

УДК 550.388.2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ ДИАПАЗОНА $Pc4-5$, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ РАКУРСНОГО РАССЕЙЯНИЯ КВ РАДИОВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВ НАГРЕВНОГО СТЕНДА EISCAT/Heating И НАЗЕМНЫМИ МАГНИТОМЕТРАМИ

© 2011 г. Т. Д. Борисова¹, Н. Ф. Благовещенская¹, В. А. Корниенко¹, М. Т. Рьетвельд²¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург²EISCAT, Тромсе дивизион, г. Тромсе, Норвегия

e-mail: borisova@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 24.02.2010 г.

После доработки 17.05.2010 г.

Представлены результаты исследования параметров пульсаций в диапазоне периодов $Pc4-5$ по данным измерений методом ракурсного рассеяния радиоволн с использованием КВ нагревного стенда EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) и наземных магнитометров сети IMAGE (Скандинавия). Наблюдения выполнялись в утренние часы 3 октября 2006 г. при развитии суббури на ночной стороне. Анализ данных наблюдений в период с 10:00 до 10:20 UT показал наличие волновых возмущений с периодами, соответствующими пульсациям $Pc4-5$ (80–240 с). По данным одновременных доплеровских наблюдений на двух трассах реконструировано поведение полного вектора движения ионосферных неоднородностей и напряженности электрического поля в искусственно возмущенной высокоширотной F области ионосферы. В целом наблюдается соответствие во временном ходе поведения пульсаций $Pc4-5$ в магнитных и ионосферных данных: между амплитудой скорости $|V|$ и X -компонентой магнитного поля Земли, а также между азимутом движения неоднородностей и Y -компонентой. В период эксперимента по магнитным данным одновременно регистрировались волны крупномасштабного характера, соответствующие собственным резонансам магнитных силовых линий (малые значения азимутального числа $|m| \sim 2-4$), и мелкомасштабные (большие значения $|m| \sim 17-20$). Показано, что периоды волновых процессов, зарегистрированные как методом ракурсного рассеяния, так и магнитометрами на поверхности Земли соответствовали друг другу. Формирование волновых процессов объясняется нестационарным воздействием солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) на магнитосферу Земли. Изменения в ММП по данным измерений на спутнике ACE характеризовались резким ростом динамического давления плазмы солнечного ветра, произошедшего около 09 UT 3 октября 2006 г. и сопровождавшегося быстрыми изменениями полярности северо-южной (B_z) и поперечной (B_y) компонент ММП.

1. ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные пульсации представляют собой короткопериодные колебания геомагнитного поля, характеризуются квазипериодической структурой и относятся к диапазону СНЧ (сверх низкочастотных волн в диапазоне 1–100 мГц; в зарубежной литературе используется термин ULF, Ultra Low Frequency). Результаты исследований физических и морфологических свойств геомагнитных пульсаций, их физической природы возбуждения и пространственного распределения представлены во многих работах (см., например, [Пудовкин и др., 1976;], а также обзоры: [Гульельми и Троицкая, 1973; Клейменова, 2007] и литература, цитируемая в них).

Исследования параметров пульсаций проводятся как по данным наземных магнитных наблюдений, так и по результатам измерений непосредственно на высотах ионосферы (спутники, радары).

При использовании в наблюдениях доплеровского метода появление цугов квазипериодических

вариаций доплеровского сдвига частоты f_D коротковолновых сигналов свидетельствует о наличии волновых процессов в области, содержащей естественные и/или искусственные мелкомасштабные неоднородности. При рассеянии диагностических сигналов на сильно вытянутых магнитно-ориентированных неоднородностях ($L_{\parallel} \gg L_{\perp}$ где L_{\parallel} и L_{\perp} — масштабы неоднородностей вдоль и поперек магнитного поля, соответственно) измеряется только компонента скорости дрейфа, перпендикулярная магнитному полю. Поэтому можно заключить, что волновые процессы, ответственные за появление вариаций f_D , имеют поперечную составляющую движения заряженных частиц к направлению линий геомагнитного поля. К такому эффекту, например, могут приводить поперечные магнитогидродинамические волны, роль которых является определяющей в активности естественных пульсаций геомагнитного поля [Гульельми и Троицкая, 1973; Гульельми, 2007].

