

УДК 533.951+537.868

ЭФФЕКТЫ МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ. 2. РЕЗУЛЬТАТЫ КООРДИНИРОВАННЫХ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

*Н. Ф. Благовещенская*¹, *Т. Д. Борисова*¹, *В. А. Корниенко*¹, *М. Т. Ритвельд*²,
*Т. К. Йоман*³, *Д. М. Райт*³, *М. Розер*⁴, *Х. Люр*⁴, *Е. В. Мишин*⁵, *С. Рос*⁶,
*В. Л. Фролов*⁷, *М. Паро*⁸, *Ж. Л. Рош*⁸

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

² EISCAT Scientific Association, Ramfjordmoen, Norway

³ University of Leicester, Leicester, UK

⁴ GeoForschungsZentrum, Potsdam, Germany

⁵ Air Force Research Lab., Hanscom, Massachusetts, USA

⁶ AER Inc., Lexington, Massachusetts, USA

⁷ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

⁸ Environment Physics and Chemistry Laboratory, Orléans, France

Представлены результаты координированных спутниковых и наземных наблюдений эффектов воздействия мощного коротковолнового радиоизлучения на высокоширотную ионосферу. В вечерние часы при нагреве высокоширотной F -области ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением обыкновенной поляризации (O-мода) обнаружено явление выноса ионов, сопровождавшееся сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы. По данным измерений на спутнике DMSP F15 на высоте порядка 850 км в этот период зарегистрировано возрастание плотности ионов O^+ . По данным наблюдений на спутнике CHAMP в период проведения нагревного эксперимента в Тромсё (Норвегия) 5 ноября 2009 года зарегистрировано сверхнизкочастотное излучение на частоте модуляции мощного коротковолнового радиоизлучения 3 Гц, которое генерировалось при облучении ионосферы мощным коротковолновым излучением O-поляризации и сопровождалось существенным возрастанием температуры электронов и генерацией искусственных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей. Выполнен анализ результатов наблюдений крайне низкочастотного излучения на частоте модуляции мощного радиоизлучения 1 178 Гц на спутнике DEMETER в период проведения нагревных экспериментов на примере события 3 марта 2009 года.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты по воздействию мощного коротковолнового (КВ) радиоизлучения на высокоширотную ионосферу по данным координированных спутниковых и наземных наблюдений с использованием технических средств Европейской научной Ассоциации EISCAT, выполненных в периоды глубокого минимума солнечной активности 5–12 марта 2009 года и 29 октября–6 ноября 2009 года. Основной акцент сделан на исследовании возможности выноса потоков ионов из ионосферы в магнитосферу, инициированного воздействием мощного КВ радиоизлучения, в эпоху глубокого минимума солнечной активности по данным координированных наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн в г. Тромсё и на спутнике DMSP F15. Другой аспект данной работы связан с исследованиями электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным модулированным КВ радиоизлучением комплекса EISCAT/Heating, по данным наблюдений на спутниках CHAMP и DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions).

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ

Общее описание экспериментов на КВ нагревом комплексе EISCAT/Heating ($69,6^\circ$ с. ш., $19,2^\circ$ в. д., параметр Мак-Илвейна $L = 6,2$, магнитное наклонение $I = 78^\circ$) в г. Тромсё (Норвегия), выполненных в марте и октябре–ноябре 2009 года, а также используемых наземных диагностических средств приведено в [1].

В период экспериментов по возбуждению выноса ионов из высокоширотной ионосферы мощная короткая радиоволна О-поляризации излучалась в основном циклами с длительностями 10 мин, разделёнными 10-минутными паузами. Параметры ионосферной плазмы, т. е. концентрации электронов N_e , температуры электронов T_e и ионов T_i , а также скорость ионов V_i , определялись с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн на частоте, примерно равной 930 МГц, вблизи г. Тромсё [2] в диапазоне высот от 90 до 600 км. Измерения выполнялись вдоль направления магнитного поля в г. Тромсё, т. е. в направлении магнитного зенита. При пролёте над областью нагрева спутника DMSF F15 осуществлялось непрерывное излучение в течение 20 мин мощной немодулированной волны обыкновенной поляризации (О-мода). Спутники DMSF летают по круговым полярным орбитам на высоте порядка 840 км. В данной работе были использованы только данные датчиков, измеряющих концентрации n_e , n_i и дрейфовые движения ионосферных ионов и электронов. Горизонтальная и вертикальная компоненты скорости дрейфа плазмы измерялись в диапазоне ± 3 км/с с разрешением 12 м/с, обеспечивающим получение плотности ионов $n_i \geq 5000$ см $^{-3}$ [3].

Нагрев ионосферы при пролёте над областью нагрева спутника CHAMP осуществлялся в режиме непрерывного излучения в течение 10 мин с использованием модулированного с частотой 3 Гц КВ радиоизлучения О-поляризации. Во время эксперимента на спутнике выполнялась регистрация двух ортогональных компонент магнитного поля Земли с помощью бортовой аппаратуры CHAMP [4], а также проводилась наземная диагностика параметров ионосферной плазмы, т. е. величин N_e , T_e , T_i и V_i с помощью радара некогерентного рассеяния и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (с использованием системы когерентных КВ радаров CUTLASS в Финляндии и Исландии [5]).

В период эксперимента DEMETER—Тромсё мощная модулированная с частотой 1178 Гц короткая радиоволна необыкновенной поляризации (Х-мода) излучалась непрерывно в течение 20 мин. Характеристики искусственных плазменных возмущений измерялись с помощью бортовой аппаратуры французского спутника DEMETER. Его высокая оснащённость чувствительной аппаратурой [6] 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 с помощью спутника DEMETER выполнялись в режиме Burst mode, т. е. в режиме наиболее полного использования имеющихся средств диагностики и максимальной скорости оцифровки полученных данных.

Карта, поясняющая геометрию экспериментов и расположение наземных средств диагностики, приведена на рис. 1 статьи [1].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Вынос ионов из высокоширотной ионосферы в магнитосферу

Вынос ионов из ионосферы идентифицируется по данным радаров некогерентного рассеяния как возрастание компонент скоростей ионов V_i в направлении вдоль магнитного поля. Их увеличение до значений, превышающих 100 м/с на высотах, больших 400 км, свидетельствует о выносе ионов из высокоширотной F -области ионосферы в магнитосферу [7]. В зависимости от характеристик и условий их возникновения ионные потоки из высокоширотной F -области ионосферы естественного происхождения делятся на два типа [8]. Первый из них характеризуется сильными поперечными к магнитному полю электрическими полями, повышенными значениями температур ионов вследствие джоулева разогрева и либо отсутствием, либо лишь незначительным высыпанием электронов и может быть объяснён тепловым расширением плазмы. Второй тип ионных потоков наблюдается над дугами полярных сияний, характеризуется существенно повышенными значениями температуры электронов и может быть связан с усилением параллельной магнитному полю компоненты электрического поля. По данным исследований явления выноса ионов из авроральной ионосферы с помощью радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё [8] было установлено, что механизмы ускорения, ответственные за вынос ионов, главным образом реализуются в возмущённых условиях. Установлено также [9], что ионно-звуковая турбулентность может вызвать возрастание температуры электронов, приводящее к ускорению потоков ионов вследствие усиления параллельной магнитному полю компоненты электрического поля.

Явление выноса ионов из ионосферы, инициированное воздействием мощного КВ радиоизлучения на высокоширотную F -область ионосферы, впервые было обнаружено в нагревных экспериментах в г. Тромсё, выполненных в эпоху солнечной активности, близкой к максимальной [10–13]. Обнаруженные ионные потоки, распространяющиеся из ионосферы с высот порядка 350 км параллельно магнитному полю Земли, наблюдались как при спокойных, так и сильно возмущённых магнитных условиях и обладали характеристиками как первого, так и второго типов ионных потоков естественного происхождения. Явление выноса ионов было обнаружено также в период проведения экспериментов на КВ нагревном стенде HAARP (Аляска, США) с помощью спутников DEMETER на высоте порядка 670 км [14] и DMSP на высоте порядка 840 км [3] по данным измерений температуры и плотности ионов и состава плазмы.

