса на частотах нагрева, превышающих частоту третьей гармоники гирочастоты электронов ($f_H > 3f_{ce}$) на 20–40 кГц, наблюдалось возбуждение 2DM компоненты в спектре ИРИ, сопровождаемое усилением МИИН. Интенсивность МИИН достигала максимума при возбуждении BSS компоненты (broad symmetrical structure [Leyser, 2001]) в спектре ИРИ. Возбуждение BSS компоненты отмечалось в диапазоне частот нагрева, превышающих частоту третьей гармоники гирочастоты электронов ($f_H > 3f_{ce}$) на 50–70 кГц. Интересная особенность была обнаружена в поведении МИИН различных масштабов в окрестности гирорезонанса. В период эксперимента оба радара CUTLASS излучали на узконаправленную антенну, ориентированную на Тромсё в стерео-моду, обеспечивающей проведение измерений на трех частотах порядка 10, 13 и 17 МГц, что обеспечивало возможность контроля за МИИН с поперечными к магнитному полю масштабами $l_{\perp} = 8\text{--}15$ м ($l_{\perp} = \lambda/2$, где λ – длина волны излучения радара). По данным измерений радара CUTLASS на трех частотах было обнаружено, что МИИН с поперечными масштабами более 10 м подавляются значительно сильнее, чем с более мелкими масштабами порядка 7 м. Другая особенность заключалась в поведении температуры электронов T_e вблизи гирорезонанса по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн. Значения T_e не только не уменьшались, но в некоторых случаях даже увеличивались.

2.4. Возбуждение МИИН при нагреве ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации (Х-мода)

Одним из основных явлений, обнаруженных в экспериментах по воздействию мощных КВ радиоволн на ионосферную плазму, является возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. Интенсивное мелкомасштабное расслоение ионосферной плазмы на сильно вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности электронной концентрации было обнаружено уже в первых экспериментах по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами [Thorne and Blood, 1974]. Пространственный масштаб МИИН составляет 3–20 м поперек магнитного поля и до 10 км вдоль магнитного поля. В течение трех последних десятилетий проводились интенсивные экспериментальные исследования МИИН на различных КВ нагревных комплексах, таких как «Сура», Аресибо, EISCAT/HEATING, HAARP, SPEAR, расположенных в средних и высоких широтах [см., например, Авдеев и др., 1994; Coster et al., 1985; Noble et al., 1987; Blagoveshchenskaya et al., 1998; 1999; 2006a; 2009]. МИИН вызывают интенсивное рассеяние радиоволн, поэтому для их исследования широко используются методы, основанные на обратном и ракурсном рассеянии диагностических КВ и УКВ сигналов на МИИН. Механизм возбуждения МИИН объясняется в рамках теории тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [Грач и др., 1978; Васильков и Гуревич, 1975]. Следует иметь в виду, что возбуждение указанной неустойчивости в области верхнегибридного резонанса возможно только при отражении мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации (О-мода) от ионосферы. Это обусловлено тем, что области резонанса достигает только обыкновенная волна при вертикальном или близком

к нему распространении. Необыкновенная волна (X -мода) всегда отражается ниже резонанса, поэтому возбуждение МИИН в этом случае принципиально невозможно за счет тепловой (резонансной) неустойчивости.

В экспериментах, выполненных ААНИИ на нагревном комплексе EISCAT/HEATING в ноябре 2009 г., впервые было обнаружено возбуждение интенсивных МИИН при нагреве F -области ионосферы мощной КВ радиоволной с X -модой поляризации. Возбуждение МИИН наблюдалось в экспериментах 3, 4, 5 и 6 ноября 2009 г. по данным наблюдений как с помощью CUTLASS радара в Финляндии, так и методом ракурсного рассеяния на трассе Лондон – Тромсё – Санкт-Петербург.

На рис. 7 цв. вклейки приведены результаты наблюдений с помощью радара CUTLASS в Финляндии на частоте порядка 10 МГц в период нагревного эксперимента в г. Тромсё 6 ноября 2009 г. Данные приведены в координатах дальность (Range gate) – мировое время UT. Отметим, что дальность до Тромсё соответствует 18 «воротам». Как видно из рис. 7 цв. вклейки, сигналы, рассеянные на МИИН, начали регистрироваться с 12.15 UT. Нагрев ионосферы проводился на частоте 4040 кГц циклами 10 мин нагрев / 5 мин пауза. Мощная КВ радиоволна O -поляризации излучалась в магнитный зенит. В нагревном цикле 14.01 – 14.11 UT МИИН происходит существенное ослабление МИИН. В этот период критические частоты слоя F_2 составляли порядка $f_oF_2 \approx 3,5$ МГц, что существенно ниже частоты нагрева. В цикле нагрева 14.16 – 14.26 UT значения f_oF_2 становятся еще ниже (около 3,3 МГц), и рассеянные на МИИН сигналы исчезают полностью. В следующем нагревном цикле 14.31 – 14.41 UT, когда значения f_oF_2 составляли $f_oF_2 \approx 3,2$ МГц, была изменена поляризация мощной КВ радиоволны с O -моды на X -моду. Изменение поляризации привело к возникновению очень интенсивных рассеянных на МИИН сигналов. Характерной особенностью этих МИИН является необычно большое время релаксации, достигающее 10 мин. Аналогичная ситуация наблюдалась и в экспериментах, выполненных 3, 4 и 5 ноября 2010 г.

На рис. 8 цв. вклейки приведены динамические доплеровские спектры диагностических сигналов на частоте порядка 15 МГц на трассе Лондон – Тромсё – Санкт-Петербург, а также сигналов КВ нагревного комплекса на частоте 3950 кГц, принятых в Санкт-Петербурге 5 ноября 2009 г. с 14.03 до 15.00 UT. В первых трех нагревных циклах излучалась мощная КВ радиоволна O -моды, а в цикле 14.50 – 15.00 UT излучение велось на X -моду поляризации. В этом эксперименте также наблюдалось постепенное уменьшение f_oF_2 от 3,7 МГц в 14.00 UT до 3,2 МГц в 14.45 UT. Как видно из рис. 8 цв. вклейки, в нагревном цикле 14.50 – 15.00 UT регистрировались исключительно сильные рассеянные на МИИН сигналы при нагреве мощной КВ радиоволной X -поляризации. Анализ экспериментальных данных показал, что возбуждение интенсивных МИИН при нагреве на X -моду поляризации происходило, когда по данным ионозонда в Тромсё критические частоты обыкновенной волны имели значения порядка $f_oF_2 \approx 3,2\text{--}3,3$ МГц, что существенно ниже частоты нагрева. В то же время значения критической частоты обыкновенной волны составляли порядка $f_xF_2 \approx 4,0\text{--}4,1$ МГц, т.е. нагрев проводился на критической частоте необыкновенной волны, $f_H \approx f_xF_2$. Механизм возбуждения МИИН при нагреве на X -моду не ясен и требует дальнейшего серьезного изучения, как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Однако уже сейчас можно отметить, что возбуждение таких МИИН требует особых условий нагрева, а именно нагрева на частоте $f_H \approx f_xF_2$.