Свойства геомагнитных пульсаций СНЧ диапазона в ионосфере исследовались также с помощью когерентных КВ радаров. СНЧ активность обычно проявляется как резонансный отклик собственных колебаний силовых линий магнитного поля Земли, наблюдаемых на высотах E -слоя [Walker и др., 1979] и F -слоя [Fenglich и др., 1995] ионосферы. Вместе с тем были обнаружены проявления СНЧ пульсаций явно нерезонансного характера [Wright and Yeoman, 1999]. Важным параметром СНЧ волн является азимутальное волновое число, m [Olson and Rostoker, 1978], которое может быть использовано для оценки пространственного масштаба волны.

Авторы [Waters et al., 2007] экспериментально и теоретически изучали задачу вариации частоты распространения радиосигналов в ионосфере, возмущенной СНЧ волнами, и показали, что благодаря эффекту пространственного усреднения, характеристики волновых возмущений, измеренные в ионосфере, могут существенно отличаться от данных наземных магнитометров.

Одним из методов исследования проявлений магнитных пульсаций на ионосферных высотах является сочетание КВ нагревных комплексов и метода ракурсного (или обратного) рассеяния диагностических КВ сигналов на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях (МИИН). С помощью КВ нагревного комплекса создается контролируемым образом искусственно возмущенная область (ИВО) ионосферы с известными пространственными характеристиками (высота и горизонтальный размер), “заполненная” магнитно-ориентированными МИИН. Движения ионосферных неоднородностей происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. Сдвиг доплеровской частоты ракурсно-рассеянного на МИИН диагностического КВ радиосигнала определяется скоростью неоднородностей [Гершман и др., 1984; Благовещенская, 2001]. В работе [Yeoman et al., 1997] по одновременным измерениям КВ радара CUTLASS в ИВО ионосферы, создаваемой нагревным стендом EISCAV/Heating, и данным наземных магнитометров проведены исследования временных характеристик пульсаций, связанных с резонансными колебаниями магнитной силовой линии, вызванных магнитосферным импульсом. Результаты определения характеристик магнитосферного резонатора по данным сети магнитометров оказались более грубыми по сравнению с радарными измерениями. В работе [Sinitsin et al., 1999] обсуждается связь вариаций доплеровского сдвига частоты f_D с дрейфом плазмы в электрическом поле геомагнитных пульсаций. Во время экспериментов с использованием КВ нагревных комплексов исследовались проявления регулярных пульсаций в диапазоне $Pc3-4$ в F области среднеширотной ионосферы [Blagoveshchenskaya et al., 1996; Blagoveshchenskaya et al., 1998a], а также иррегулярных

пульсаций $Pi2$ в авроральном E_s -слое ионосферы [Blagoveshchenskaya et al., 1998b]. Основываясь на наземных магнитометрических измерениях во время эксперимента на стенде Сура и диагностике искусственной ионосферной турбулентности методом ракурсного рассеяния, [Урядов и др., 2004] установили связь ионосферных квазипериодических колебаний с распространением магнитогидродинамических волн, возбуждаемых во время магнитосферной бури.

Из опубликованных работ, посвященных исследованию проявления пульсаций в ионосферных и наземных магнитных данных, следует, что связь между этими двумя явлениями не всегда однозначна и зависит от конкретных геофизических условий.