Результаты наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё в период экспериментов 11 и 12 марта 2009 года позволили обнаружить явление выноса ионов из ионосферы, инициированное воздействием мощного КВ радиоизлучения на высокоширотную ионосферу в эпоху глубокого минимума солнечной активности. Вынос ионов из F -области высокоширотной ионосферы наблюдался 11 и 12 марта 2009 года и идентифицировался как возрастание компонент скоростей ионов вдоль магнитного поля в циклах нагрева.

На рис. 1 представлены полученные по данным радара некогерентного рассеяния величины N_e и T_e на высоте 215 км, а также V_i на высоте 344 км в период проведения нагревных экспериментов 11 марта 2009 года с 14:58 до 17:00 UT. В этих экспериментах мощная радиоволна О-поляризации излучалась на частоте 4040 кГц в направлении магнитного зенита в основном циклами с длительностями 10 мин, разделёнными 10-минутными паузами. Эффективная мощность излучения составляла величину порядка 150 МВт. Результаты экспериментов, выполненных при абсолютно спокойных фоновых геофизических условиях, свидетельствуют о том, что вынос ионов, т. е. возрастание компонент V_i вдоль магнитного поля, см. рис. 1в, происходил во всех циклах нагрева на интервале времени с 15:00 до 17:00 UT и сопровождался сильным возрастанием температуры электронов от её фоновых значений в паузах между нагревными циклами, примерно равных

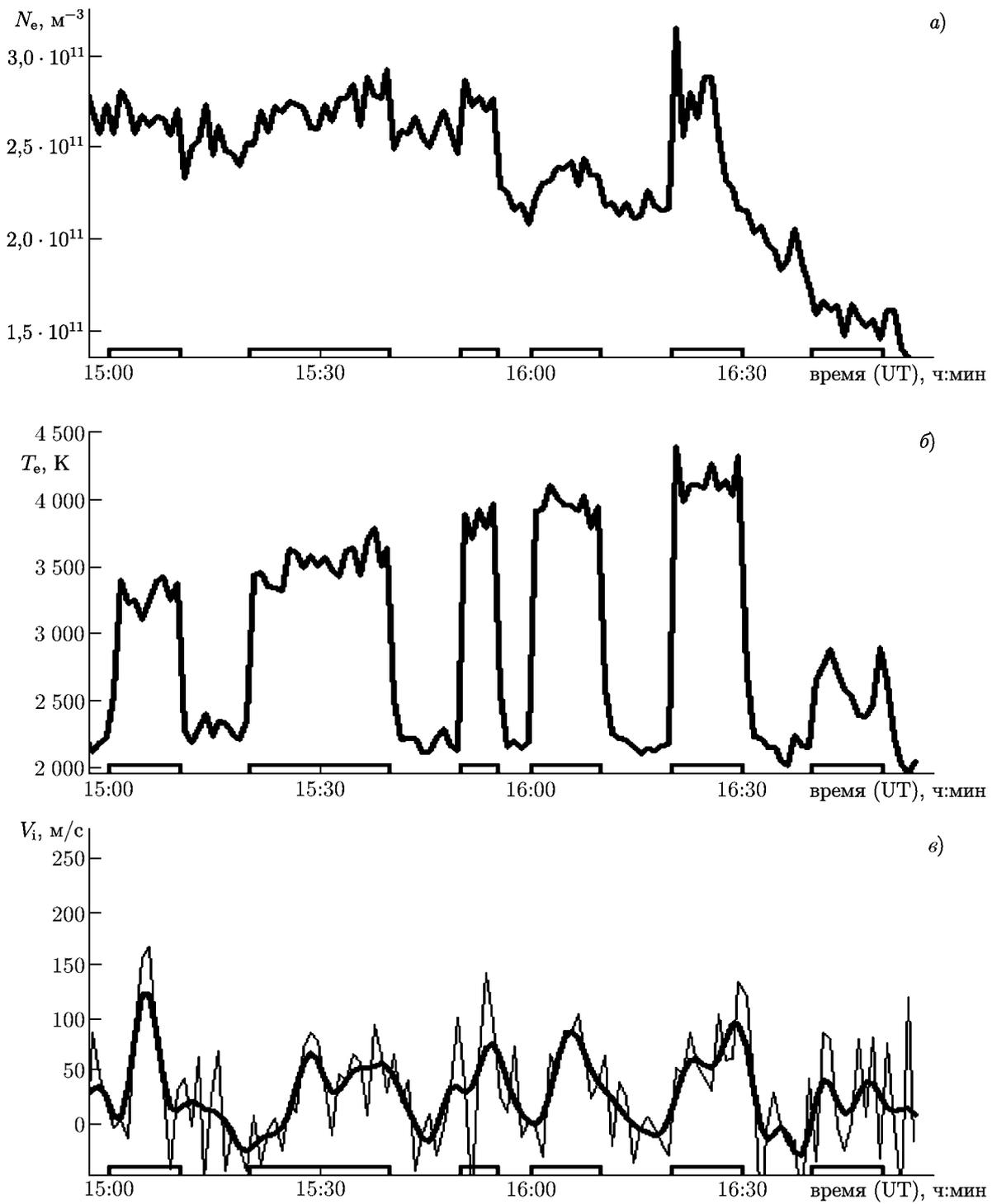


Рис. 1. Полученные по данным радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё величины N_e и T_e на высоте 215 км, а также V_i на высоте 344 км в период проведения нагревного эксперимента 11 марта 2009 года с 14:58 до 17:00 UT. Мощное КВ радиоизлучение О-поляризации имело частоту 4 040 кГц и направлялось в магнитный зенит длинными циклами с длительностями от 5 до 20 мин

2000÷2200 К, до 3500÷4200 К в циклах нагрева. В циклах нагрева, осуществлявшихся на интервале времени с 15:20 до 16:30 UT, также наблюдалось повышение электронной концентрации (см. рис. 1а), свидетельствующее о наличии потоков электронов, ускоренных до энергий, способных привести к повышению электронной плотности. По экспериментальным данным было также установлено, что вынос ионов возможен при нагреве на частотах, превышающих f_{oF_2} на величину не более 0,5 МГц, что наблюдалось 11 и 12 марта в циклах нагрева, осуществлявшихся с 16:40 до 16:50 UT. В целом следует отметить, что вынос ионов из высокоширотной ионосферы, инициированный воздействием мощного КВ радиоизлучения в эпоху минимума солнечной активности был слабее, чем в эпоху её максимума.

Одиннадцатого марта 2009 года с 14:00 до 16:00 UT когерентные КВ радары CUTLASS в Финляндии и Исландии работали на трёх частотах, равных 10; 13 и 17 МГц. Сигналы, рассеянные на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, регистрировались радаром CUTLASS в Финляндии одновременно на трёх частотах, что соответствовало поперечным к магнитному полю масштабам искусственных неоднородностей l_{\perp} равным 15; 12 и 8 м. Коротковолновый радар в Исландии регистрировал в то же самое время мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности только на частоте 10 МГц, что соответствовало $l_{\perp} = 15$ м.

Одиннадцатого марта 2009 года с 15:20 до 15:40 UT был выполнен эксперимент DMSP—Тромсё. Минимальное расстояние между орбитой указанного спутника и осью возмущённой магнитной трубки в момент времени $T_{MZ} = 15:26:15$ UT составляло около 70 км. Результаты наземных наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния в период пролёта спутника DMSP F15 над г. Тромсё позволили идентифицировать явление выноса ионов, которые на этих высотах были в основном представлены ионами O^+ , инициированное воздействием мощного КВ радиоизлучения, сопровождавшееся сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км (см. рис. 1).

