

УДК 550.388.2

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДИАПАЗОНА $Pc4$ ОТ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ КВ НАГРЕВНОГО СТЕНДА EISCAT/Heating

© 2013 г. Т. Д. Борисова¹, Н. Ф. Благовещенская¹, И. М. Иванова¹, М. Т. Риетвельд²

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

²EISCAT, Тромсе дивизион, г. Тромсе, Норвегия

e-mail: borisova@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 21.03.2011 г.

После доработки 10.01.2012 г.

Работа посвящена исследованиям процессов взаимодействия ионосферы и магнитосферы Земли, при возбуждении искусственных возмущений в F -области авроральной ионосферы нагревным стендом EISCAT/Heating. Эксперимент проводился в дневное время при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения стенда. Одновременными измерениями методом ракурсного рассеяния радиоволн и наземными магнетометрами зарегистрированы волновые возмущения с периодами (130–140) с, соответствующими пульсациям $Pc4$. Вариации сдвига доплеровской частоты были коррелированы с изменениями мощности стенда. При анализе использованы результаты измерений радаром некогерентного рассеяния радиоволн на частоте 930 МГц (г. Тромсе) и численных расчетов. Показано, что ионосферная скорость дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей была модулирована магнитосферными волнами Альвена. Рассмотрена возможность воздействия мощного КВ радиоизлучения на амплитуду альфвеновской волны за счет модификации коэффициента отражения ионосферных торцов магнитосферного резонатора и генерации исходящей альфвеновской волны над областью локального усиления ионосферной проводимости.

DOI: 10.7868/S0016794013010045

1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с первых экспериментов по модификации мощным КВ радиоизлучением ионосферы Земли, было установлено, что вблизи высоты отражения волны накачки (ВН) o -моды поляризации при ее резонансном взаимодействии с плазмой F -слоя ионосферы происходит возбуждение искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) различной природы. Одним из наиболее значимых проявлений ИИТ является генерация вытянутых вдоль геомагнитного поля искусственных неоднородностей плотности плазмы в широком диапазоне поперечных к полю масштабов l_{\perp} от долей метра до десятков километров [Ютло и Коэн, 1973; Stubbe, 1996; Благовещенская 2001; Гуревич, 2007; и литература цитируемая в них].

Геомагнитные пульсации представляют собой короткопериодные колебания геомагнитного поля, характеризуются квазипериодической структурой. Пульсации с периодами 0.2–600 с относятся к диапазону УНЧ (ультранизкочастотных волн в диапазоне 1–500 мГц). Исследования магнитных пульсаций на ионосферных высотах при использовании КВ нагревных комплексов выполняются или когерентными КВ радарными, или/и методом ракурсного (или обратного) рассеяния

диагностических КВ сигналов на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях (МИИН) с $l_{\perp} \in (1–30)$ м как в среднеширотной [Blagoveshchenskaya et al., 1998a; Урядов и др., 2004], так и в высокоширотной ионосфере [Yeoman et al., 1997; Blagoveshchenskaya et al., 1998b; Борисова и др., 2011].

Важную роль во взаимодействии ионосфера – магнитосфера играют альфвеновские волны, которые эквивалентны изменяющимся во времени продольным токам геомагнитного поля. Альфвеновские волны УНЧ диапазона, вызванные магнитосферными процессами, могут быть зарегистрированы в нижней ионосфере. Квази-периодические колебания сдвига доплеровской частоты, измеренные когерентными КВ радарными или/и методом ракурсного рассеяния коррелируют с геомагнитными пульсациями, которые являются отличительным признаком проявления магнитосферных альфвеновских волн на высотах ионосферы. Изучение ионосферно-магнитосферных связей при исследовании геомагнитных пульсаций, и возможностей воздействия на них с помощью мощных КВ радиоволн представлено в ряде работ [Robinson et al., 2000; Blagoveshchenskaya et al., 2005; Leyser and Wong, 2009].

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Модификация ионосферы производилась в дневные часы 3 ноября 2009 г. с помощью КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating, [Rietveld et al., 1993], расположенного в Норвегии недалеко от г. Тромсе. Мощная КВ радиоволна обыкновенной (σ -моды) поляризации излучалась на частоте $f_H = 4912.8$ кГц 10 мин нагрев/5 мин пауза со ступенчатым изменением мощности стенда в цикле нагрева по схеме: 10, 25, 100, 25, 10% от максимальной эффективной мощности излучения $P_{\text{эфф макс}} = 190\text{--}210$ МВт. Диаграмма направленности антенны КВ нагревного комплекса была наклонена в направлении магнитного поля Земли.

Прием диагностических сигналов, рассеянных на МИИН, осуществлялся методом ракурсного рассеяния на обсерватории Арктического и антарктического научно-исследовательского института “Горьковская”, расположенной вблизи г. С.-Петербурга. Для регистрации КВ сигналов использовался многоканальный КВ доплеровский комплекс [Благовещенская, 2001]. Измерения выполнялись на диагностической трассе Прага–Тромсе–С.-Петербург, частота $f_{\text{диагн}} = 17545$ кГц. Одновременно проводился прием сигналов на частоте излучения комплекса EISCAT/Heating – $f_H = 4912.8$ кГц. Диаграмма направленности приемной антенны ориентирована на Тромсе. Карта эксперимента приведена на рис. 1.

Состояние окружающей среды в период эксперимента контролировалось следующими средствами: активным (приемо-передающий) радаром некогерентного рассеяния (НР) радиоволн на частоте 930 МГц г. Тромсе; магнитометрами IMAGE сети Скандинавии <http://www.space.fmi.fi/image/>, станцией вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы г. Тромсе. При анализе и интерпретации результатов наблюдений использовались измерения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на спутнике ACE.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В данной работе рассматривается нагревной цикл излучения комплекса EISCAT/Heating 3 ноября 2009 г. с 12:15 до 12:25 UT (время мировое), когда одновременными ионосферными и наземными наблюдениями были зарегистрированы пульсации диапазона Pc4 с периодами около 2 минут (130–140) с.

Измерения выполнялись в эпоху минимума солнечной активности. Относительное число солнечных пятен W имело нулевое значение. Магнитные условия были спокойными. Трехчасовой индекс магнитной возмущенности $K_p = 0+$, сумма K_p за сутки $\Sigma K_p = 1-$.

Станция вертикального зондирования ВЗ ионосферы (ионозонд) в г. Тромсе обеспечивала получение ионограмм ВЗ 1 раз в 4 минуты. По данным ВЗ непосредственно в месте расположения КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating с 12:00 до 12:30 UT наблюдался ионосферный слой F2 с критическими частотами $f_oF2 \sim 5.0\text{--}5.5$ МГц. Критические частоты слоя E в рассматриваемый период не превышали 1.7 МГц.

На рисунке 2 показаны динамические доплеровские спектры (сонограммы) КВ радиосигналов, принятых на НИС “Горьковская” 03.11.2009 г. в период 12:11–12:29 UT методом ракурсного рассеяния. Нулевое значение сдвига доплеровской частоты $f_d = 0$ (рис. 2) соответствует распространению сигналов от передатчика к приемнику по дуге большого круга (“прямой” сигнал). В период нагревного цикла был использован режим ступенчатого изменения эффективной мощности стенда $P_{\text{эфф}}$ по схеме: 10, 25, 100, 25, 10% (2 минуты при каждом уровне мощности) от максимального значения мощности $P_{\text{эфф макс}} = 190\text{--}210$ МВт. Время излучения стенда с 12:15 до 12:25 UT отмечено скобкой на оси времени рис. 2б, которая качественно демонстрирует изменение уровня $P_{\text{эфф}}$.