2.5. Вынос потоков ионов из высокоширотной ионосферы в магнитосферу

Вынос потоков ионов из ионосферы является важной проблемой ионосферно-магнитосферного взаимодействия, так как ионосфера является значимым источником магнитосферных ионов. Вынос ионов из ионосферы идентифицируется по

данным радаров некогерентного рассеяния (НР) как возрастание положительных значений ионных скоростей V_i в направлении, параллельном магнитному полю. Возрастание положительных значений V_i до значений, превышающих 100 м/с на высотах выше 300 км, свидетельствует о выносе потоков ионов из высокоширотной F-области ионосферы в магнитосферу. В зависимости от характеристик и условий возникновения ионные потоки из высокоширотной F-области ионосферы естественного происхождения классифицируются на два типа [Wahlund et al., 1992]. Первый тип характеризуется сильными, поперечными к магнитному полю электрическими полями, повышенными значениями температур ионов вследствие Джоулева разогрева, отсутствием (либо незначительным) высыпанием электронов и может быть объяснен в терминах теплового расширения плазмы. Второй тип ионных потоков наблюдается над дугами полярных сияний, характеризуется существенно повышенными значениями температуры электронов и может быть связан с усилением параллельного (магнитному полю) электрического поля. По данным исследований явления выноса ионов из авроральной ионосферы с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) в Тромсё [Wahlund et al., 1992] было установлено, что механизмы ускорения, ответственные за вынос ионов, главным образом реализуются в возмущенных авроральных условиях.

Явление выноса потоков ионов из ионосферы, инициированное воздействием мощных КВ радиоволн на высокоширотную F-область ионосферы, впервые было обнаружено в нагревных экспериментах в Тромсё, выполненных в эпоху солнечной активности, близкой к максимуму [Благовещенская, 2001; Rietveld et al., 2003; Blagoveshchenskaya et al., 2006b; Blagoveshchenskaya et al., 2005]. Обнаруженные ионные потоки, распространяющиеся из ионосферы с высот порядка 350 км параллельно магнитному полю Земли, наблюдались как при спокойных, так и сильно возмущенных магнитных условиях и обладали характеристиками как первого, так и второго типа ионных потоков естественного происхождения.

Результаты наблюдений с помощью радара НР в период экспериментов, выполненных ААНИИ в марте 2009 г., позволили обнаружить явление выноса потока ионов из ионосферы, инициированное воздействием мощных КВ радиоволн на высокоширотную ионосферу, в эпоху глубокого минимума солнечной активности. Вынос потоков ионов из F-области высокоширотной ионосферы наблюдался 11 и 12 марта 2009 г. На рис. 9 цв. вклейки представлены данные радара НР в период проведения нагревного эксперимента 11 марта 2009 г. В этом эксперименте излучение мощной КВ радиоволны O-поляризации производилось на частоте 4040 кГц в направлении магнитного зенита циклами, в основном 10 мин нагрев/10 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла 190 МВт. Результаты эксперимента, выполненного при абсолютно спокойных фоновых геофизических условиях, свидетельствуют, что вынос ионов (возрастание положительных значений V_i , см. четвертую панель сверху на рис. 9 цв. вклейки) происходил с 14 до 17 UT и сопровождался экстремально сильным возрастанием температуры электронов (200–300 %) и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км (см. вторую панель сверху на рис. 9 цв. вклейки). Наиболее интенсивный вынос ионов происходил при нагреве на частотах вблизи критической частоты слоя F2, $f_H \approx f_oF2$. Такие условия были реализованы 11 марта 2009 г. в нагревном цикле 16.20 – 16.30 UT. По экспериментальным данным было также установлено, что вынос ионов возможен при нагреве на частотах, превышающих f_oF2 на величину до 0,5 МГц, что наблюдалось 11 марта в цикле 16.40 – 16.50 UT.

11 марта 2009 г. с 15.20 до 15.40 UT был выполнен эксперимент DMSP – Тромсё. Минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и осью возмущенной маг-

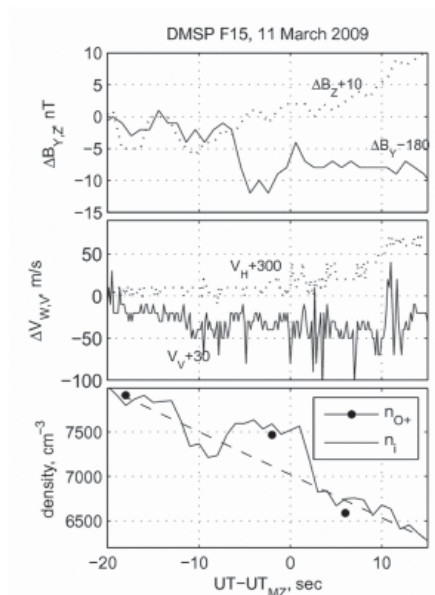


Рис. 10. Результаты измерений на спутнике DMSP F15 на высоте 870 км при пролете над Тромсё 11 марта 2009 г. в 15.26.30 UT в период эксперимента на КВ нагревном комплексе EISCAT/HEATING. На рисунке показаны вариации возмущений в магнитном поле (B), скорости (V) и плотности ионов (density). Нулевое время относится к моменту максимального приближения спутника к центру искусственно возмущенной области ионосферы

нитной трубки составляло 42 км в $T_0 = 15.26.30$ UT. В период эксперимента проводились измерения с помощью радара HP, системы радаров CUTLASS, а также регистрация искусственного радиоизлучения ионосферы в Тромсё (см. геометрию наземных наблюдений на рис. 1).