На рис. 2 показаны вариации общей концентрации ионов вместе с их трендом, найденным в результате усреднения по скользящему интервалу с длительностью 10 с, полученные по данным измерений со спутника DMSP F15 в период нагревного эксперимента в г. Тромсё 11 марта 2009 года. На этом же рисунке чёрными кружками дополнительно показаны измеренные значения концентрации ионов кислорода O^+ . Нулевому моменту времени соответствует время максимального сближения спутника с осью возмущённой магнитной трубки, т. е. время $T_{MZ} = 15:26:15$ UT. Нагрев ионосферы проводился с 15:20 до 15:40 UT. Минимальное расстояние между орбитой спутника и осью возмущённой магнитной трубки в момент времени $T_{MZ} = 15:26:15$ UT составляло около 70 км.

Результаты измерений спутником DMSP F15 на высоте порядка 840 км при пролёте над г. Тромсё свидетельствуют о повышении примерно на 6% плотности ионов с 15:26:08 до 15:26:18 UT. Отметим, что спутник DMSP F17, который пролетал примерно на 330 км западнее центра возмущённой магнитной трубки, не обнаружил каких-либо проявлений нагрева.

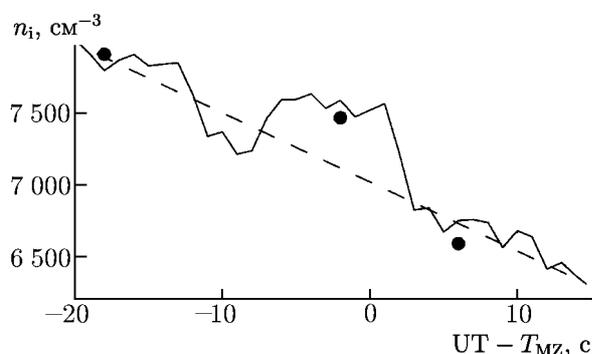


Рис. 2. Вариации общей концентрации ионов n_i вместе с их трендом, найденным в результате усреднения по скользящему интервалу с длительностью 10 с, по данным измерений со спутника DMSP F15 в период нагревного эксперимента в г. Тромсё, полученные 11 марта 2009 года. Чёрными кружками дополнительно показаны измеренные значения концентрации ионов кислорода O^+ . Нулевому моменту времени соответствует время максимального сближения спутника с осью возмущённой магнитной трубки, т. е. время $T_{MZ} = 15:26:15$ UT. Нагрев ионосферы проводился с 15:20 до 15:40 UT. Минимальное расстояние между орбитой спутника и осью возмущённой магнитной трубки в момент времени $T_{MZ} = 15:26:15$ UT составляло около 70 км.

Суммируя результаты измерений, выполненных спутником DMSP F15 в период проведения нагревного эксперимента на комплексе в г. Тромсё в вечерние часы 11 марта 2009 года, можно сделать следующее заключение. На спутнике DMSP F15 уверенно зарегистрировано возрастание плотности ионов. Одновременные измерения с помощью радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё свидетельствуют о инициированном мощным КВ радиоизлучением выносе ионов из высокоширотной F -области ионосферы в магнитосферу. На этих высотах преобладают ионы O^+ . Отметим, что вынос ионов сопровождался сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км, а также повышением электронной концентрации в ионосфере. Одновременно по данным радаров CUTLASS регистрировались интенсивные мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности. Вынос ионов наблюдался в эпоху глубокого минимума солнечной активности в вечерние часы при абсолютно спокойных фоновых геофизических условиях.

2.2. Сверхнизкочастотные возмущения, индуцируемые в высокоширотной ионосфере мощным модулированным КВ радиоизлучением

Как известно (см., например, [15–18]), воздействие мощного модулированного КВ радиоизлучения на ионосферную плазму вызывает генерацию возмущений в очень низкочастотном, крайне низкочастотном и сверхнизкочастотном диапазонах на частоте модуляции. В данном разделе приведены результаты исследования возмущений в сверхнизкочастотном диапазоне, инициированных воздействием модулированного с частотой 3 Гц мощного КВ радиоизлучения высокоширотного нагревного комплекса EISCAT/Heating. Отметим, что искусственные возмущения с масштабами, соответствующими герцовому диапазону частот, в экспериментах, выполненных на нагревном комплексе в г. Тромсё, регистрировались исключительно редко. Здесь, прежде всего, следует отметить результаты работы [19], в которой по данным, полученным со спутника FAST, исследовались характеристики излучения на частоте 3 Гц, инициированного воздействием мощного модулированного с частотой 3 Гц КВ радиоизлучения X -поляризации на спорадический E -слой высокоширотной ионосферы.

Рассмотрим результаты эксперимента, выполненного 5 ноября 2009 года, по генерации излучения в сверхнизкочастотном диапазоне, инициированного воздействием модулированного мощного КВ радиоизлучения высокоширотного нагревного комплекса EISCAT/Heating. В отличие от ранее выполненных экспериментов, когда для индуцирования сверхнизкочастотных возмущений использовалось КВ радиоизлучение необыкновенной поляризации (X -мода), во время эксперимента 5 ноября 2009 года нагревный комплекс в г. Тромсё генерировал мощное модулированное КВ радиоизлучение обыкновенной поляризации (O -мода). Частота модуляции была равна 3 Гц, а глубина модуляции — 100%. Эффективная мощность излучения составляла 190 МВт. Время излучения мощной модулированной волны было согласовано по времени с пролётом спутника СНАМР через магнитную силовую трубку, опирающуюся на возмущённую область ионосферы. При проведении эксперимента мощная модулированная волна O -поляризации излучалась на частоте 4040 кГц с 13:20 до 13:30 UT в направлении магнитного зенита. Минимальное расстояние между орбитой указанного спутника и осью возмущённой магнитной трубки на высоте 310 км в $T_{MZ} = 13:24:45$ UT было равно 40 км. Нагрев начинался примерно за 5 мин до момента времени T_{MZ} . Спутник двигался с юга на север.

Характерной особенностью состояния ионосферы в этот период по данным вертикального зондирования в г. Тромсё (см. рис. 3) являлось наличие хорошо выраженной F -области ионосферы с критическими частотами $f_{oF_2} \approx 4,4$ МГц, а также наличие плоского спорадического E -слоя с $f_{oE_s} \approx 3,2$ МГц. Таким образом, мощная радиоволна с частотой $f_H = 4040$ кГц в период пролёта