На рисунке 2а приведена сонограмма КВ нагревного сигнала комплекса EISCAT/Heating на частоте $f_H = 4912.8$ кГц. С 12:15 до 12:25 UT на сонограмме кроме прямого нагревного сигнала регистрировалась широкополосная спектральная компонента в полосе частот Δf_{Sdopl} , вызванная рассеянием на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, МИИН. Из рис. 2а можно видеть коррелированные вариации Δf_{Sdopl} каждые 2 минуты цикла нагрева, связанные с переключением уровня $P_{\text{эфф}}$. Средние за 2 минуты значения частотной полосы Δf_{Sdopl} нагревного сигнала составили (12, 15, 29, 20, 13) Гц при изменении мощности $P_{\text{эфф}} = (10, 25, 100, 25, 10)\%$ от $P_{\text{эфф макс}}$. В результате дополнительной обработки определили средние значения (на уровне 0.5 от максимума) спектральных амплитуд S_{Sdopl} нагревного сигнала. Средние на двухминутных интервалах значения S_{Sdopl} , также менялись с переключением мощности стенда $P_{\text{эфф}}$ и составили (20, 33, 100, 33 и 10)% от величины максимальной спектральной амплитуды $S_{\text{Sdopl макс}}$, наблюдаемой при $P_{\text{эфф}} = P_{\text{эфф макс}}$.

На рисунке 2б представлена сонограмма радиосигнала диагностической частоты $f_{\text{диагн}} = 17545$ кГц на трассе Прага–Тромсе–С.-Петербург. В цикле излучения с 12:15 до 12:25 UT наблюдались интенсивные ракурсно-рассеянные на МИИН сигналы. Сдвиг доплеровской частоты f_d рассеянных сигналов относительно прямого сигнала имел как положительные, так и отрицательные значения. Как видно из рис. 2б, рассеянные сигналы на частоте

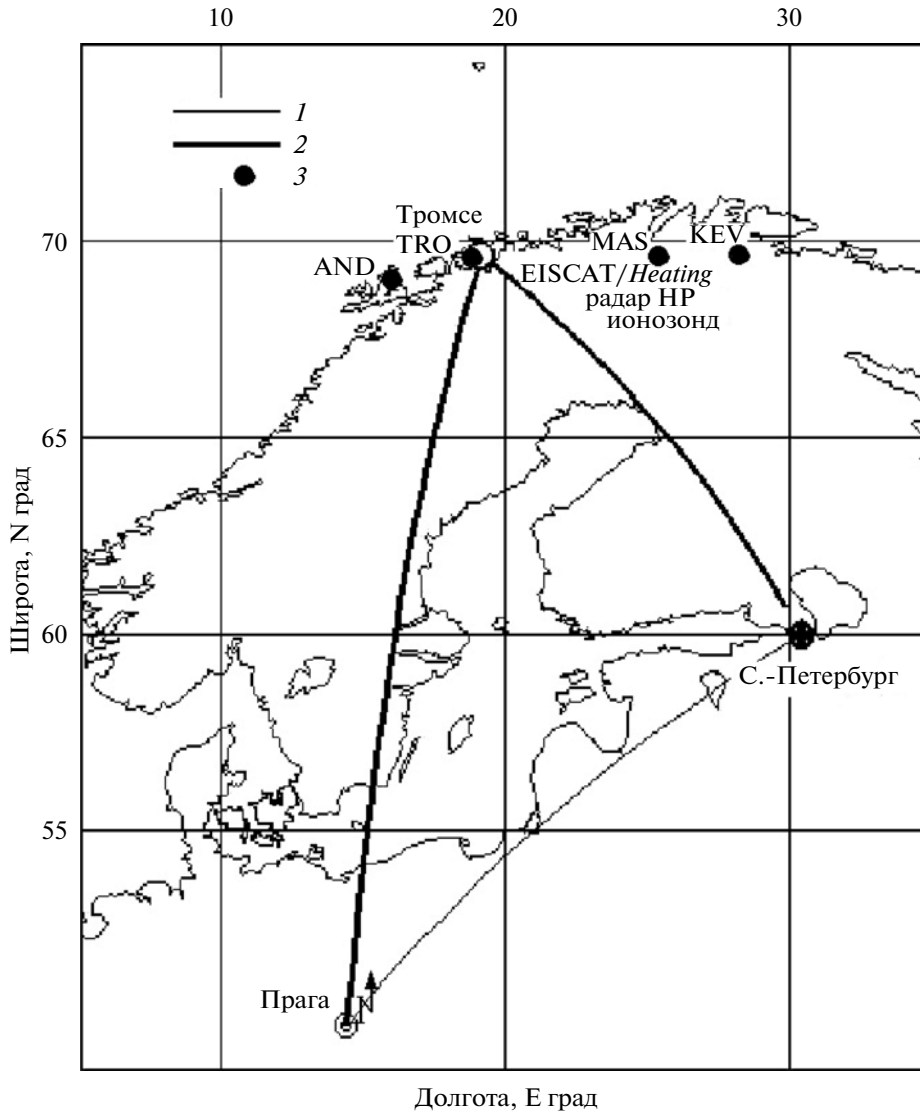


Рис. 1. Карта – схема геометрии эксперимента 3 ноября 2009 г. Наблюдения выполнены методом ракурсного рассеяния на трассе Прага–Тромсе–С.-Петербург и непосредственные наблюдения нагревного сигнала на трассе Тромсе–С.-Петербург. 1 – трасса прямого распространения КВ сигнала, 2 – трасса ракурсного рассеяния, 3 – наземные магнитометры.

$f_{\text{диагн}} = 17545$ кГц появились сразу после начала нагревного цикла, т.е. при 10% уровне мощности стенда EISCAT. Значения доплеровских частот f_d рассеянных сигналов на сонограмме (рис. 2б) формируют трек, характеризующийся волновыми вариациями относительно $f_d = 0$. С ростом $P_{\text{эфф}}$ наблюдалось увеличение амплитуды вариаций ($f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}}$) сдвига доплеровской частоты и при снижении $P_{\text{эфф}}$ – уменьшение ($f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}}$).

В таблице сведены характеристики волновых вариаций f_d ракурсно-рассеянного КВ радиосигнала частоты $f_{\text{диагн}}$ передатчика из Праги, в зависимости от уровня мощности $P_{\text{эфф}}$ комплекса EISCAT/Heating. Приведены значения, усредненных на 2-х минутных интервалах, следующих параметров:

период T , амплитуда ($f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}}$), частотный диапазон спектральной компоненты Δf_{Sdopl} и относительная интенсивность спектральной амплитуды S_{Sdopl} .