Результаты наблюдений с помощью радара HP в период пролета американского спутника DMSP F15 над Тромсё позволили идентифицировать явление выноса потока ионов (на этих высотах преобладают ионы O^+), инициированного воздействием мощных КВ радиоволн, сопровождавшегося экстремально сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км. На рис. 10 показаны результаты измерений на спутнике DMSP F15 на высоте 870 км при пролете над Тромсё в период эксперимента 11 марта 2009 г., которые убедительно свидетельствуют о повышении плотности ионов O^+ в период нагрева ионосферы (см. нижнюю панель на рис. 10).

Суммируя результаты измерений, полученные на спутнике DMSP F15 в период проведения нагревного эксперимента на комплексе в Тромсё в вечерние часы 11 марта 2009 г., можно сделать следующее заключение. На спутнике DMSP F15 уверенно зарегистрировано возрастание плотности ионов O^+ . Одновременные измерения с помощью радара HP в Тромсё свидетельствуют о выносе потока ионов, инициированном воздействием мощных КВ радиоволн, из высокоширотной F-области ионосферы в магнитосферу. На этих высотах преобладают ионы O^+ . Отметим, что вынос ионов сопровождался экстремально сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км. Вынос потоков ионов, регистрируемый с помощью радара некогерентного рассеяния в Тромсё, и возрастание плотности ионов O^+ по данным измерений на спутнике DMSP F15 наблюдались в вечерние часы при непре-

рывном нагреве F-области ионосферы мощной КВ радиоволной О-поляризации при абсолютно спокойных фоновых геофизических условиях.

2.6. Электромагнитные возмущения, индуцируемые во внешней ионосфере Земли мощным КВ радиоизлучением высокоширотного нагревного комплекса EISCAT/HEATING

Изучение процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия и возможностей воздействия на них с помощью существующих КВ нагревных комплексов является важной задачей как для научных, так и прикладных исследований. Высокоширотная ионосфера наиболее тесным образом связана с магнитосферой, отражая протекающие в ней процессы. Поэтому проводимые исследования явлений, связанных с выпадениями энергичных частиц, существованием интенсивных электрических полей и токов магнитосферного происхождения, авроральными суббурями и др., вызывают повышенный научный и практический интерес [Благовещенская, 2001]. Особый интерес вызывает возможность активного волнового воздействия на указанные процессы. Механизм такого воздействия связан либо с формированием во внешней ионосфере искусственных волновых каналов (дактов плотности плазмы), либо с усилением естественных каналов, либо с образованием локальных токовых систем при воздействии мощным КВ радиоизлучением, либо с инжекцией искусственно генерируемых КНЧ излучений во внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли, которые способны взаимодействовать с энергичными частицами ее радиационных поясов [Fejer et al., 1991].

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований характеристик плазменной турбулентности, возбуждаемой на высоте 660 км излучением высокоширотного нагревного стенда EISCAT (Тромсё). Характеристики искусственных плазменных возмущений измерялись с помощью бортовой аппаратуры французского микро ИСЗ DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions). Высокая оснащенность спутника чувствительной аппаратурой позволяет решать многочисленные задачи, связанные с изучением процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия и механизмов распространения плазменных возмущений различной природы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Важно отметить, что измерения на ИСЗ DEMETER выполнялись в режиме Burst mode, когда они проводятся при наиболее полном использовании имеющихся средств диагностики, а регистрирующая аппаратура работает с максимальной скоростью оцифровки данных.

Рассмотрим результаты эксперимента 3 марта 2009 г. по модификации высокоширотной E-области ионосферы. Мощная модулированная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода) излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 4040 кГц с эффективной мощностью излучения ~ 190 МВт. Частота модуляции составляла 1178 Гц; глубина модуляции – 100 %. Время излучения мощной модулированной волны было согласовано по времени с пролетом ИСЗ DEMETER через магнитную силовую трубку, опирающуюся на возмущенную область ионосферы. При проведении эксперимента 3 марта 2009 г. мощная волна излучалась с 18.59 до 19.21 UT. Минимальное расстояние между орбитой ИСЗ и осью возмущенной магнитной трубки составляло 2 км в $T_0 = 19.17$ UT. Нагрев начался за 18 мин до времени T_0 . ИСЗ двигался с юга на север.

Анализ геофизической обстановки показал, что эксперимент проводился при очень низкой солнечной активности – относительное число солнечных пятен (число Вольфа) составляло $W = 0$. Магнитное поле Земли было слабо возмущенным. Планетарный индекс геомагнитной активности Kp имел значение $Kp = 3^-$. По данным AE, AU и AL индексов усиление авроральной активности наблюдалось с 15 до 23 UT. В этот период регистрировалась серия авроральных суббурь

небольшой и средней интенсивности. Период максимального сближения орбиты ИСЗ с осью возмущенной магнитной трубки совпадал по времени с максимумом авроральной суббури небольшой интенсивности (порядка 250 нТ), которая началась около 18 UT и закончилась в 20 UT.

Характерной особенностью состояния ионосферы в этот период, по данным вертикального зондирования в Тромсё, явилось наличие очень интенсивного диффузного спорадического E-слоя с кратными отражениями. Критические частоты Es-слоя лежали в диапазоне от 3,6 до 5,6 МГц. На рис. 11 цв. вклейки показаны ионограммы вертикального зондирования ионосферы, полученные в Тромсё в период эксперимента 3 марта 2009 г. в 19.12 и 19.18 UT.

Рис. 12 цв. вклейки демонстрирует спектрограмму интенсивности поперечной к направлению геомагнитного поля компоненты электрического поля $E_x(t)$, зарегистрированную детектором электрического поля (ICE) ИСЗ DEMETER. КНЧ излучение на частоте модуляции мощной КВ радиоволны 1178 Гц уверенно обнаруживается с ~19.16.42 до ~19.17.30 UT, т.е. на протяжении ~330 км вдоль орбиты ИСЗ. Область его наиболее высокой интенсивности соответствует интервалу времени 19.16.45 – 19.17.10 UT, что приблизительно симметрично относительно центра возмущенной магнитной трубки. Максимальная интенсивность КНЧ излучения на частоте 1178 Гц регистрировалась в ~19.16.45 UT (т.е. за 15 с до прохождения ИСЗ центра трубки или в ~100 км к югу от него). На интервале времени 19.16.48 – 19.16.58 UT наблюдалось также увеличение интенсивности шумов в диапазоне ~800–1200 Гц, хотя нельзя исключать, что оно носило естественный характер. Таким образом, под действием модулированного излучения мощной КВ радиоволны возникала модуляция ионосферной проводимости в облучаемой области аврорального электроджета на частоте модуляции. Как следствие этого появлялся нелинейный переменный ток, который являлся искусственным ионосферным источником низкочастотного радиоизлучения. Из представленной на рис. 12 цв. вклейки спектрограммы хорошо видно появление искусственного КНЧ радиоизлучения.