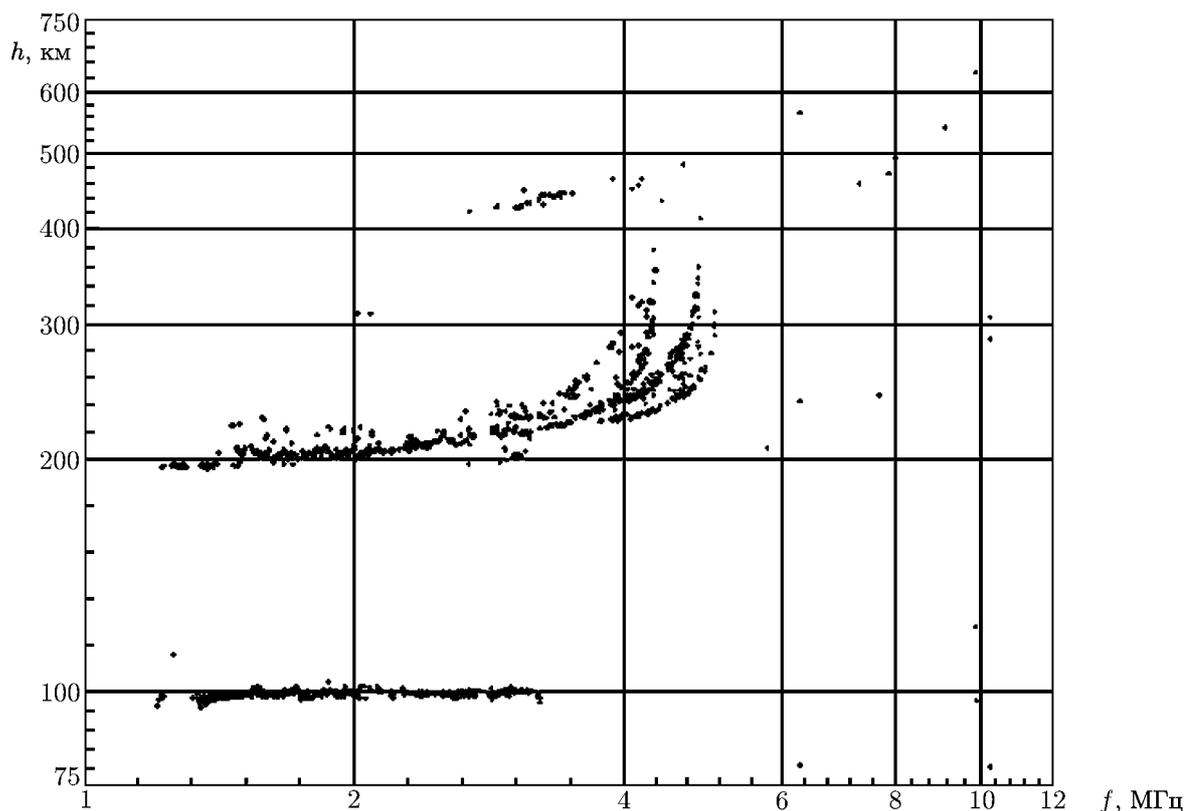


Рис. 3. Ионограмма вертикального зондирования ионосферы в координатах частота (f)—действующая высота (h) по данным ионозонда в г. Тромсё 5 ноября 2009 года в 13:28 UT во время пролёта над ним спутника СНАМР

спутника СНАМР над г. Тромсё отражалась от слоя F_2 .

Рассмотрим основные результаты эксперимента СНАМР—Тромсё. В период эксперимента проводились наземные измерения с помощью радара некогерентного рассеяния (частота 930 МГц) в г. Тромсё и с помощью системы когерентных КВ радаров CUTLASS в Финляндии и Исландии. По данным радара некогерентного рассеяния в нагревном цикле от 13:20 до 13:30 UT наблюдался сильный разогрев ионосферной плазмы в диапазоне высот от 180 до 300 км. Максимальные возмущения температуры электронов T регистрировались на высоте 210 км вблизи уровня отражения мощного КВ радиоизлучения от слоя F_2 . Они достигали значений $3\,100 \div 3\,200$ К, в то время как непосредственно до начала нагрева значения T_e составляли около 1 300 К.

На рис. 4 приведена зависимость мощности рассеянных сигналов в координатах номер «ворот» по дальности n —мировое время UT по данным радара CUTLASS в г. Ханкасалми на частоте порядка 10 МГц 5 ноября 2009 года с 11:00 до 15:00 UT. В период эксперимента разрешение по дальности было равно 45 км, при этом первые «ворота» начинались с дальности 180 км. Регистрация мощности рассеянных сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 405 до 1 980 км, соответствующем «воротам» с 5 до 40. Отметим, что «ворота» с $n = 17$ соответствовали фиксированной дальности 945 км из г. Ханкасалми до центральной части искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё. Из рис. 4 следует, что в период эксперимента 5 ноября 2009 года интенсивные сигналы, рассеянные на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, регистрировались во всех циклах нагрева с 11:30 до 14:30 UT, включая цикл нагрева с 13:20 до 13:30 UT, соответствующий времени пролёта спутника СНАМР над г. Тромсё. Полученные с 13:20 до 13:30 UT данные радаров CUTLASS свидетельствуют о генерации в это время

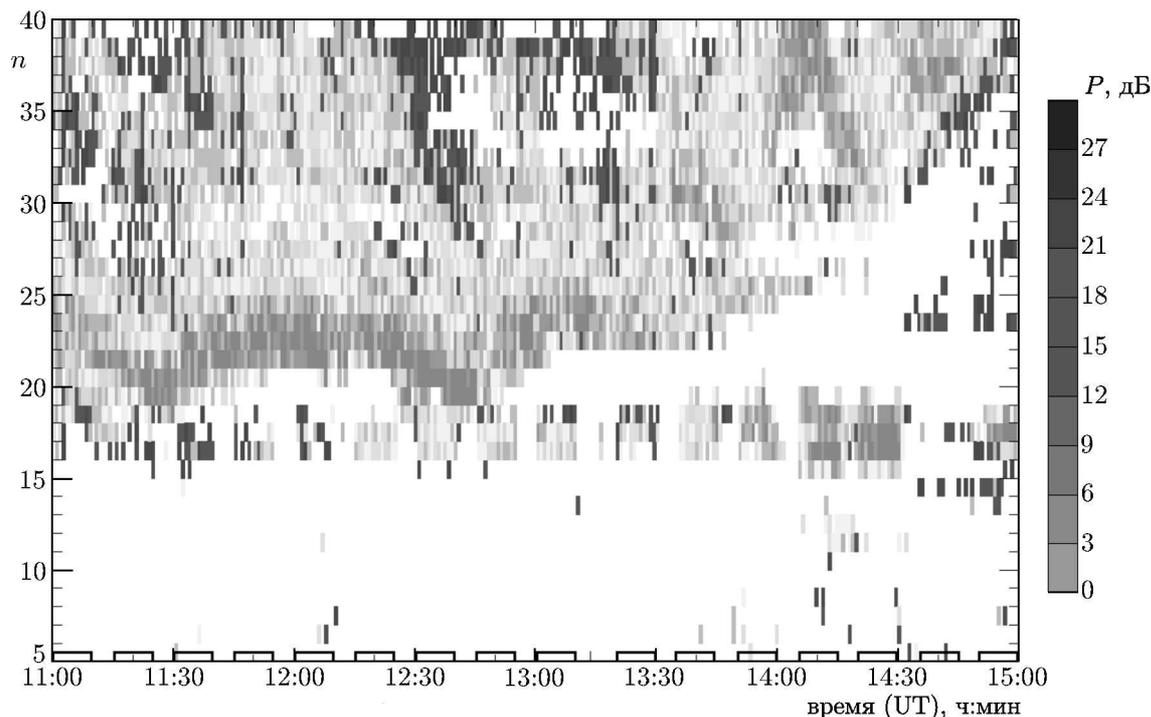


Рис. 4. Зависимость мощности рассеянных сигналов P в координатах номер «ворот» (n)—мировое время (UT) по данным радара CUTLASS в г. Ханкасалми (Финляндия) на частоте порядка 10 МГц (луч 5, ориентированный на искусственно возмущённую область ионосферы над г. Тромсё) с 11:00 до 15:00 UT 5 ноября 2009 года. Разрешение по дальности было равно 45 км, при этом первые «ворота» начинались с дальности 180 км. Регистрация мощности рассеянных сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 405 до 1980 км, соответствующем номерам «ворот» с 5 до 40. «Ворота» с номером 17 соответствуют фиксированной дальности 945 км из г. Ханкасалми до центральной части искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё

интенсивных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (см. рис. 4). Рассеянные на них сигналы регистрировались на частоте 10 МГц, что соответствовало поперечным к магнитному полю масштабам неоднородностей $l_{\perp} = 15$ м.