Из таблицы можно видеть, что амплитуда ионосферной волны ($f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}}$) менялась при изменении $P_{\text{эфф}}$, но период пульсаций T при этом оставался приблизительно постоянным. Максимальное значение ($f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}} = 13.5$ Гц зарегистрировано при $P_{\text{эфф}} = 100\%$. Периоды волновых вариаций f_d составили 130–140 с. Переключение эффективной мощности стенда приводило к коррелированному изменению интенсивности спектральной амплитуды S_{Sdopl} сигналов, рассеянных на МИИН (на рис. 2б представлено яркостью сигнала). Наблюдается относительно небольшое увеличение

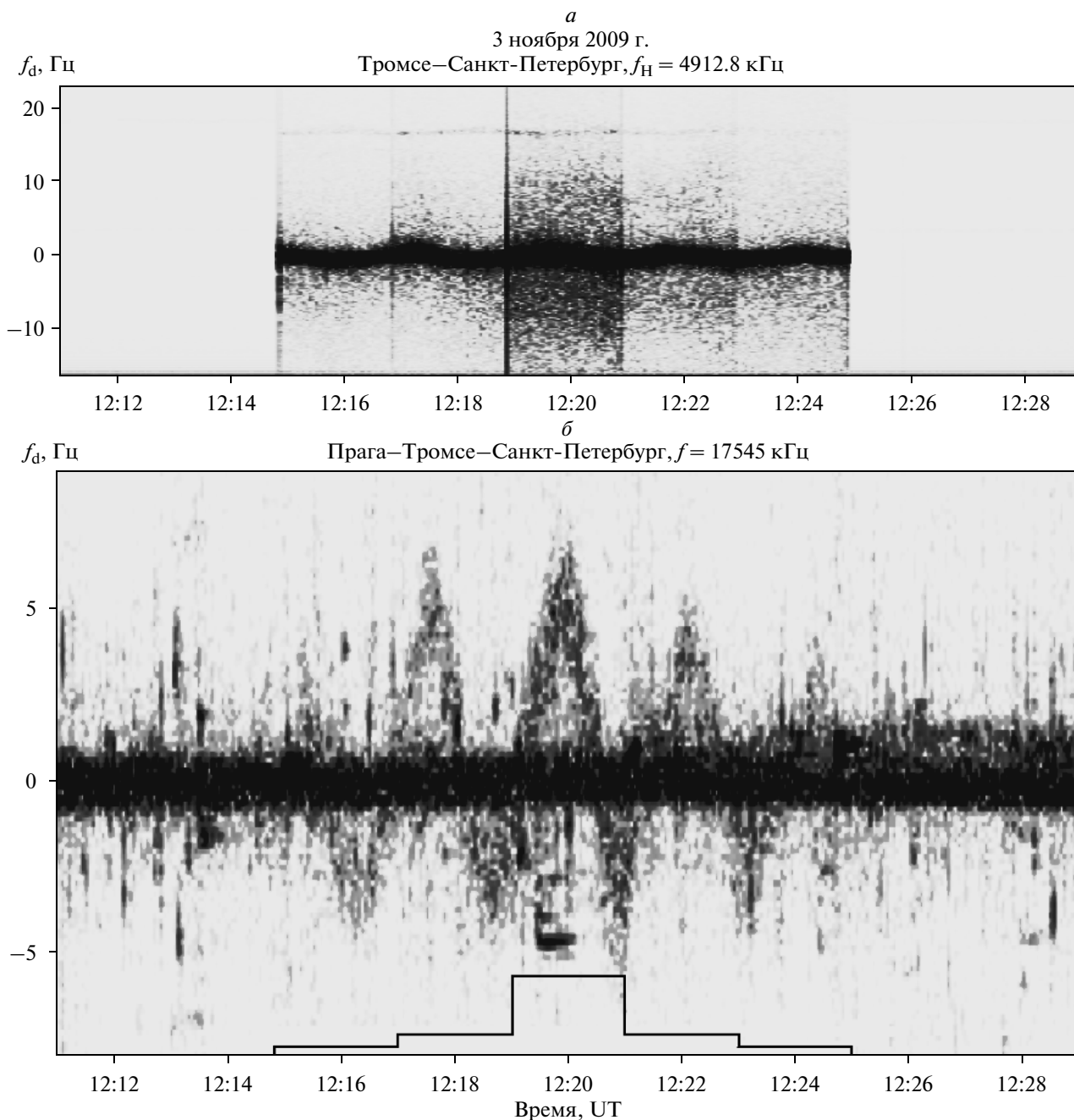


Рис. 2. Сонограммы КВ радиосигналов, зарегистрированные 3 ноября 2009 г. с 12:11 до 12:29 УТ на трассах (а) Тромсе–С.-Петербург и (б) Прага–Тромсе–С.-Петербург. Распространению сигнала по дуге большого круга между приемником и передатчиком соответствует $f_d = 0$.

ширины полосы ракурсно–рассеянных сигналов $\Delta f_{S_{dop1}}$ при максимальной мощности комплекса EISCAT $P_{эфф} = 100\%$.

Данные, представленные на рис. 2б и табл. 1, демонстрируют корреляцию в изменениях эффективной мощности $P_{эфф}$ стэнда EISCAT/Heating и характеристик волнового процесса, наблюдаемого методом ракурсного рассеяния, таких как $(f_{dmax} - f_{dmin})$ и $S_{S_{dop}}$.

Во время эксперимента 3 ноября 2009 г. проводились ионосферные измерения с помощью радар некоррелированного рассеяния (НР) радиоволн на частоте 930 МГц в г. Тромсе [Rishbeth and van Eyken, 1993]. В результате наземной диагностики радаром НР измерялись пространственно-временные распределения параметров ионосферной плазмы вдоль направления магнитного поля. В работе проведен анализ временных вариаций данных тем-

Характеристики волновых вариаций сдвига доплеровской частоты f_d ракурсно-рассеянного диагностического КВ радиосигнала на трассе Прага–Тромсе–С.-Петербург

Интервал времени нагрева, UT	$\% \cdot P_{\text{эфф}}$	T_e , с по данным наблюдений допл. методом	$(f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}})$, Гц	Δf_{Sdopl} , Гц	S_{Sdop}	V_d , м/с	E , мВ/м	δB , нТл
12:15–12:17	10	130	5.2	0.5–2	22	23	1.2	0.08
12:17–12:19	25	140	6.7	~2	50	29	1.5	0.1
12:19–12:21	100	135	9.0	1–2.5	100	40	2.0	0.13
12:21–12:23	25	135	6.2	1.5–2	50	27	1.4	0.09
12:13–12:25	10	130	~4	1.5–2	33	17	0.9	0.06

Примечания: Период T_e , амплитуда $(f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}})$, частотный диапазон спектральной компоненты Δf_{Sdopl} , средний уровень спектральных амплитуд S_{Sdop} и оценки значений доплеровской скорости V_d , напряженностей электрического E и магнитного δB полей в зависимости от эффективной мощности стенда EISCAT/Heating 3 ноября 2009 г.

пературы электронов T_e и электронной концентрации N_e ионосферы в диапазоне высот 100–500 км. На рисунке 3 представлены профили высотных распределений $T_e(h)$ (рис. 3а) и $N_e(h)$ (рис. 3б) для периода 12:13–12:27 UT. Приведенные данные измерений усреднены на 2х-минутных интервалах, связанных с переключением $P_{\text{эфф}}$ стенда EISCAT/Heating в цикле нагрева. Показаны также профили $T_e(h)$ и $N_e(h)$ до начала цикла нагрева с 12:13 до 12:15 UT и после окончания цикла нагрева с 12:25 до 12:27 UT. По результатам измерений $T_e(h)$ радаром НР в период работы стенда EISCAT/Heating с 12:15 до 12:25 UT наблюдался сильный разогрев ионосферной плазмы в диапазоне высот от 160 до 280 км. При всех уровнях мощности нагревного стенда максимальные возмущения температуры электронов T_e регистрировались на вы-

соте $h_{\text{max } T_e} \approx 200$ км. Перед началом нагрева значения T_e на высоте 200 км составляли около 1300 К. Хорошо виден ступенчатый характер типа “гистерезис” изменений максимальных значений T_e : 2000, 2550, 3650, 2950, 2300 К в зависимости от $P_{\text{эфф}}$: 10, 25, 100, 25, 10% соответственно. После окончания нагрева T_e составило 1450 К и установилось на значении 1300 К в течение 5 минут.