Суммируя результаты измерений, полученные на спутнике DEMETER в период проведения нагревного эксперимента на комплексе в Тромсё 3 марта 2009 г., можно сделать следующее заключение. Регистрация на спутнике DEMETER излучения на частоте модуляции мощной КВ радиоволны (1178 Гц), генерирующегося в результате ее демодуляции в ионосфере (эффект Гетманцева), является неоспоримым экспериментальным фактом. Излучение регистрировалось в вечерние часы во время авроральной суббури небольшой интенсивности, когда в ионосфере над Тромсё наблюдался интенсивный диффузный спорадический E-слой. Выполненные измерения позволили четко определить границы возможной области детектирования модулированной мощной КВ радиоволны на высоте орбиты ИСЗ, что, вместе с ранее полученными в Тромсё экспериментальными данными, дает необходимый экспериментальный материал для развития модели генерации КНЧ излучения и его распространения во внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли.

2.7. Заключение

По данным комплексных экспериментов по модификации высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением, выполненных специалистами ААНИИ в марте и октябре–ноябре 2009 г. (эпоха минимума солнечной активности) с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT, получены следующие основные результаты.

Исследована пространственная структура искусственно возмущенной области ионосферы. 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 ($Te_{max} = 3200\text{--}4000$ К) равномерно распределены внутри области шириной порядка $\sim 20\text{--}24^\circ$, что существенно превышает размер области возмущения, определяемый шириной диаграммы направленности антенны ($\sim 12\text{--}14^\circ$). При излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного зенита ($\Theta = 78^\circ$) возмущения температур электронов достигали существенно более высоких значений ($Te_{max} = 4100\text{--}5800$ К). Однако в этих условиях наблюдается сильная фокусировка ИВО, и максимальные возмущения Te сосредоточены в узкой области шириной $\sim 6\text{--}8^\circ$, центрированной относительно направления магнитного поля.

Рассмотрены явления, происходящие в искусственно модифицированной F-области ионосферы при нагреве на частотах вблизи частоты третьей гармоники гирочастоты электронов ($f_H = 3f_{ce} = f_{UH}$). По данным комплексных измерений установлено: (1) мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности с более крупными поперечными масштабами ($l_\perp > 10$ м), подавляются в гирорезонансе значительно сильнее, чем с более мелкими масштабами ($l_\perp < 10$ м); (2) вблизи гирорезонанса температура электронов Te увеличивалась; (3) на частотах нагрева, превышающих частоту третьей гармоники гирочастоты электронов ($f_H > 3f_{ce}$) на $20\text{--}40$ кГц, отмечается возбуждение 2DM компоненты в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы, сопровождаемое усилением МИИН; (4) в диапазоне частот нагрева, превышающих частоту третьей гармоники гирочастоты электронов ($f_H > 3f_{ce}$) на $50\text{--}70$ кГц, отмечается генерация BSS-компоненты в спектре ИРИ, а интенсивность МИИН достигает максимума.

Впервые обнаружено возбуждение интенсивных МИИН при нагреве F-области ионосферы мощной КВ радиоволной X-поляризации при нагреве на критической частоте необыкновенной волны, $f_H \approx f_{XF2}$. Механизм возбуждения МИИН при нагреве на X-моду не ясен и требует серьезного изучения, как в экспериментальном, так и в теоретическом плане.

В период проведения нагревного эксперимента 11 марта 2009 г. в Тромсё на спутнике DMSP F15 на высоте порядка 850 км уверенно зарегистрировано возрастание плотности ионов O^+ . Одновременные измерения с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё свидетельствуют об интенсивном выносе потока ионов из высокоширотной F-области ионосферы в магнитосферу, инициированном воздействием мощных КВ радиоволн. Отметим, что вынос ионов сопровождался экстремально сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км.

На спутнике DEMETER в период проведения нагревного эксперимента в Тромсё 3 марта 2009 г. зарегистрировано КНЧ излучение на частоте модуляции (1178 Гц) мощной КВ радиоволны X-поляризации. КНЧ излучение регистрировалось на протяжении 330 км вдоль орбиты ИСЗ. Характерной особенностью состояния ионосферы в этот период по данным вертикального зондирования в Тромсё явилось наличие очень интенсивного диффузного спорадического E-слоя с кратными отражениями.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты выполненных экспериментов по воздействию на ионосферу мощными КВ нагревными комплексами убедительно свидетельствуют об эффективной модификации высокоширотной ионосферы, регулярности и повторяемости наблюдаемых эффектов. К их числу относятся: экстремально сильное возрастание (200–300 %) температуры электронов в широком диапазоне высот от 180 до 500 км, генерация искусственных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, появление различных спектральных компонент в спектре нагревного сигнала (искусственное радиоизлучение ионосферы), искусственная генерация выноса потоков ионов из ионосферы

в магнитосферу, генерация низкочастотного излучения на частоте модуляции мощной КВ радиоволны. Вместе с тем необходимо отметить, что исследования в 2009 г. выполнялись на фоне глубокого минимума солнечной активности. Магнитное поле Земли в этот период времени также было исключительно спокойным. В связи с изложенным представляется крайне необходимым продолжить исследования эффектов модификации высокоширотной ионосферы с использованием КВ нагревного комплекса EISCAT/HEATING и радаров некогерентного рассеяния радиоволн в условиях средней и высокой солнечной активности, а также в периоды магнитных возмущений.

Основное внимание в будущих исследованиях должно быть уделено решению следующих задач:

- детально исследовать эффекты воздействия мощных КВ радиоволн на F-область высокоширотной ионосферы в режиме «супернагрева» (эффективная мощность излучения более 1 ГВт);
- выполнить анализ поведения параметров искусственно возмущенной ионосферной плазмы в зависимости от эффективной мощности излучения КВ нагревного комплекса (эффекты насыщения и гистерезиса);
- продолжить исследования эффектов модификации при нагреве ионосферы мощной КВ радиоволной необыкновенной поляризации (X-мода);
- проанализировать эффекты воздействия мощных КВ радиоволн при нагреве на частоте вблизи четвертой гармоники гирочастоты электронов;
- детально исследовать эффекты воздействия мощных КВ радиоволн на авроральный спорадический E-слой;
- исследовать возможность модификации процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия вследствие контролируемой инжекции мощных КВ радиоволн в ночную авроральную ионосферу;
- продолжить исследования по искусственной генерации низкочастотных излучений в КНЧ – СНЧ диапазонах из искусственно возмущенной области ионосферы.