Целью данной работы является исследование характеристик волновых возмущений в диапазоне пульсаций $Pc4-5$, экспериментально измеренных 3 октября 2006 г. методом ракурсного рассеяния радиоволн в период проведения экспериментов совместно с нагревным стендом EISCAT/Heating и наземными магнитометрами сети IMAGE (Скандинавия). Отличительной особенностью эксперимента являлось проведение наблюдений одновременно на двух диагностических радиотрассах, что позволило реконструировать поведение векторов движения ионосферных неоднородностей V и электрического поля E в искусственно возмущенной F области ионосферы. Анализ и интерпретация результатов наблюдений выполнялась с учетом магнитных и ионосферных данных, характеризующих фоновую геофизическую обстановку, а также с привлечением измерений параметров солнечного ветра на спутнике ACE.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Экспериментальные наблюдения 3 октября 2006 г. выполнялись в утренние часы методом ракурсного рассеяния диагностических КВ сигналов на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях (МИИН). Модификация ионосферы производилась с помощью КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating, [Rietveld et al., 1993], расположенного в Норвегии недалеко от г. Тромсе (географические координаты $69.6^\circ N$, $19.2^\circ E$, $L = 6.2$). Мощная КВ радиоволна o -моды поляризации излучалась на частоте $f_n = 4040$ кГц с 10:00 до 10:13:30 UT и с 10:15 до 10:20 UT. Диаграмма направленности антенны КВ нагревного комплекса была наклонена к югу на 12° ; что обеспечивало излучение в направлении, близком к ориентации магнитного поля Земли в г. Тромсе. Размер ИВО ионосферы на высотах $F2$ слоя соответствовал 100 км. Эффективная мощность излучения составляла $P_{эфф} = 190-210$ МВт.

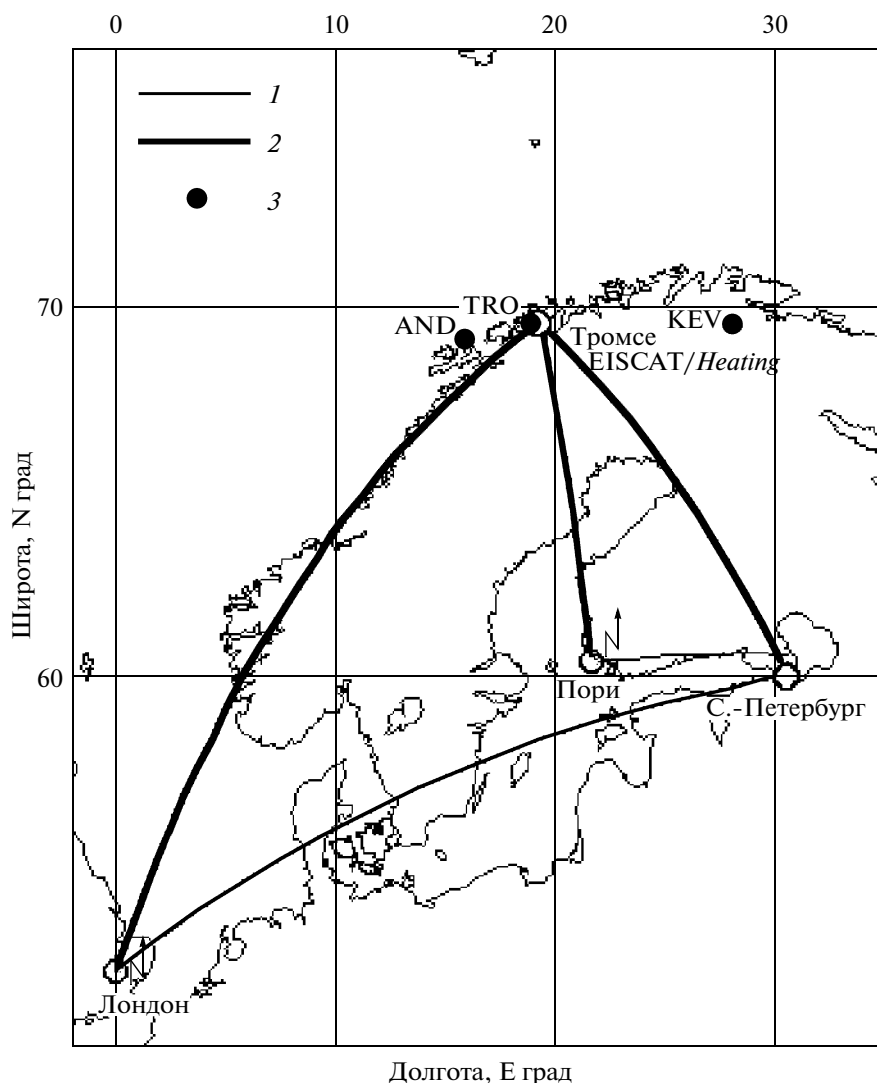


Рис. 1. Карта – схема геометрии эксперимента 3 октября 2006 г. Наблюдения методом ракурсного рассеяния выполнены одновременно на трассе Лондон–Тромсе–С.-Петербург и на трассе Пори–Тромсе–С.-Петербург. 1 – трасса прямого распространения КВ сигнала, 2 – трасса ракурсного рассеяния, 3 – наземные магнитометры.