Из рисунка 3б можно видеть, что изменения $N_e(h)$ -профилей в цикле нагрева также зависят от уровня мощности $P_{\text{эфф}}$. Максимальные значения $N_e(h)$ -профилей возросли (уменьшались) вместе с увеличением (понижением) $P_{\text{эфф}}$. При 100% уровне мощности нагревного комплекса наблюдалось максимальное увеличение $\delta N_e/N_e \sim (8-9)\%$ по сравнению с уровнем до начала нагревного цикла.

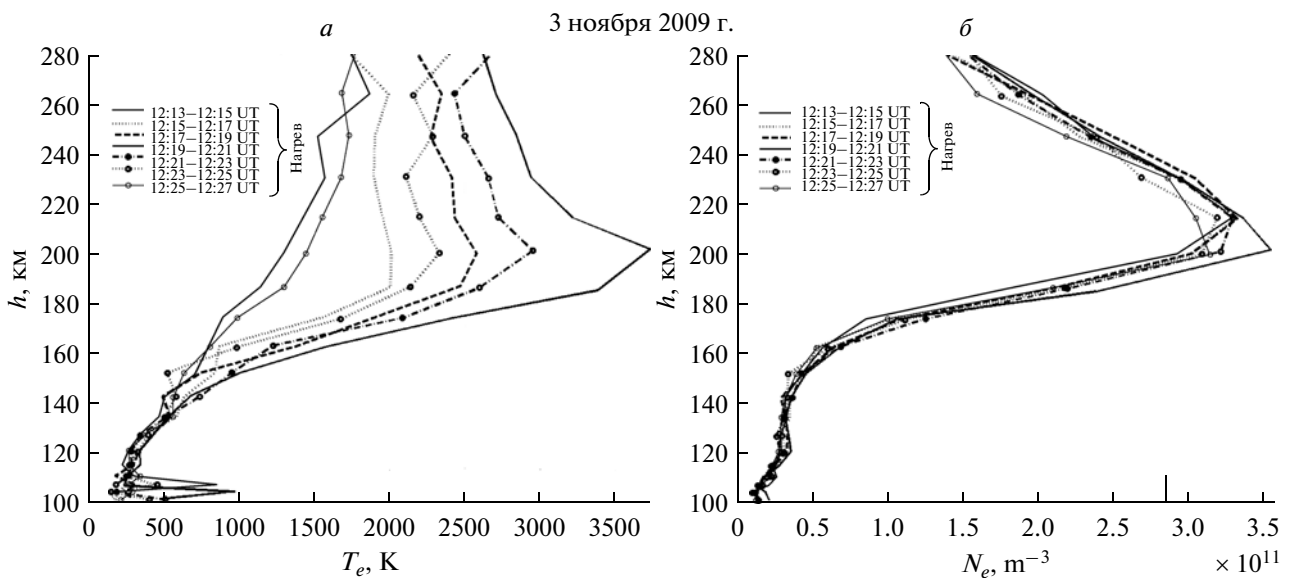


Рис. 3. Высотные профили (а) температуры электронов $T_e(h)$ и (б) электронной плотности $N_e(h)$ 3 ноября 2009 г. для 2-х минутных интервалов в период с 12:13 до 12:27 UT, построенные по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) в Тромсе.

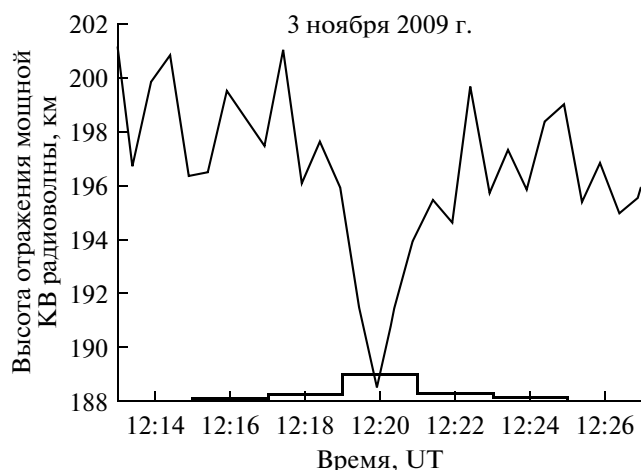


Рис. 4. Изменения высоты отражения КВ нагревного сигнала $f_H = 4912.8$ кГц комплекса EISCAT/Heating от времени 3 ноября 2009 г. по данным радара HP в Тромсе.

Отметим влияние уровня $P_{эфф}$ нагревного стенда не только на экстремальные значения N_e -профиля, но и на его “толщину” в диапазоне высот от 160 до 280 км. На оси абсцисс рис. 3б чертой отмечен уровень электронной концентрации, соответствующий уровню N_e отражения нагревного сигнала $f_H = 4912.8$ кГц стенда EISCAT.

По данным измерений радара HP выполнены расчеты высоты отражения h_N в ионосфере нагревного сигнала $f_H = 4912.8$ кГц от времени (рис. 4). В начале цикла нагрева h_N составила 197–199 км. В период нагрева 12:19–12:21 UT с мощностью $P_{эфф} = 100\%$ уровень h_N понизился на ~10 км, по сравнению с началом нагрева. При последующем уменьшении мощности $P_{эфф}$ наблюдался рост h_N , одновременно с относительным уменьшением N_e на высотах слоя F2.

С 12:15–12:25 UT 3 ноября 2009 г. при ступенчатом изменении $P_{эфф}$ комплекса EISCAT радаром HP наблюдалась коррелированная модификация ионосферного слоя F2: концентрации N_e и температуры T_e электронов в широком диапазоне высот от 160 до 280 км. В первые 2 минуты цикла при 10% нагреве высота расположения максимума $h_{maxTe} \approx 200$ км и при переключении $P_{эфф}$ максимум $T_e(h)$ -профиля располагался на одном уровне — выше уровня отражения сигнала $h_{maxTe} > h_N$ (рис. 3 и 4).

Проведенный анализ данных регистрации спутником ACE (Advanced Composition Explorer) не выявил в поведении параметров межпланетного магнитного поля (ММП, база 1-мин данных OMNI B_x , B_y , B_z компонент ММП, давления P , скорости V и плотности N_p солнечного ветра, http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omsc_min.html) с 10:30 до 12:00 UT 3 ноября 2009 г. резких изменений в ва-

риациях измеряемых параметров. Оценка кинетической задержки наземных наблюдений относительно спутниковых составляла ~55–58 мин.

4. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

По данным наземных наблюдений магнитометрами всех станций IMAGE сети Скандинавии (<http://www.geo.fmi.fi/image/>) с 11:30 до 13 UT в X- и Y-компонентах магнитного поля Земли регистрировались естественные волновые процессы квазисинусоидальной формы с амплитудой около 1–1.5 нТл. Детальный анализ вариаций во времени компонент магнитного поля Земли выполнен по 10-ти секундным измерениям магнитометрами на станциях: Тромсе (аббревиатура TRO), Анденес (AND), Соройя (SOR), Кево (KEV) и Масси (MAS). Спектральный анализ временных вариаций Y-компоненты показал, что с 11:00 до 12:30 UT преобладали колебания с периодами 130 с и 260 с.