Авторы выражают благодарность:

- сотрудникам Европейской научной ассоциации EISCAT и д-ру М.Ритвельду за помощь в проведении экспериментов в г. Тромсё (Норвегия), проф. Т.Йоману (Лейстерский университет, Англия) за обеспечение работы и предоставление данных радаров CUTLASS (SuperDARN), д-ру М.Парро за обеспечение режима «burst mode» ИСЗ DEMETER при его пролетах над искусственно возмущенной областью ионосферы над Тромсё, д-ру физ.-мат. наук В.Фролову за обработку и анализ данных спутника DEMETER, д-ру физ.-мат. наук Е.Мишину за обработку и анализ данных спутника DMSP F15;
- сотрудникам отдела геофизики ААНИИ Т.Борисовой, В.Корниенко, А.Калишину, М.Бердниковой, А.Янжуре, И.Москвину, И.Егорову, Д.Рогову за проведение экспериментов на НИС «Горьковская» и обработку полученных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдеев В.Б., Белей В.С., Беленов А.Ф., Галушко В.Г., Ерухимов Л.М., Синицин В.Г., Ямпольский Ю.М. Обзор результатов по рассеянию КВ сигналов на искусственной плазменной турбулентности, полученных при использовании УТР-2 радиотелескопа // Известия вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37. С. 479–492.

Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 287 с.

Васьков В.В., Гуревич А.В. Нелинейная резонансная неустойчивость плазмы в поле обыкновенной электромагнитной волны // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. С. 176–188.

Грач С.М., Караштин А.Н., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Тепловая параметрическая неустойчивость в неоднородной плазме (нелинейная теория) // Физ. плазмы. 1978. Т. 4. С. 1330–1340.

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177 (11). С. 1145–1177.

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T. D., Kornienko V.A., Leyser T.B., Rietveld M.T., Thide B. Artificial field-aligned irregularities in nightside auroral ionosphere // Adv. Space Res. 2006a. Vol. 38. P. 2503–2510.

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kornienko V.A., Kalishin A.S., Robinson T.R., Yeoman T.K., Wright D.M., Baddeley L.J. SPEAR-induced field-aligned irregularities observed from bi-static HF radio scattering in the polar ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. Vol. 71. P. 11–20.

Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T.D., Kornienko V.A., Thid B., Rietveld M.T., Kosch M.J., Bsinger T. Phenomena in the ionosphere-magnetosphere system induced by injection of powerful HF radio waves into night-side auroral ionosphere // Ann. Geophys. 2005. Vol. 23(1). P. 87–100.

Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Petlenko A.V., Brekke A., Rietveld M.T. Geophysical phenomena during an ionospheric modification experiment at Troms // Ann. Geophys. 1998. Vol.16. P. 1212–1225.

Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Brekke A., Rietveld M.T., Kosch M J., Borisova T.D., Krylov M.V. Phenomena observed by HF long-distance tools in the HF modified auroral ionosphere during magnetospheric substorm // Rad. Sci. 1999. Vol. 34. P. 715–724.

Blagoveshchenskaya N. F., Kornienko V.A., Borisova T.D., Rietveld M.T., Bsinger T., Thid B., Leyser T.B., Brekke A. Heater-induced phenomena in a coupled ionosphere-magnetosphere system // Adv. Space Res. 2006b. Vol. 38. P. 2495–2502.

Coster A.J., Djuth F.T., Jost R.J., Gordon W.E. The temporal evolution of 3-m striations in the modified ionosphere // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90. P. 2807–2818.

Fejer J.A., Sulzer M.P., Djuth F.T. Height dependence of the observed spectrum of radar backscatter from HF-induced ionospheric Langmuir turbulence // J. Geophys. Res. 1991. Vol. A96. P. 15985–15994.

Leyser T.B. Simulated Electromagnetic Emissions by High-Frequency Electromagnetic Pumping of the Ionospheric Plasma // Space Sci. Rev. 2001. Vol. 98 (3–4). P. 223–328.

Noble S.T., Djuth F.T., Jost R.J., Gordon W.E., Hedberg A., Thid B., Derblom H., Boström R., Nielsen E., Stubbe P., Kopka H. Multiple frequency radar observations of high-latitude E region irregularities in the HF modified ionosphere // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 13613–13627.

Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Lyser 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.

Thome G.D., Blood D.W. First observation of RF backscatter from field-aligned irregularities produced by ionospheric heating // Rad. Sci. 1974. Vol. 9. P. 917–929.

Wahlund J.-E., Opgenoorth H.J., Hggström I., Winsle K.J., Jone G.O.L. EISCAT observations of topside ionospheric ion outflows during auroral activity: revisited. // J. Geophys. Res. 1992. Vol. A97. P. 3019–3037.

N.F.BLAGOVESHCHENSKAYA

MULTI-INSTRUMENTAL STUDIES OF PHENOMENA IN THE HIGH LATITUDINAL IONOSPHERE INITIATED BY POWERFUL HF RADIO WAVES: RESULTS AND OUTLOOK

Results from multi-instrument HF modification experiments carried out by AARI scientists in 2009 during solar activity minimum with using EISCAT technical facilities are presented. The spatial structure

of artificially modified ionospheric F region was investigated. Phenomena in the F region of ionosphere, when the HF heater frequency was near the third electron gyro harmonic frequency, were examined in detail. The excitation of intense small-scale artificial field-aligned irregularities, when the powerful HF radio wave with X-mode polarization was injected into F region of ionosphere at frequency near the extraordinary critical frequency, was found for the first time. The HF heater-induced ion outflows accompanied by strong increase of electron temperature and plasma thermal expansion in a wide altitude range from 180 to 500 km, were found under continuous action of powerful HF radio wave with O-mode of polarization in evening hours. The simultaneous increase of O^+ ion density was detected from the DMSP F15 satellite observations at altitude of about 850 km.