Для измерения вариаций магнитного поля на спутнике СНАМР использовалась система координат x, y, z с ориентацией оси z вдоль направления магнитного поля. Оси x и y ортогональны оси z и направлены на север и восток соответственно. На рис. 5 показаны данные измерений компонент B_x и B_y магнитного поля на спутнике СНАМР на высоте 310 км 5 ноября 2009 года с 13:18 до 13:33 UT. Генерация мощного КВ радиоизлучения осуществлялась с 13:20 до 13:30 UT. На рис. 5 этот временной интервал отмечен пунктирными линиями. На рис. 6 приведены спектральные мощности сигналов на частотах 3 и 4 Гц соответственно для x - и y -компонент магнитных пульсаций в период эксперимента СНАМР—Тромсё 5 ноября 2009 года. Как следует из рис. 6, на спутнике СНАМР отмечалось появление пульсаций компоненты B_y магнитного поля на частоте модуляции 3 Гц мощного КВ радиоизлучения с максимумом мощности в момент времени около 13:25 UT, соответствующий минимальному расстоянию между орбитой спутника и осью возмущённой магнитной трубки. Появление в пульсациях компоненты B_y магнитного поля выраженных спектральных составляющих на частоте 4 Гц в этот период не наблюдалось. Отсутствовали также спектральные максимумы в пульсациях компоненты B_x как на частоте 3, так и 4 Гц. Из рис. 6 также видно, что в момент времени около 13:28 UT наблюдались спектральные максимумы в пульсациях компонент B_x и B_y магнитного поля как на частоте 3, так и 4 Гц. Появ-

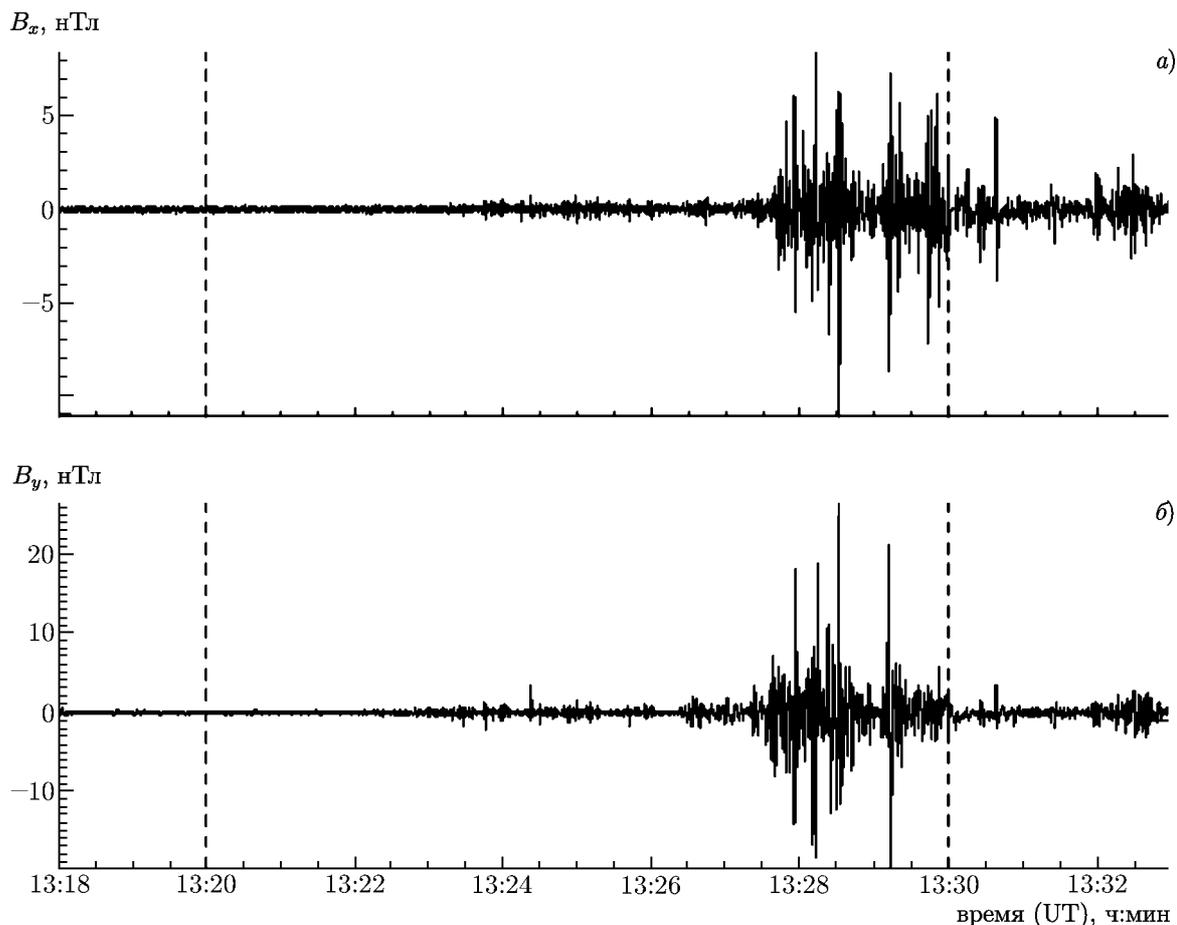


Рис. 5. Зависимость компонент магнитного поля B_x (а) и B_y (б) от времени по данным бортовых измерений со спутника СНАМР на высоте 310 км при его пролёте над искусственно возмущённой областью ионосферы над г. Тромсё во время эксперимента 5 ноября 2009 года. Мощная модулированная короткая радиоволна обыкновенной поляризации (О-мода) излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 4040 кГц с 13:20 до 13:30 UT (этот временной интервал выделен пунктирными линиями). Частота модуляции была равна 3 Гц, глубина модуляции 100 %

ление этих спектральных максимумов было обусловлено естественными возмущениями севернее искусственно возмущённой области ионосферы над г. Тромсё.

Суммируя результаты измерений в период эксперимента СНАМР—Тромсё 5 ноября 2009 года, можно сделать следующее заключение. Генерация мощного модулированного КВ радиоизлучения О-поляризации по данным наземных наблюдений вызывало сильный нагрев электронов, соответствовавший увеличению их температуры примерно на 200 %, и генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, развитие которых в области верхнегибридного резонанса является типичным явлением. Вместе с этим на спутнике СНАМР было зарегистрировано возмущение y -компоненты магнитного поля на частоте модуляции мощного КВ радиоизлучения 3 Гц, генерирующееся в результате его демодуляции в ионосфере. Излучение регистрировалось в дневные часы при спокойных фоновых магнитных условиях, когда в ионосфере над г. Тромсё наблюдался интенсивный F_2 -слой с критическими частотами $f_{oF_2} \approx 4,4$ МГц, а также плоский спорадический E -слой с $f_{oE_s} \approx 3,2$ МГц.