На рисунке 5 для сравнения нанесены одно-временные данные измерений сдвига доплеровской частоты f_d на трассе Прага–Тромсе–С.-Петербург и относительных вариаций Y-компоненты (ΔY) магнитного поля Земли, измеренных на станции TRO с 12:13 до 12:26 UT 3 ноября 2009 г. На оси времени фигурной скобкой отмечен интервал времени работы комплекса EISCAT/Heating. Данные доплеровских измерений показывают непосредственную зависимость амплитуды вариаций ($f_{dmax} - f_{dmin}$) от уровня $P_{эфф}$. Дополнительное исследование измерений Y-компонент магнитометрами станций AND, SOR, MAS и KEV, расположенных на геомагнитной широте станции TRO на расстоянии 120, 158, 185 и 310 км соответственно, показало, что наблюдалось подобие в изменении ΔY -компонент на близкорасположенных станциях и вариаций во времени f_d .

По результатам доплеровских измерений ракурсно-рассеянных КВ радиосигналов в период нагревных экспериментов выполнены оценки проекции доплеровской скорости, величин электрического и магнитного полей в зависимости от уровня мощности нагревного стенда. Доплеровская скорость V_d определяется соотношением [Гершман и др. 1984]

$$V_d = \frac{f_d \cdot c}{2f \cdot \sin(\theta/2)}, \quad (1)$$

где f_d — сдвиг доплеровской частоты, f — частота диагностического КВ сигнала, θ — угол рассеяния между волновыми векторами падающей и рассеянной волн, c — скорость света.

Для ориентации трассы Прага–Тромсе–С.-Петербург (рис. 1), в зависимости от знака доплеровского сдвига частоты, измерялась или южная компонента скорости дрейфа неоднородностей (географический азимут $A \sim 167.7^\circ$) при положительном

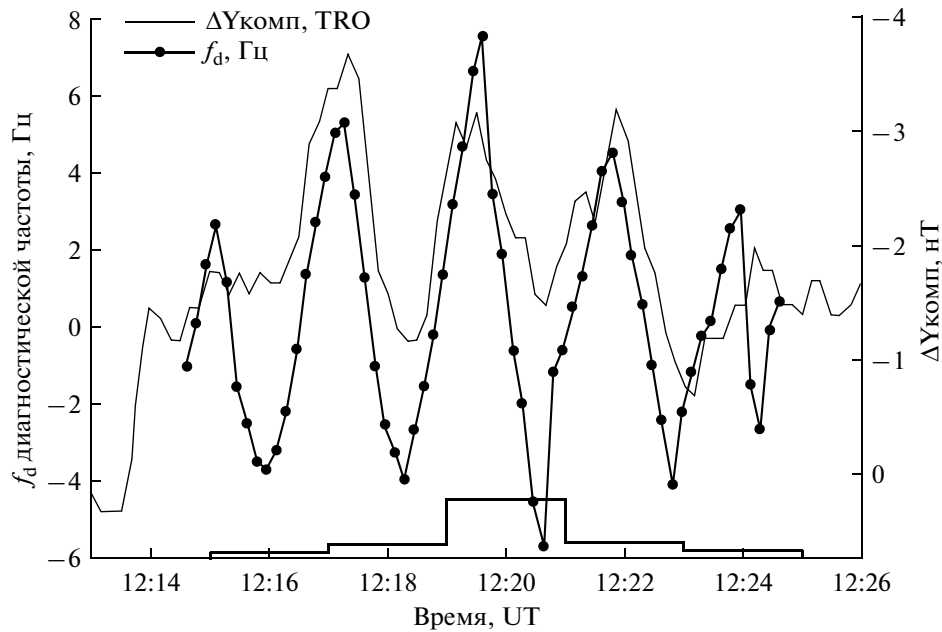


Рис. 5. Данные измерений модуля сдвига доплеровской частоты f_d на трассе Прага–Тромсе–С.-Петербург и относительной вариации ΔY -компоненты геомагнитного поля (Тромсе).

значении $+f_d$, или северная компонента (азимут $A \sim 347.7^\circ$) — при $-f_d$. Выполненные расчеты модуля скорости дрейфа ионосферных неоднородностей представлены в таблице. При увеличении $P_{\text{эфф}}$ от 10 до 100% величина скорости движения ионосферных неоднородностей возросла в 2 раза (23 и 40 м/с).

Изменение амплитуды скорости движения неоднородностей в плазме δV_d связано с магнитным полем волны δB выражением [Франк-Каменецкий, 1968],

$$\delta V_d \approx \frac{\delta B}{\sqrt{4\pi\rho}},$$

где ρ — плотность ионов плазмы ($\rho \approx m_i N_i$, m_i — масса иона и N_i — концентрация ионов). На высотах слоя F от 200 км ионосферная плазма преимущественно представлена ионами O^+ . Результаты расчетов величины магнитного поля поперечной магнитогидродинамической волны УНЧ диапазона представлены в таблице. Для спокойных геомагнитных условий 3 ноября 2009 г. величина δB изменялась от 0.06 до 0.13 нТл.

По доплеровским измерениям выполнена оценка электрического поля E в искусственно возмущенной области ионосферы ИВО F области, в предположении, что скорость дрейфа ионосферных неоднородностей происходит в скрещенных полях и определяется как $E \times B_0$, где B_0 — постоянное магнитное поле Земли. При ступенчатом изменении мощности нагревного стенда значения электрического поля E в верхней ионосфере менялись

во время эксперимента от ~ 1.2 мВ/м (10% $P_{\text{эфф}}$) до ~ 2.0 мВ/м (100% $P_{\text{эфф}}$).

Сопоставление волновых структур, зафиксированных наземными и ионосферными наблюдениями 3 ноября 2009 г. в период модификации ионосферы комплексом EISCAT/Heating с 12:15 до 12:25 UT, показало наличие корреляции в вариациях сдвига доплеровской частоты f_d ракурсно-рассеянного диагностического сигнала и Y -компоненты магнитного поля Земли (магнитометр г. Тромсе), как по периодам, так и по амплитуде (см. рис. 4). Расчетные значения напряженностей электрического E и магнитного δB полей в ИВО (таблица) демонстрируют зависимость от уровня излучения $P_{\text{эфф}}$, нагревного стенда.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

При модификации авроральной ионосферы 3 ноября 2009 г. стендом EISCAT/Heating зарегистрировано появление квазипериодических вариаций f_d ракурсно-рассеянных на МИИН диагностических КВ сигналов с периодами $T = 130$ – 140 с (рис. 2 и 5, таблица), лежащими в диапазоне устойчивых магнитных пульсаций Pc4. Сопоставительный анализ изменений во времени ионосферных пульсаций f_d и вариаций Y -компоненты магнитного поля, измеренного в Тромсе, показал высокую корреляцию (рис. 5). Установлено, что периоды волновых вариаций f_d не зависят от эффективной мощности излучения стенда EISCAT, однако амплитуды вариаций ($f_{d\text{max}} - f_{d\text{min}}$) существенно возрастали при увеличении $P_{\text{эфф}}$.

Магнитометры сети IMAGE регистрировали в вариациях X - и Y -компонент геомагнитного поля естественные пульсации $Pc4$ с амплитудами $\sim 1\text{--}1.5$ нТл в течение 3 часов до начала цикла нагрева ионосферы. Возбуждение и существование естественных пульсаций $Pc4$ характерно для магнитоспокойных условий с максимумом проявления на высоких широтах в предполуденные часы [Клейменова, 2007]. В настоящее время является общепринятым, что дневные пульсации в магнитосфере типов $Pc2\text{--}4$, представляют собой тороидальные альвеновские резонансные колебания силовых линий геомагнитного поля [Chen and Hasegawa, 1974]. Параметры собственных колебаний, которые устанавливаются вдоль силовой линии в магнитосфере (FLR — field line resonances), определяются профилем альвеновской скорости V_A и коэффициентами отражения МГД-волн от “концевых зеркал” резонатора. Характерные частоты колебаний FLR составляют десятки миллигерц. Они известны как короткопериодные пульсации геомагнитного поля и наблюдаются чаще всего в виде узкополосных, квазисинусоидальных цугов вариаций поля в дневное время [Клейменова, 2007].