Keywords: high latitudinal ionosphere, powerful HF radio wave, modification, stimulated electromagnetic emission, artificial small-scale ionospheric irregularities.

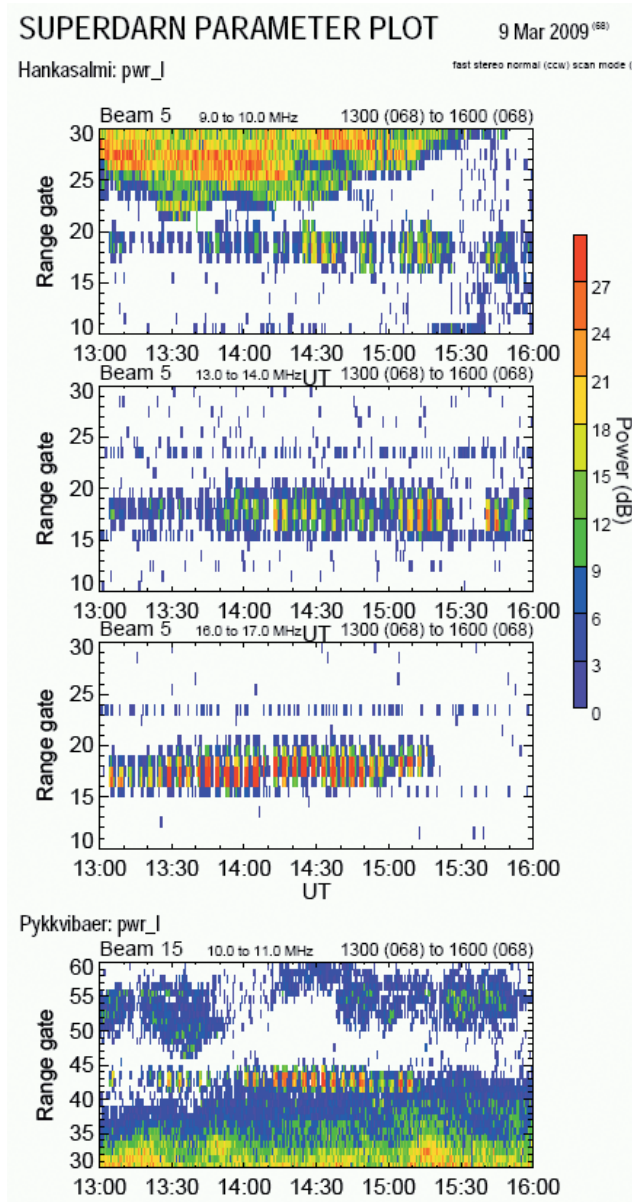


Рис. 5. Мощность рассеянных сигналов в координатах дальность (range gate) — мировое время UT по данным измерений с помощью когерентных КВ доплеровских радаров CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5) на частотах 10, 13 и 17 МГц и в Рейкьявике, Исландия (луч 15) на частоте 10 МГц 9 марта 2009 г. с 13 до 16 UT. Дальность из Ханкасалми до искусственно возмущенной области ионосферы над КВ нагревным комплексом EISCAT/HEATING в Тромсё соответствует «воротам» 16–18, а дальность из Рейкьявика до Тромсё — «воротам» 42–44. Рисунок выполнен с помощью программных средств Международной радарной ассоциации SUPERDARN