Прием диагностических сигналов, рассеянных на МИИН, осуществлялся методом ракурсного рассеяния на обсерватории Арктического и антарктического научно-исследовательского института “Горьковская”, расположенной в 70 км от г. С.-Петербурга и 1200 км от нагревного комплекса г. Тромсе. Измерения выполнялись одновременно на двух диагностических трассах: Лондон–Тромсе–С.-Петербург, рабочая частота $f_{\text{диагн}} = 17640$ кГц и Пори (Финляндия)–Тромсе–С.-Петербург, $f_{\text{диагн}} = 11750$ кГц. Карта, поясняющая взаимное расположение диагностических трасс и нагревного комплекса EISCAT/Heating, приведена на рис. 1. Для регистрации ракурсно-рассеянных КВ сигналов использовался многоканальный КВ доплеровский комплекс, установленный на обсерватории ААНИИ “Горьковская” [Благовещенская, 2001]. Диаграмма

направленности приемной антенны ориентирована на Тромсе.

При анализе экспериментальных данных были использованы результаты наземных наблюдений компонент магнитного поля Земли магнитометрами IMAGE сети Скандинавии (станции: Тромсе, (TRO), Анденес (AND), и Кево (KEV), <http://www.space.fmi.fi/image/>), данные станции вертикального зондирования ионосферы в г. Тромсе и результаты измерений параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра на спутнике ACE.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Уровень солнечной активности в период эксперимента был низким: число Вольфа 3 октября 2006 г. соответствовало $W = 23$, среднемесячное значение $W = 18$. Магнитные условия 03.10.2006 г.

были умеренно возмущенными. Трехчасовой индекс магнитной возмущенности Kp имел значение $Kp = 2_-$, сумма Kp -индексов за сутки составила $\Sigma Kp = 14_+$.

По данным вертикального зондирования ионосферы непосредственно в месте расположения КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating с 10:00 до 10:30 UT наблюдался ионосферный слой $F2$ с критическими частотами f_oF2 порядка 4.0–4.1 МГц. Критические частоты слоя E в рассматриваемый период не превышали 2.5 МГц.

На рис. 2а и 2б показаны динамические доплеровские спектры (сонограммы) диагностических КВ радиосигналов, принятых в С.-Петербурге 3 октября 2006 г., в период 09:58–10:22 UT. Рис. 2а демонстрирует сонограмму, зарегистрированную на трассе Лондон–Тромсе–С.-Петербург, $f_{\text{диагн}} = 17640$ кГц. Рис. 2б иллюстрирует сонограмму, полученную на трассе Пори–Тромсе–С.-Петербург, на частоте $f_{\text{диагн}} = 11750$ кГц. Нулевое значение сдвига доплеровской частоты $f_D = 0$ соответствует распространению диагностических сигналов от передатчика до приемника по дуге большого круга (“прямой” сигнал). Время излучения мощной КВ радиоволны передатчика комплекса EISCAT на интервалах 10:00–10:13:30 и 10:15–10:20 UT отмечено скобками на оси времени. Анализ данных, представленных на рис. 2а и 2б, показывает, что в циклах излучения мощной КВ радиоволны на обеих радиотрассах наблюдались интенсивные сигналы, рассеянные от МИИН, которые были смещены на доплеровскую частоту f_D относительно прямого сигнала. Значения f_D рассеянных сигналов на сонограммах формируют треки, расположенные в отрицательной области частот доплеровского спектра относительно $f_D = 0$. Из рис. 2а, б видно, что ракурсно-рассеянные сигналы на обеих трассах характеризовались волновыми вариациями f_D . Периоды волновых вариаций f_D составляли 70–240 с при максимальной амплитуде волны $(f_{\text{dmax}} - f_{\text{dmin}}) = 2.2 - 2.4$ Гц. В целом наблюдается сходство между вариациями сдвига доплеровской частоты f_D на двух диагностических трассах. Однако в моменты времени 10:05 и 10:12 UT имело место несоответствие, которое выражалось в виде появления составляющих волновых колебаний с малой амплитудой порядка $\sim 0.5 - 0.7$ Гц на трассе Лондон–Тромсе–С.-Петербург.