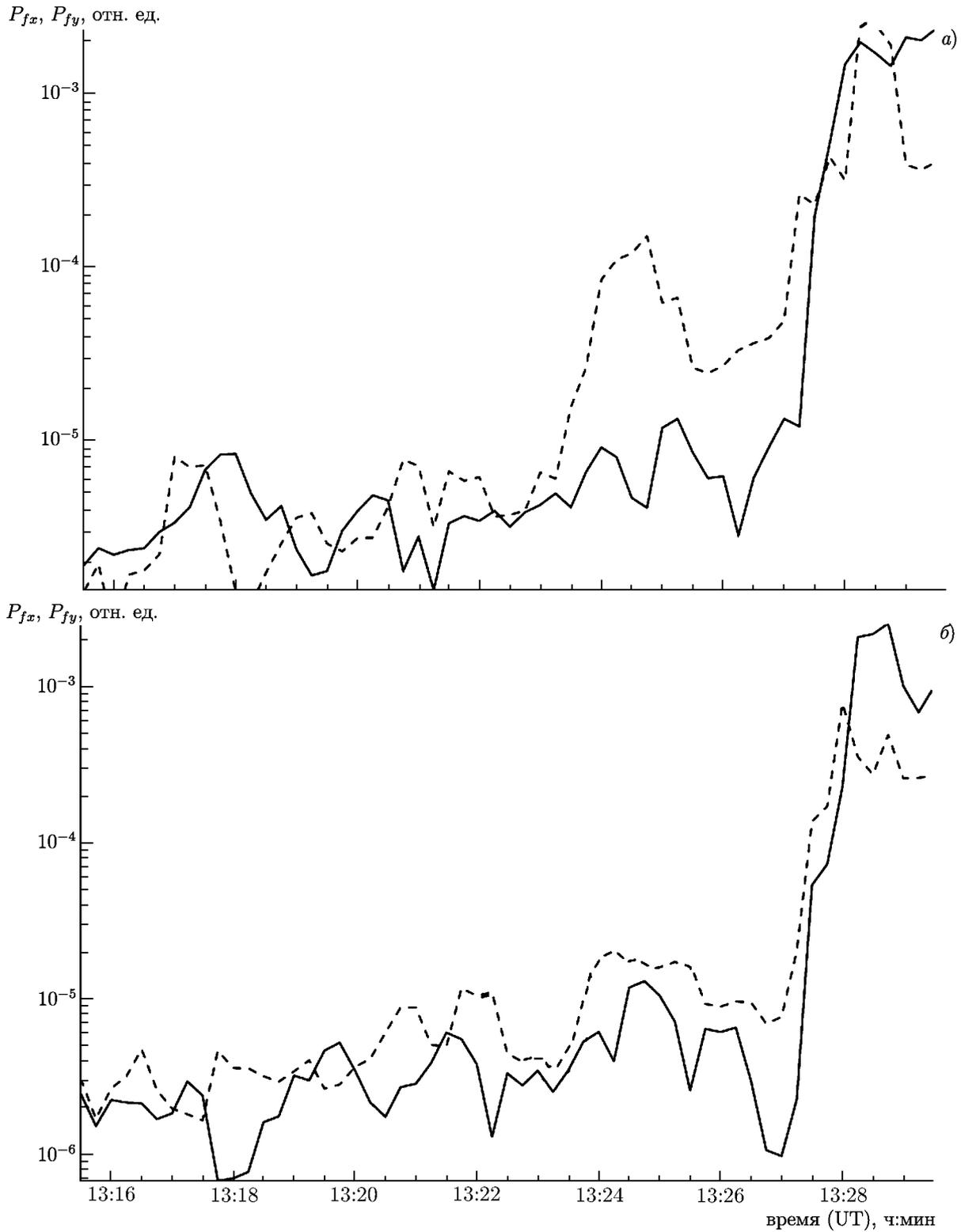


Рис. 6. Спектральные мощности x - и y -компонент магнитных пульсаций, P_{fx} (сплошные линии) и P_{fy} (пунктирные линии) соответственно, по данным бортовых измерений на спутнике CHAMP 5 ноября 2009 года на частотах 3 Гц (а) и 4 Гц (б)

2.3. Электромагнитные возмущения, индуцируемые во внешней ионосфере Земли мощным коротковолновым радиоизлучением высокоширотного нагревного комплекса EISCAT/Heating

В период нагревных кампаний ААНИИ в марте и октябре–ноябре 2009 года был выполнен цикл экспериментов DEMETER–Тромсё по исследованию электромагнитных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным модулированным КВ радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating. В данном разделе рассмотрены результаты экспериментальных исследований характеристик плазменной турбулентности, возбуждаемой на высоте 660 км излучением высокоширотного нагревного стенда EISCAT/Heating, выполненных 3 марта 2009 года.

Третьего марта 2009 года осуществлялась модификация высокоширотной E -области ионосферы. В период эксперимента генерировалось мощное модулированное КВ радиоизлучение необыкновенной поляризации (X -мода) с волновым вектором в направлении магнитного зенита на частоте 4040 кГц. Частота модуляции была равна 1178 Гц, глубина модуляции — 100%. Эффективная мощность излучения составляла величину порядка 60 МВт. Время излучения мощной модулированной волны было согласовано по времени с пролётом спутника DEMETER через магнитную силовую трубку, опирающуюся на возмущённую область ионосферы. При проведении эксперимента 3 марта 2009 года мощная волна излучалась с 18:59 до 19:21 UT. Минимальное расстояние между орбитой спутника и осью возмущённой магнитной трубки в момент времени $T_{MZ} = 19:17$ UT составляло 2 км. Нагрев начался за 18 мин до времени T_{MZ} . Спутник двигался с юга на север.

Эксперимент проводился при очень низкой солнечной активности — относительное число солнечных пятен, т. е. число Вольфа W , было равно нулю. Магнитное поле Земли было умеренно возмущённым. Планетарный индекс геомагнитной активности K_p был равен 3^- . По данным индексов AE, AU и AL усиление авроральной активности наблюдалось с 15:00 до 23:00 UT. В этот период времени регистрировалась серия авроральных суббурь небольшой и средней интенсивности. Период максимального сближения орбиты спутника с осью возмущённой магнитной трубки совпадал по времени с максимумом авроральной суббури средней интенсивности, характеризовавшимся возмущением магнитного поля на величину порядка 250 нТ, которая началась около 18:00 UT и закончилась в 20:00 UT.

На рис. 7 показаны ионограммы вертикального зондирования ионосферы, полученные в г. Тромсё в 19:18 UT в период эксперимента 3 марта 2009 года. Характерной особенностью состояния ионосферы в этот период по данным вертикального зондирования явилось наличие очень интенсивного диффузного спорадического E -слоя с групповым запаздыванием на высокочастотном участке ионограммы и с кратными отражениями. Критические частоты E_s -слоя лежали в диапазоне от 3,6 до 5,1 МГц. Регистрировался также плоский E_s -слой с предельными критическими частотами до 5,6 МГц.

Рисунок 8 демонстрирует спектрограмму интенсивности поперечной к направлению геомагнитного поля компоненты электрического поля $E_x(t)$, зарегистрированную детектором электрического поля спутника DEMETER. Крайне низкочастотное излучение на частоте модуляции мощного КВ радиоизлучения 1178 Гц уверенно обнаруживалось примерно с 19:16:42 до 19:17:30 UT, т. е. на протяжении примерно 330 км вдоль орбиты спутника. Область его наиболее высокой интенсивности соответствует интервалу времени от 19:16:45 до 19:17:10 UT, что соответствует пространственной области, приблизительно симметричной относительно центра возмущённой магнитной трубки. Максимальная интенсивность крайне низкочастотного излучения соответствовала частоте 1178 Гц и регистрировалась примерно в момент времени 19:16:45 UT, т. е. за 15 с до прохождения спутником центра трубки или примерно в 100 км к югу от него. На интерва-