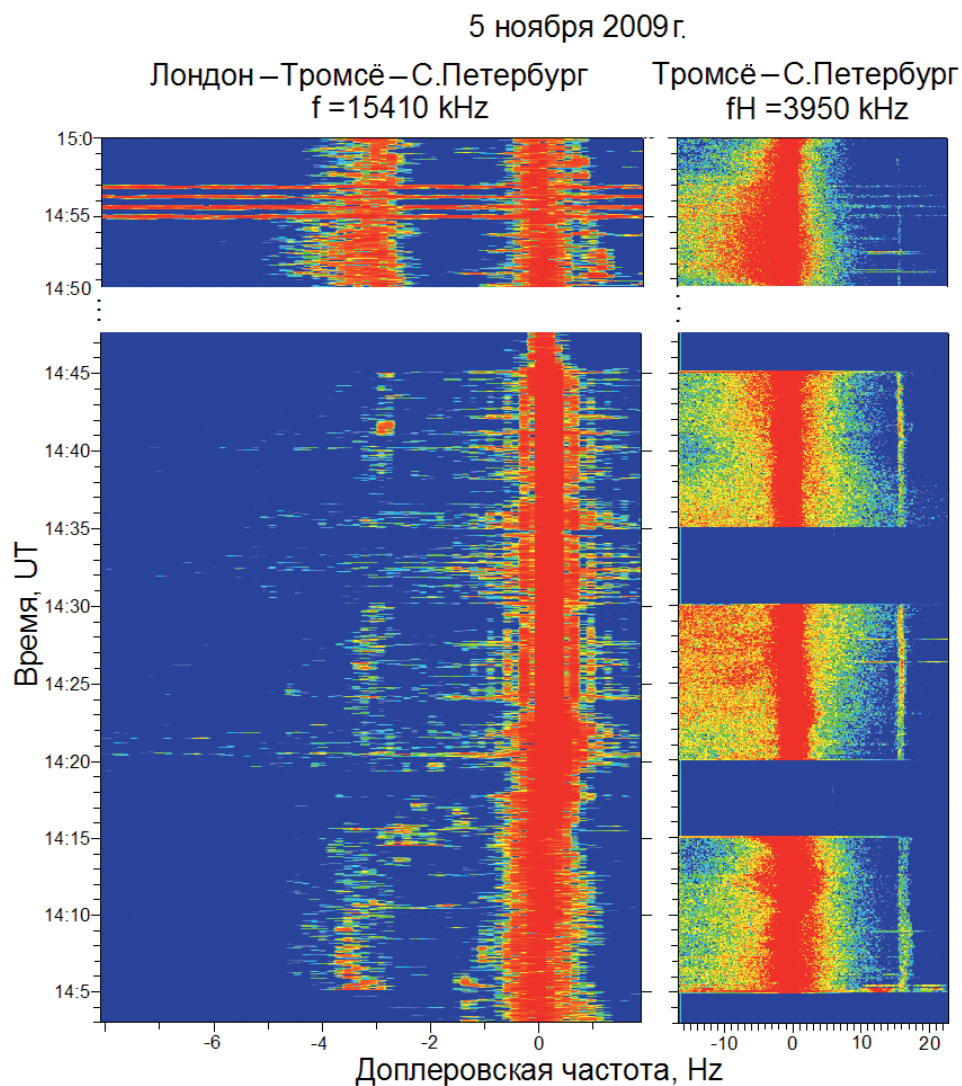


Рис. 8. Динамические доплеровские спектры диагностических КВ сигналов, рассеянных на МИИН, на трассе Лондон–Тромсё–С. Петербург на частоте $f = 15300$ кГц, а также сигналов нагревного комплекса EISCAT/HEATING на частоте 3950 кГц, принятых в Санкт-Петербурге, 5 ноября 2009 г. с 14.00 до 15.00 UT. Распространению «прямого» сигнала из Лондона в Санкт-Петербург соответствует нулевая доплеровская частота. В период эксперимента КВ нагревной комплекс EISCAT/HEATING излучал в магнитный зенит в режиме 10 мин нагрев/ 5 мин пауза. С 14.05 до 14.45 UT излучение велось на O -моды поляризации мощной КВ радиоволны, а с 14.50 до 15.00 UT – на X -моды

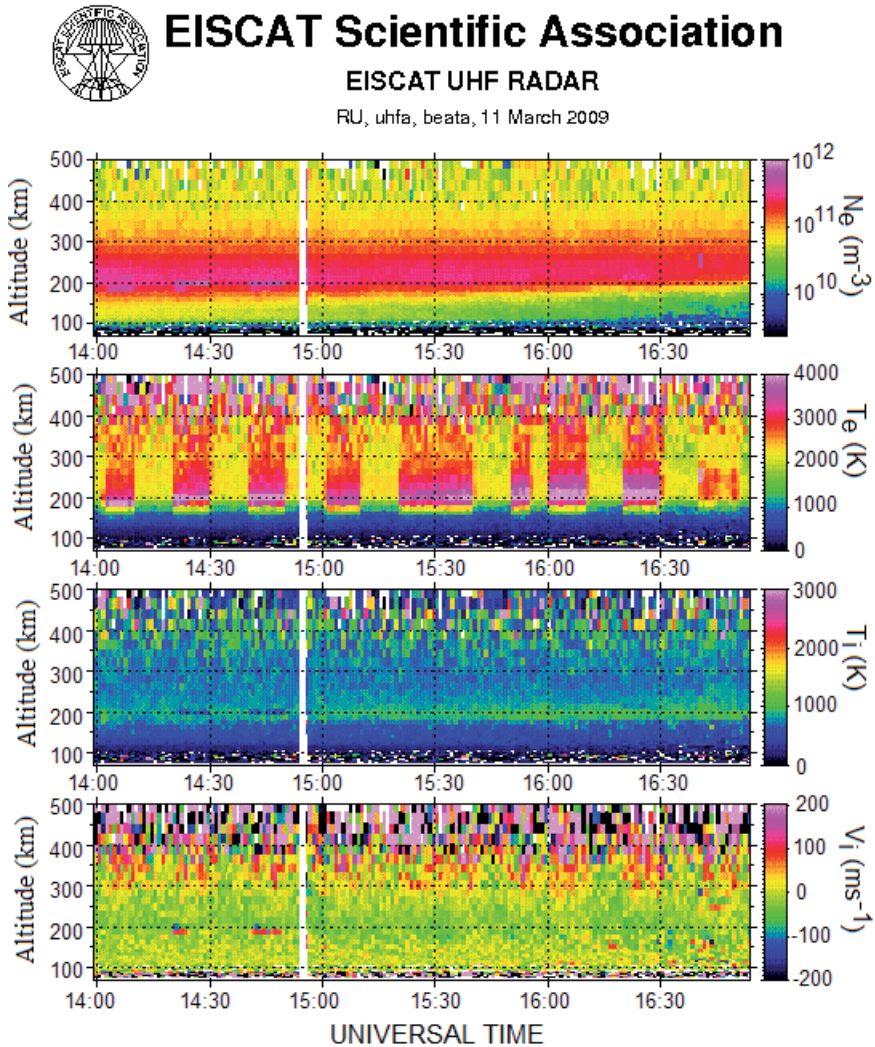


Рис. 9. Высотно-временное распределение параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации N_e , температуры электронов T_e и ионов T_i , а также скоростей ионов V_i) по данным измерений СВЧ радара некогерентного рассеяния радиоволн в направлении магнитного поля в Тромсё во время эксперимента 11 марта 2009 г. Измерения выполнялись с 14.00 до 16.30 UT (мировое время) в диапазоне высот от 90 до 500 км. Мощная КВ радиоволна O -поляризации излучалась на частоте 4040 кГц в магнитный зенит циклами длительностью от 5 до 20 мин. Рисунок выполнен с помощью программных средств Европейской научной ассоциации EISCAT