Важным параметром УНЧ волн является азимутальное волновое число, m , которое может быть использовано для оценки пространственного масштаба волны. Для двух магнитометров, расположенных на одной геомагнитной широте ϕ на расстоянии D км, параметр m можно определить из соотношения [Olson and Rostoker, 1978]

$$m = \frac{2\pi R \Delta\Phi}{360D} \cdot \cos \phi,$$

где R — радиус Земли в километрах, $\Delta\Phi$ — разность фаз в градусах, рассчитанная по данным наблюдений.

Вычисления параметра m были выполнены для условий 3 ноября 2009 г. по данным наблюдений магнитометрами TRO, AND, MAS, SOR, и KEV сети IMAGE, расположенных на близкой геомагнитной широте (см. рис. 1) для периода с 11:55 до 12:42 UT.

В период времени 11:55–12:42 UT величина азимутального числа m составила $m = -2\text{--}-4$ для пар TRO–KEV, $D = 310$ км и AND–KEV, $D = 430$ км. Значения параметра m показали зависимость от рабочего состояния нагрев/пауза стенда EISCAT для близко расположенных магнитометров TRO–AND, $D = 120$ км, TRO–SOR, $D = 158$ км и TRO–MAS, $D = 186$ км. Для этих пар в периоды пауз нагрева стенда $m = -2\text{--}-4$ также как и для удаленных магнитометров, в то время как в цикле нагрева 12:15–12:25 UT параметр m вырос до $+(4\text{--}7)$.

В соответствии с современными представлениями магнитосферные УНЧ волны, которые имеют внешние относительно Земли источники энергии, такие как импульс в солнечном ветре СВ, ударные

волны СВ, или неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе, в общем, характеризуются малыми значениями эффективного азимутального волнового числа m , $|m| < 3\text{--}4$ (или, что эквивалентно, крупномасштабными азимутальными размерами). УНЧ волны с мелкомасштабными азимутальными размерами (как правило, волны с $|m| > 15$) возникают в результате взаимодействия потоков дрейфующих энергичных частиц с собственными колебаниями магнитной силовой линии [Yeoman et al., 2008; Пилипенко, 2006].

Расчет m показал локальное его увеличение в период нагревного цикла 12:15–12:25 UT только по данным магнитометров Тромсе и близкорасположенных к нагревному стенду EISCAT станциям Анденес, Сороя и Маси, что позволяет предположить локализацию возбуждения мелкомасштабных альвеновских волн в ионосфере над Тромсе. Учитывая, что для L -оболочки Тромсе время распространения альвеновской волны между ионосферой и магнитосферой составляет порядка 60–70 с, магнитные и ионосферные пульсации, связанные с альвеновской волной, должны иметь период $T \sim 120\text{--}140$ с, что находится в соответствии с экспериментальными данными.

Нелинейное взаимодействие мощных КВ радиоволн с ионосферной плазмой приводит к модификации ионосферных проводимостей и, следовательно, распределений токов, вследствие изменений температуры T_e и плотности N_e электронов [Ляцкий и Мальцев, 1983; Stubbe, 1996]. Возмущения распределения ионосферных токов вызывают возмущения магнитного поля. Следовательно, информацию о возмущениях ионосферных токов можно получить на основе анализа поляризационных характеристик магнитных вариаций.

Изменения поляризации магнитных пульсаций определяются геометрией ИВО ионосферы, направлением “внешнего” электрического поля и отношением высотно-интегрированных холловской и педерсеновской проводимостей Σ_H/Σ_P . Отметим, что при изменении отношения Σ_H/Σ_P происходит вращение вектора поляризации [Lyatsky et al., 1996]. Поэтому появление “петель” в поляризационных поверхностях является указанием на значительные изменения отношения Σ_H/Σ_P , а следовательно, и ионосферных токов.

На рисунке 6 в качестве примера представлены временные эволюции поляризации магнитных пульсаций (годографы), полученные по данным X - и Y -компонент магнитометров TRO (рис. 6а), SOR (рис. 6б), AND (рис. 6в) и MAS (рис. 6г) 3 ноября 2009 г. в период с 12:13:10 до 12:17 UT. Номера точек с 1 по 11 на годографах относятся ко времени паузы в нагреве ионосферы 12:13:10–12:14:50 UT; номера 12–23 соответствуют первым 2 минутам работы стенда EISCAT (12:15–12:17 UT) с $P_{\text{эфф}} = 10\% \cdot P_{\text{эфф макс}}$. Из рисунка 6 можно видеть,