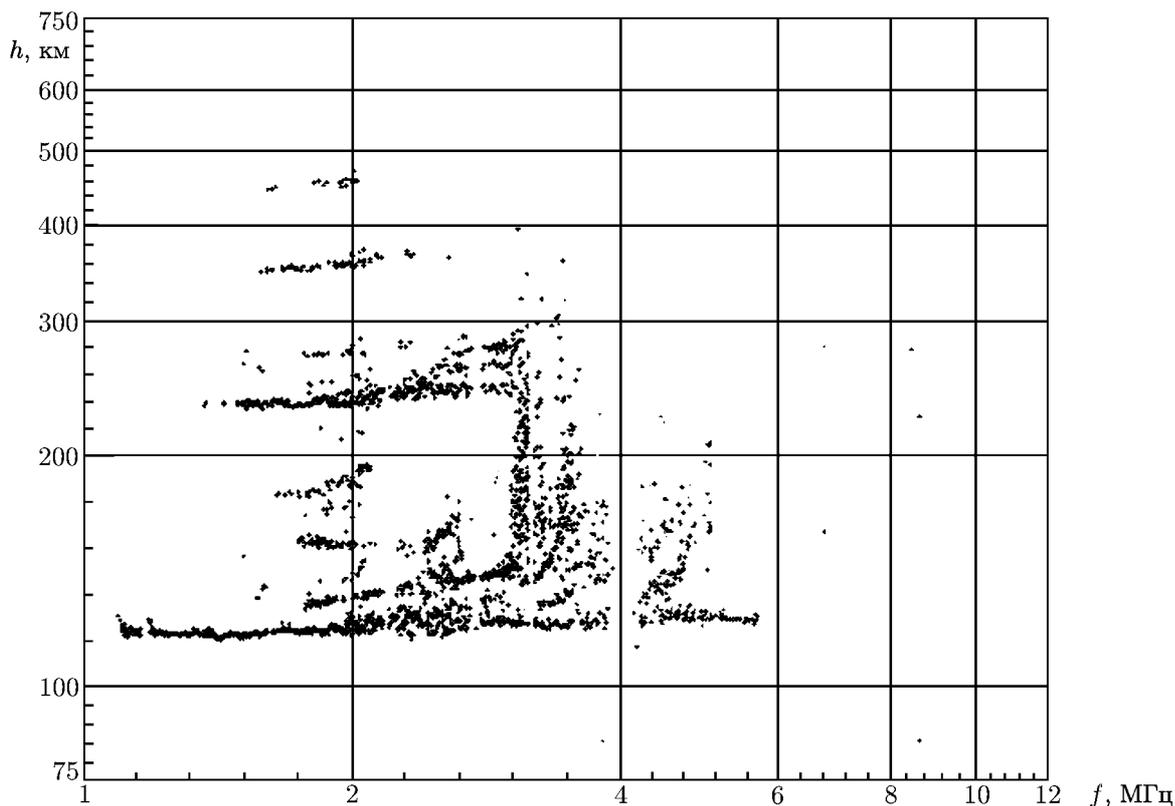


Рис. 7. Ионограмма вертикального зондирования ионосферы по данным ионозонда в г. Тромсё в 19:18 UT 3 марта 2009 года во время пролёта над ним спутника DEMETER. Обозначения те же, что на рис. 3

ле времени от 19:16:48 до 19:16:58 UT также наблюдалось увеличение интенсивности шумов в диапазоне частот $800 \div 1200$ Гц, хотя нельзя исключить, что оно носило естественный характер.

Выполненные оценки и анализ всего объёма экспериментальных данных, полученных со спутника DEMETER в 2009–2010 годах, показывают, что во время рассматриваемого события 3 марта 2009 года регистрировалась именно ионосферная демодуляция амплитудно-модулированного сигнала волны накачки, а не воздействие мощного КВ радиоизлучения на вход приёмника очень низкочастотного диапазона. Более детальное рассмотрение возникающих здесь вопросов, как и анализ имеющихся данных других экспериментов, осуществлённых с помощью спутника DEMETER, выходит за рамки настоящей работы и будет представлено в отдельной публикации.

Таким образом, в эксперименте 3 марта 2009 года под действием модулированного мощного КВ радиоизлучения возникала модуляция ионосферной проводимости в облучаемой области аврорального электроджета, т. е. горизонтальных токов на высотах E -области, на частоте модуляции мощного КВ радиоизлучения, равной 1178 Гц. Вследствие этого появлялся нелинейный переменный ток, который являлся искусственным ионосферным источником низкочастотного радиоизлучения. Из представленной на рис. 8 спектрограммы хорошо видно появление искусственного крайне низкочастотного радиоизлучения.

Суммируя результаты измерений, полученных с помощью спутника DEMETER в период проведения нагревного эксперимента на комплексе в г. Тромсё 3 марта 2009 года, можно сделать следующее заключение. Регистрация излучения на частоте модуляции мощного КВ радиоизлучения, равной 1178 Гц, генерирующегося в результате демодуляции последнего в ионосфере (эффект Гетманцева), является неоспоримым экспериментальным фактом и подтверждает ранее

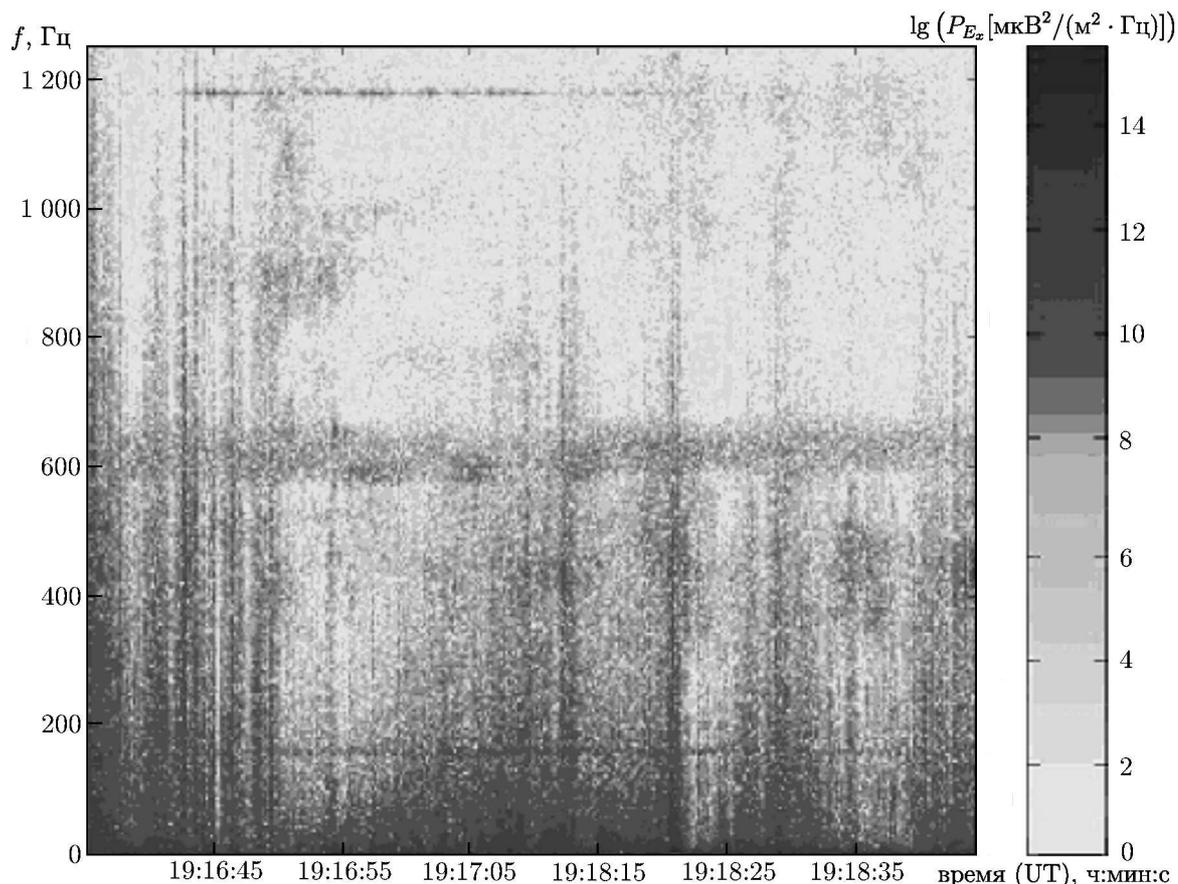


Рис. 8. Спектрограмма интенсивности поперечной к направлению геомагнитного поля компоненты электрического поля $E_x(t)$, P_{E_x} , зарегистрированная детектором электрического поля спутника DEMETER при его пролёте над искусственно возмущённой областью ионосферы над г. Тромсё во время эксперимента 3 марта 2009 года. Мощная модулированная короткая радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода) излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 4040 кГц. Частота модуляции была равна 1178 Гц