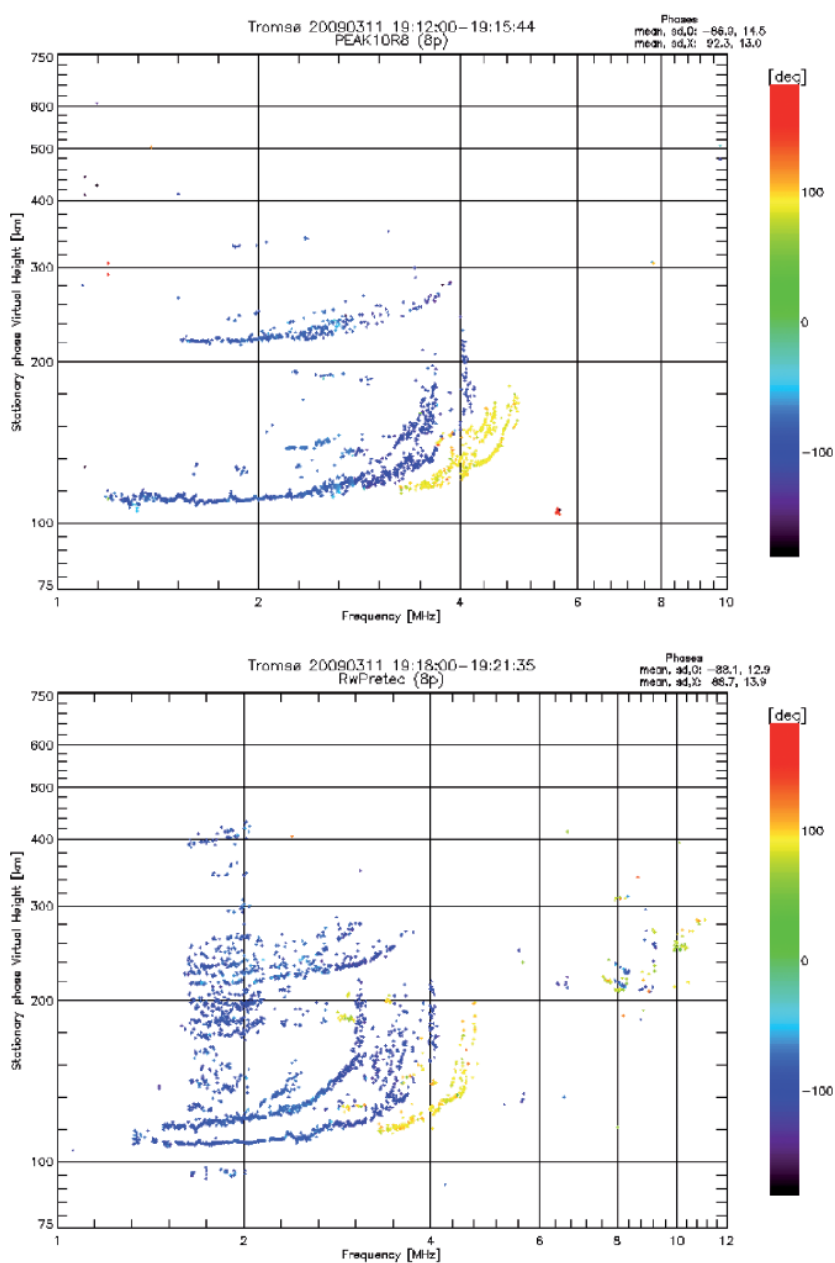


Рис. 11. Инограммы вертикального зондирования ионосферы (ВЗ) в координатах действующая высота (км) - частота (МГц) по данным диназонда в Тромсё 3 марта 2009 г. в 19.12 и 19.18 UT в период проведения эксперимента DEMETER – Тромсё

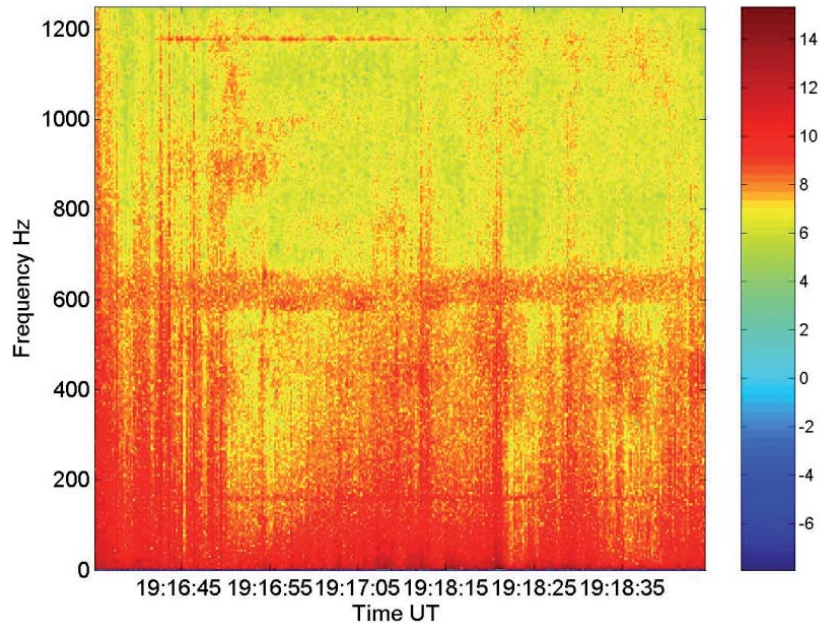


Рис. 12. Спектрограмма интенсивности поперечной к направлению геомагнитного поля компоненты электрического поля $E_x(t)$, зарегистрированная детектором электрического поля (ICE) ИСЗ DEMETER при пролете ИСЗ над искусственно возмущенной областью ионосферы над Тромсё во время эксперимента 3 марта 2009 г. Спектрограмма приведена в координатах частота (Гц) – мировое время (UT). Мощная модулированная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода) излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 4040 кГц. Частота модуляции составляла 1178 Гц; глубина модуляции – 100 %

Дополнительная иллюстрация к статье Н.Ф.Благовещенской «Комплексные исследования эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн на высокоширотную ионосферу: итоги и перспективы» (Проблемы Арктики и Антарктики № 1 (84))

SUPERDARN PARAMETER PLOT

Hankasalmi: pwr_l

6 Nov 2009 ⁽³¹⁰⁾

fast stereo normal (cow) scan mode (153)

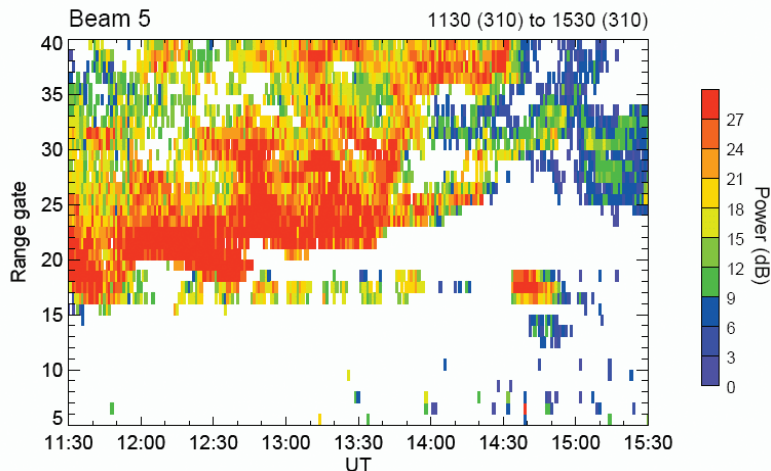


Рис. 7. Мощность рассеянных сигналов в координатах дальность (range gate) — мировое время UT по данным измерений с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5) на частоте 10 МГц 6 ноября 2009 г. с 11.30 до 15.30 UT. Дальность из Ханкасалми до искусственно возмущенной области ионосферы над КВ нагревным комплексом EISCAT/HEATING в Тромсе соответствует «воротам» 16—18. Рисунок выполнен с помощью программных средств Международной радарной ассоциации SUPERDARN.