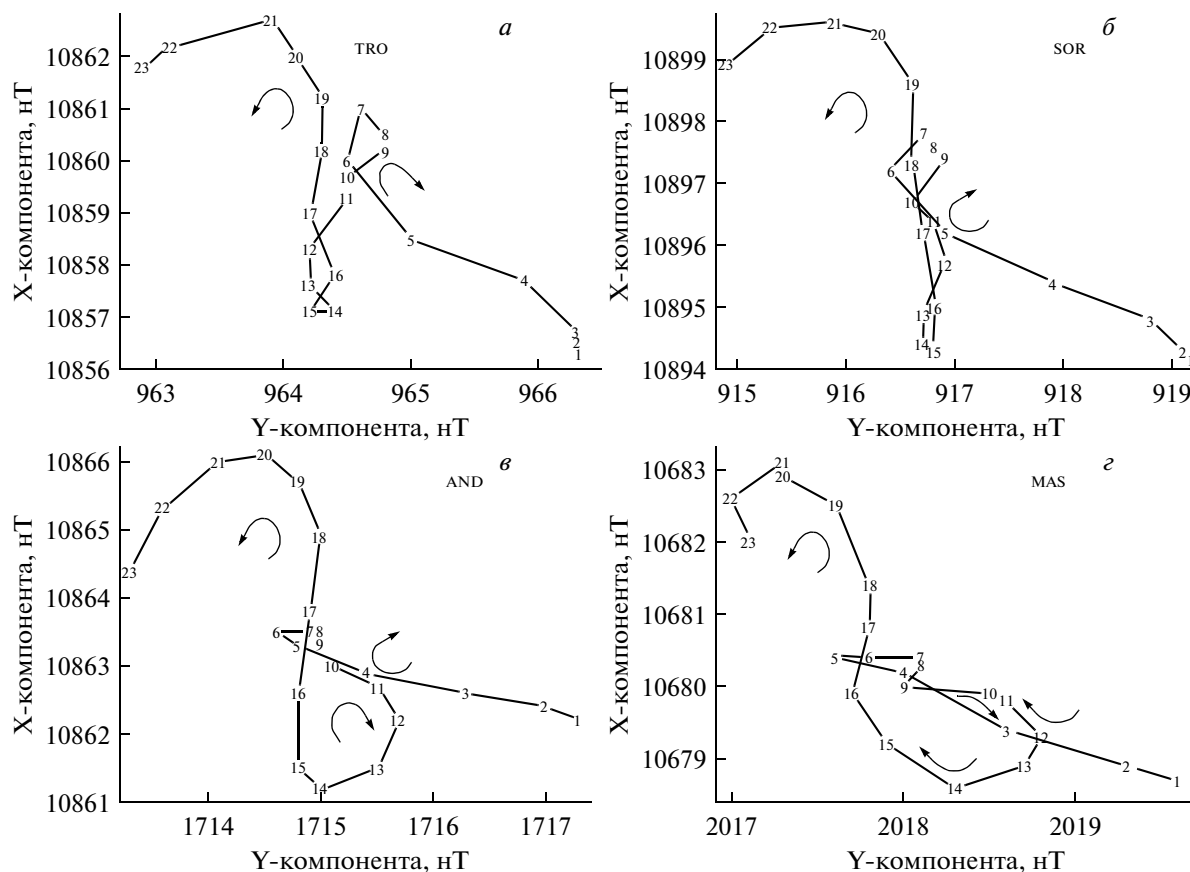


Рис. 6. Годографы магнитного поля по данным IMAGE сети магнитометров 3 ноября 2009 г. с 12:13:10 до 12:17 UT (пауза 12:13:10–12:14:50 UT соответствует измерениям 1–11; нагревной цикл при $P_{эфф} = 10\% \cdot P_{эфф\ макс}$ с 12:15–12:17 UT, измерения 12–23).

что на всех станциях во время паузы 12:13:40–12:14:30 UT формировались “петли” (точки 5–10) без изменения направления вращения поляризации волнового пакета – по часовой стрелке (ЧС). После начала нагрева на годографах станций TRO и SOR (точки 13–16 рис. 6а и 6б, с 12:15:10 до 12:15:40 UT) образовались “петли” сложной формы с последующим обращением направления вращения поляризации магнитных пульсаций от направления ЧС (по часовой стрелке) к направлению ПЧС (против часовой стрелки).

В период нагрева 12:15–12:25 UT по данным годографа магнитометра станции TRO отмечено 4 петли с обращением поляризации. На годографе станции SOR зарегистрировано 2 петли, связанные по времени с включением и выключением нагревного стенда. По данным станции AND петель не было на протяжении всего цикла нагрева. На годографе станции MAS наблюдали максимальное количество появления петель – 5. По данным годографов не выявлено влияния эффектов переключения мощности стенда EISCAT.

Анализ поляризационных характеристик магнитных вариаций свидетельствуют о локальной

модификации горизонтальных ионосферных токов мощными КВ радиоволнами.

Подтверждение о локальной модификации горизонтальных токов получено также по результатам измерений радаром HP на частоте 930 МГц г. Тромсе. На рисунке 7 приведены результаты вычислений по данным работы [Ляцкий и Мальцев, 1983] высотно-интегрированных холловской Σ_n и педерсеновской Σ_p проводимостей по данным ионосферных измерений радаром HP в области высот от 80 до 280 км. Результаты расчетов демонстрируют усиление ионосферной проводимости Σ_p в цикле нагрева 12:15–12:25 UT по сравнению с периодом паузы и зависимость величины Σ_p от уровня мощности нагревного стенда EISCAT $P_{эфф}$. Влияние воздействия мощной КВ радиоволны на значение Σ_n не так очевидно, хотя анализ расчетов высотных распределений проводимостей Холла показывает, что в период нагрева наблюдается возрастание холловской проводимости в два раза на высотах ионосферы от 150 до 220 км.

Область повышенной ионосферной проводимости поляризуется во внешнем электрическом поле, и поляризационное электрическое поле

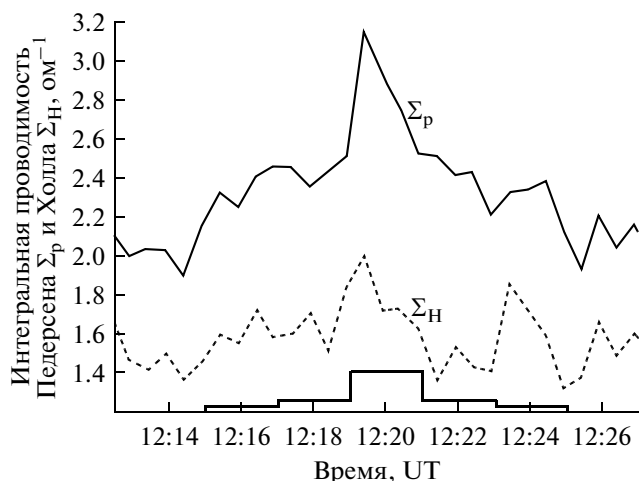


Рис. 7. Вариации высотно-интегрированных холловской Σ_H и педерсеновской Σ_p проводимостей ионосферы в период с 12:13 до 12:27 UT 3 ноября 2009 г., рассчитанные по данным радара НР г. Тромсе для диапазона высот от 80 до 280 км.

распространяется вдоль магнитных силовых линий в магнитосферу в виде выходящей из ионосферы альвеновской волны [Ляцкий и Мальцев, 1983; Lysak, 1990]. Проблема генерации альвеновской волны над круговой неоднородностью возмущенной проводимости при наличии фонового вытекающего из ионосферы продольного тока исследовалась в работе [Kozlovsky and Lyatsky, 1997]. Учитывая результаты работы [Kozlovsky and Lyatsky, 1997], можно ожидать возникновение локальной системы продольных токов альвеновской волны (вытекающего из ионосферы и втекающего), которые замыкаются в ионосфере педерсеновским током.

На наличие вертикальных потоков в искусственно возмущенном объеме ионосферы над Тромсе указывает также факт, что максимальные изменения концентрации N_e и температуры T_e электронов в цикле нагрева происходят на 10–12 км выше уровня отражения h_N нагревной волны (рис. 3 и 4). В настоящее время известно два основных механизма возрастания N_e при воздействии мощных КВ радиоволн на ионосферу [Гуревич и Шварцбург, 1973]: нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса и стимулированная ионизация ускоренными электронами. Оценки, выполненные в работе [Blagoveshchenskaya et al., 2009] для условий нагревных экспериментов в Тромсе, показали, что вследствие нарушения ионизационно-рекомбинационного баланса значения N_e могут увеличиваться от 2.4 до 5.3% относительно невозмущенного уровня. Поэтому в рамках этого механизма невозможно объяснить наблюдаемые 3 ноября 2009 г. возрастания N_e на величину порядка 8–9%. Наиболее вероятным механизмом возрастания N_e является генерация по-

тока ускоренных электронов в поле мощной КВ радиоволны.