выполненные исследования на нагревных стендах «Сура» [20–22] и EISCAT/Heating [23]. Излучение регистрировалось в вечерние часы во время авроральной суббури средней интенсивности, когда в ионосфере над г. Тромсё наблюдался интенсивный диффузный спорадический E-слой. Выполненные измерения позволили чётко определить границы возможной области детектирования модулированного мощного КВ радиоизлучения на высоте орбиты спутника, что, вместе с ранее полученными в г. Тромсё экспериментальными данными [23], даёт необходимый материал для развития модели генерации крайне низкочастотного излучения и его распространения во внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные координированные спутниковые и наземные наблюдения эффектов модификации высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating, выполненные в марте и октябре–ноябре 2009 года в эпоху минимума солнечной активности с использованием технических средств Европейской научной ассоциации EISCAT, позволили получить следующие основные результаты.

Измерения с помощью радара некогерентного рассеяния характеристик радиоволн в г. Тромсё свидетельствуют о выносе ионов из высокоширотной F -области ионосферы в магнитосферу, инициированном воздействием мощного КВ радиоизлучения. Вынос ионов сопровождался экстремально сильным возрастанием температуры электронов и тепловым расширением плазмы в широком диапазоне высот от 180 до 500 км и повышением электронной концентрации, свидетельствующим о наличии потоков электронов, ускоренных до энергий, способных привести к повышению электронной плотности. В период проведения нагревного эксперимента 11 марта 2009 года в г. Тромсё спутником DMSP F15 на высоте порядка 840 км зарегистрировано возрастание примерно на 6% концентрации ионов O^+ в течение 10 с на интервале времени примерно с 15:26:08 до 15:26:18 UT. Вынос ионов, регистрируемый с помощью радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё, и возрастание концентрации ионов O^+ по данным измерений со спутника DMSP F15 наблюдались в вечерние часы при непрерывном нагреве F -области ионосферы мощным КВ радиоизлучением O -поляризации при абсолютно спокойных фоновых геофизических условиях.

На спутнике CHAMP в период проведения нагревного эксперимента в г. Тромсё 5 ноября 2009 года, выполненного в дневные часы при спокойных магнитных условиях, зарегистрировано сверхнизкочастотное излучение на частоте модуляции (равной 3 Гц) мощного КВ радиоизлучения O -поляризации, генерирующееся в результате его демодуляции в ионосфере. В этот период, согласно наземным измерениям с помощью радара некогерентного рассеяния в г. Тромсё и по данным системы радаров CUTLASS в Финляндии и Исландии, происходил сильный нагрев электронов и генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, появление которых является типичным явлением в области верхнегибридного резонанса.

На спутнике DEMETER в период проведения нагревного эксперимента в г. Тромсё 3 марта 2009 года зарегистрировано крайне низкочастотное излучение на частоте модуляции мощного КВ радиоизлучения, равной 1 178 Гц. Крайне низкочастотное излучение регистрировалось на протяжении примерно 330 км вдоль орбиты спутника. Область его наиболее высокой интенсивности была приблизительно симметрична относительно центра возмущённой магнитной трубки. Период максимального сближения орбиты спутника с осью возмущённой магнитной трубки совпадал по времени с максимумом авроральной суббури средней интенсивности, которая характеризовалась возмущениями магнитного поля на величину порядка 250 нТ. Характерной особенностью состояния ионосферы в этот период по данным вертикального зондирования в г. Тромсё явилось наличие очень интенсивного диффузного спорадического E -слоя с кратными отражениями.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Европейской научной ассоциации EISCAT за помощь в проведении экспериментов в г. Тромсё. Функционирование системы радаров CUTLASS в Финляндии и Исландии поддерживается Советом по науке и технологиям Великобритании (грант PP/E007929/1), а также Финским метеорологическим институтом и Шведским институтом космической физики. Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Геофизика» и РФФИ (гранты 07-05-00167а и 08-02-00171а). Работа Т. Йомана поддержана Советом по науке и технологиям Великобритании (грант ST/H002480/1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К., Ритвельд М. Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 571.
2. Rietveld M. T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 577.
3. Milikh G. M., Mishin E., Galkin A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 17. Art. no. L18102.
4. Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. // Adv. Space Res. 2002. V. 30, No. 2. P. 129.

5. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. P. 761.
6. Parrot M. // *J. Geodyn.* 2002. V. 33. P. 535.
7. Foster C., Lester M., Davies J. A. // *Ann. Geophys.* 1998. V. 16. P. 1144.
8. Wahlund J.-E., Opogenoorth H. J., Häggström I., et al. // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 3019.
9. Forme F. R. E., Fontaine D. // *Ann. Geophys.* 1999. V. 17. P. 190.
10. Благовещенская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 2001.
11. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2003. V. 108, No. 4. P. 1141.
12. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kornienko V. A., et al. // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23, No. 1. P. 87.
13. Blagoveshchenskaya N. F., Kornienko V. A., Borisova T. D., et al. // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38. P. 2495.
14. Milikh G. M., Papadopoulos K., Shroff H., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. Art. no. L17104.
15. Гетманцев Г. Г., Зуйков Н. С., Котик Д. С. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 1974. Т. 20. С. 229.
16. Milikh G. M., Papadopoulos K., McCarric M., Preston J. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1999. Т. 42, № 8. С. 728.
17. Stubbe P. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1996. V. 58. P. 349.
18. Stubbe P., Копка Н. // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. P. 2319.
19. Robinson T. R., Strangeway R., Wright D. M., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3165.
20. Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
21. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
22. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2008. Т. 51, № 11. С. 915.
23. Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2008. Т. 51, № 11. С. 925.

Поступила в редакцию 23 апреля 2010 г.; принята в печать 27 февраля 2011 г.

MODIFICATION OF THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE BY POWERFUL HF RADIO WAVES. 2. RESULTS OF COORDINATED SATELLITE AND GROUND-BASED OBSERVATIONS

*N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, V. A. Kornienko, M. T. Rietveld, T. K. Yeoman,
D. M. Wright, M. Rother, H. Lühr, E. V. Mishin, C. Roth, V. L. Frolov, M. Parot, and J. L. Rauch*

We present the results of coordinated satellite and ground-based observations of the high-latitude ionospheric phenomena induced by high-power high-frequency (HF) radiation. The ion removal phenomenon accompanied by a strong increase in the electron temperature and thermal expansion of plasma was observed in the evening hours, when the high-latitude ionospheric F region is heated by high-power O-mode HF radiation. The MDSP F15 satellite recorded an increase in the ion density O^+ at an altitude of about 850 km in that period. Extremely low-frequency (ELF) radiation at the modulation frequency 3 Hz of high-power HF radiation generated in the ionosphere irradiated by high-power O-mode HF radiation and accompanied by a strong increase in the electron temperature and the generation of artificial small-scale ionospheric irregularities was recorded from by the CHAMP satellite

Н. Ф. Благовещенская, Т. Д. Борисова, В. А. Корниенко и др.

during the heating experiment in Tromsö in November 5, 2009. The results of the DEMETER satellite observations of ELF radiation at the modulation frequency 1178 Hz of high-power radiation in the heating experiments were analyzed using the event of March 3, 2009 as an example.