Изменения концентрации N_e (8–9%) и температуры T_e (35–65%) электронов в нагревном эксперименте 3.11.2009 г. преобразуют коэффициент отражения R УНЧ волн магнитосферного резонатора на высотах ионосферы, что приводит к изменению амплитуды альвеновских волн. Согласно [Ляцкий и Мальцев, 1983; Ягова и др., 1998] коэффициент отражения альвеновского резонатора можно представить как

$$R = (\Sigma_p - \Sigma_A \sin I) / (\Sigma_p + \Sigma_A \sin I),$$

где Σ_A — волновая проводимость магнитосферы; I — наклонение геомагнитного поля. Для дневных условий 3 ноября 2009 г. значение волновой проводимости $\Sigma_A \sim (0.8–1.0) \text{ Ом}^{-1}$ и увеличение/уменьшение амплитуды альвеновской волны с учетом изменения ионосферной проводимости (рис. 7) при изменении $P_{\text{эфф}}$ от 10 до 100% составило бы (10–40)% в нагревном эксперименте с 12:15 до 12:25 UT. Оценки изменений значений напряженностей электрического поля E , полученные в данный период 12:15–12:25 UT по экспериментальным измерениям доплеровским методом (таблица) составили (30–120)% и в 3 раза больше, чем вариации альвеновской волны, вызванные модификацией коэффициента отражения ионосферных торцов магнитосферного резонатора при изменении мощности стенда EISCAT/Heating. Таким образом, в нагревном эксперименте 3 ноября 2009 г. воздействие на альвеновскую волну происходит не только из-за модификации коэффициента отражения волн R на высотах ионосферы, но и генерацией в ионосфере над областью повышенной проводимости исходящей альвеновской волны в режиме двухминутного переключения мощности стенда EISCAT в условиях существования естественных пульсаций Pc4 с периодами около 130 с.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты комплексных наблюдений пульсаций в диапазоне периодов Pc4 во время нагревного эксперимента 3 ноября 2009 г. с 12:15 до 12:25 UT при использовании режима ступенчатого изменения эффективной мощности излучения $P_{\text{эфф}}$ комплекса EISCAT/Heating.

Выявлена взаимосвязь между переключением $P_{\text{эфф}}$ стенда EISCAT и параметрами доплеровский измерениями.

Обнаружена корреляция изменений во времени ионосферных пульсаций f_d и вариаций Y -компоненты магнитного поля, измеренных наземными магнитометрами г. Тромсе. Параметр m показал локальное увеличение в период нагревного цикла 12:15–12:25 UT до $m = +(4–7)$ по сравнению $m = -(2–4)$ в паузу, что позволяет предполо-

жить локализацию возбуждения мелкомасштабных альвеновских волн в ионосфере над Тромсе. Анализ поляризационных характеристик магнитных вариаций свидетельствовал о локальной модификации горизонтальных ионосферных токов мощными КВ радиоволнами стенда EISCAT. По данным радара HR на частоте 930 МГц (г. Тромсе) выполнены расчеты высотно-интегрированных холловской Σ_n и педерсеновской Σ_p проводимостей. Возмущение ионосферной проводимости явилось причиной возникновения локальной системы продольных токов альвеновской волны (вытекающих из ионосферы и втекающих), которые замыкаются в ионосфере педерсеновским током.

Анализ экспериментальных данных и численных расчетов показал, что наиболее вероятной причиной наблюдаемой волновой активности диапазона Pc4 в зависимости от уровня мощности нагревного стенда EISCAT/Heating 3 ноября 2009 г. является усиление естественных устойчивых пульсаций Pc4 и генерация альвеновской волны в модифицированной ионосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 288 с. 2001.
- Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Корниенко В.А., Ритвельд М. Характеристики пульсаций диапазона Pc4–5, полученные методом ракурсного рассеяния КВ радиоволн с использованием КВ нагревного стенда EISCAT/Heating и наземными магнитометрами // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 51. № 4. С. 630–642. 2011.
- Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука. 392 с. 1984.
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физ. наук. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007.
- Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере // М.: Наука, 276 с. 1973.
- Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации // Модель Космоса: Т. 1 : Физические условия в космическом пространстве // ред.: М. И. Панасюк и др. С. 611–626. 2007.
- Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 278 с.
- Пилипенко В.А. Резонансные эффекты ультра-низкочастотных волновых полей в околоземном пространстве. Автореферат на соискание ученой степени дфмн Д 002.113.03. М.: ИКИ РАН. 34 с. 2006.
- Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Понятов А.А., Фролов В.Л. Радарные наблюдения искусственной ионосферной турбулентности во время магнитной бури. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 47. № 9. С. 722–738. 2004.
- Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 288 с. 1968.
- Ютло У., Коэн Р. Изменение ионосферы под воздействием мощных радиоволн // Успехи физ. наук. 1973. Т. 109. С. 371–387. 1973.
- Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н. Влияние ионосферной проводимости на параметры среднеширотных Pc3–4 пульсаций // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 38. № 2. С. 67–73. 1998.
- Blagoveshchenskaya N.F., Carlson H.C., Kornienko V.A., Borisova T.D., Rietveld M.T., Yeoman T.K., Brekke A. Phenomena induced by powerful HF pumping towards magnetic zenith with a frequency near the F-region critical frequency and the third electron gyro harmonic frequency // Ann. Geophys. V. 27. P. 131–145. 2009.
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kornienko V.A., Thidé B., Rietveld M.T., Kosch M.J., Bösinger T. Phenomena in the ionosphere-magnetosphere system induced by injection of powerful HF radio waves into nightside auroral ionosphere // Ann. Geophysicae. V. 23. P. 87–100. 2005.
- Blagoveshchenskaya N.F., Chernyshev M.Yu., Kornienko V.A. Excitation of small-scale waves in the F region of the ionosphere by powerful HF radio waves // J. Atmos. Terr. Phys. V. 60. P. 1225–1232. 1998a.
- Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Petlenko A.V., Brekke A., Rietveld M.T. Geophysical phenomena during an ionospheric modification experiment at Tromsø // Ann. Geophysicae. V. 16. P. 1212–1225. 1998b.
- Chen L., Hasegawa A. A theory of long period magnetic pulsations 1. Steady state excitation of field line resonances // J. Geophys. Res. V. 79. P. 1024–1032. 1974.
- Kozlovsky A.E., Lyatsky W.B. Alfvén wave generation by disturbance of ionospheric conductivity in the field-aligned current region // J. Geophys. Res. V. 102. № 11. P. 17297–17303. 1997.
- Leyser T.B., Wong A.Y. Powerful electromagnetic waves for active environmental research in geospace // Rev. Geophys. 47, RG1001, doi:10.1029/2007RG000235, 2009.
- Lyatsky W.B., Belova E.G., Pashin A.B. Artificial magnetic pulsation generation by powerful ground-based transmitter // J. Atmos. Terr. Phys. Vol. 58. P. 407–417. 1996.
- Lysak R.L. Electrodynamic coupling of the magnetosphere and ionosphere // Space Sci. Rev. V. 52. P. 33–87. 1990.
- Olson J.V., Rostoker G. Longitudinal phase variation of Pc4–5 micropulsations. // J. Geophys. Res. V. 83. P. 2481–2488. 1978.
- Rietveld M.T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. Introduction to ionospheric heating at Tromsø. – I. Experimental overview // J. Atmos. Terr. Phys. V. 55. P. 577–599. 1993.
- Rishbeth H., van Eyken T., EISCAT: Early history and the first ten years of operation // J. Atmos. Terr. Phys. V. 55. P. 525–542. 1993.
- Robinson T. R., Strangeway R., Wright D.M. et al. FAST observations of ULF waves injected into the magnetosphere by means of modulated RF heating of the auroral electrojet // Geophys. Res. Lett. V. 27. P. 3165–3168. 2000.
- Stubbe P. Review of ionospheric modification experiments at Tromsø // J. Atmos. Terr. Phys. V. 58. P. 349–368. 1996.
- Yeoman T.K., Wright D.M., Robinson T.R., Davies J.A., Rietveld M. High spatial and temporal resolution observations of an impulse-driven field line resonance in radar backscatter artificially generated with the Tromsø heater // Ann. Geophysicae. V. 15. P. 634–644. 1997.
- Yeoman T.K., Baddeley L.J., Dhillon R.S., Robinson T.R., Wright D.M. Bistatic observations of large and small scale ULF waves in SPEAR-induced HF coherent backscatter // Ann. Geophysicae. V. 26. P. 2253–2263. 2008.