На рис. 2в показаны магнитограммы наземных наблюдений на станции TRO для интервала времени с 9:58 до 10:22 UT. Из рис. 2в видно, что по данным магнитного поля Земли регистрировались волновые процессы квазисинусоидальной формы с периодами от 60 до 270 с для X - и Y -компонент магнитного поля Земли с амплитудой 1–3 нТл.

На рис. 3 для сравнения нанесены данные одновременных измерений модуля сдвига доплеровской

частоты $|f_D|$ на трассе Лондон–Тромсе–С.-Петербург и относительных вариаций Y -компоненты (ΔY) магнитного поля Земли магнитометра станции TRO. В целом наблюдается соответствие изменения во времени параметров $|f_D|$ и ΔY . Дополнительное исследование вариаций Y -компоненты по данным магнитометров станций AND и KEV, расположенных на геомагнитной широте станции TRO на расстоянии 120 км и 310 км соответственно, показало, что наблюдается подобие в вариациях во времени $|f_D|$ и изменений Y -компонент магнитного поля Земли на близкорасположенных станциях. Проведенный анализ показал, что в некоторые моменты времени ($\sim 09:59, 10:05, 10:11, 10:12$ UT) наблюдается фазовый сдвиг в изменениях Y -компонент отдельных станций TRO, AND и KEV.

Спутник ACE (Advanced Composition Explorer) является космическим аппаратом, для изучения структуры и динамики солнечного ветра (СВ). На борту спутника расположено несколько инструментов, осуществляющих круглосуточный мониторинг солнечного ветра. На рис. 4а–е приведены (сверху вниз) вариации параметров межпланетного магнитного поля (ММП, база 1-мин данных OMNI, http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omsc_min.html) с 08:30 до 10:30 UT 3 октября 2006 г.: B_x, B_y, B_z компонент ММП (на одном графике); давления P , скорости V и плотности N_p СВ; расчетного положения магнитопаузы R в подсолнечной точке магнитосферы, выраженного в радиусах Земли R_E , а также AE индекса авроральной активности по наземным данным (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

Из представленных на рис. 4 вариаций во времени параметров ММП и СВ можно видеть, что около 9:00 UT произошло резкое увеличение B_x компоненты ММП на $+(2.5 - 3)$ нТл (пунктирная линия на рис. 4а). В 9:12 UT наблюдалось изменение знака B_x компоненты с отрицательного на положительное значение. В период с 9:20 UT до 10:00 UT значение B_x сохраняло величину близкую к нулю. B_y компонента ММП (тонкая линия на рис. 4а) в течение единиц минут (с 9:02 до 9:05 UT) скачком уменьшилась на 2 нТл с изменением знака и затем выросла до +2.5 нТл и далее в течение 1 ч оставалась на положительном уровне около 2.5–3 нТл. В моменты времени 9:10, 9:38 и 9:52 UT происходили изменения знака B_z компоненты ММП (толстая линия на рис. 4а). Динамическое давление солнечного ветра около 09:00 UT резко увеличилось на 1–1.2 нПа (рис. 4б). Скорость СВ, показанная на рис. 4в, до 09:00 UT составляла 420 км/с, около 9:00 UT резко снизилась на 20–30 км/с и установилась на уровне 400–405 км/с в течение последующих 20 минут. Концентрация протонов N_p СВ (рис. 4г) около 09:00 UT скачком увеличилась от 5 до 9 см^{-3} . Граница магнитопаузы на дневной стороне (рис. 4д) также резко приблизилась к Земле на 1.2 R_E . Отметим, что в 09:56 UT про-

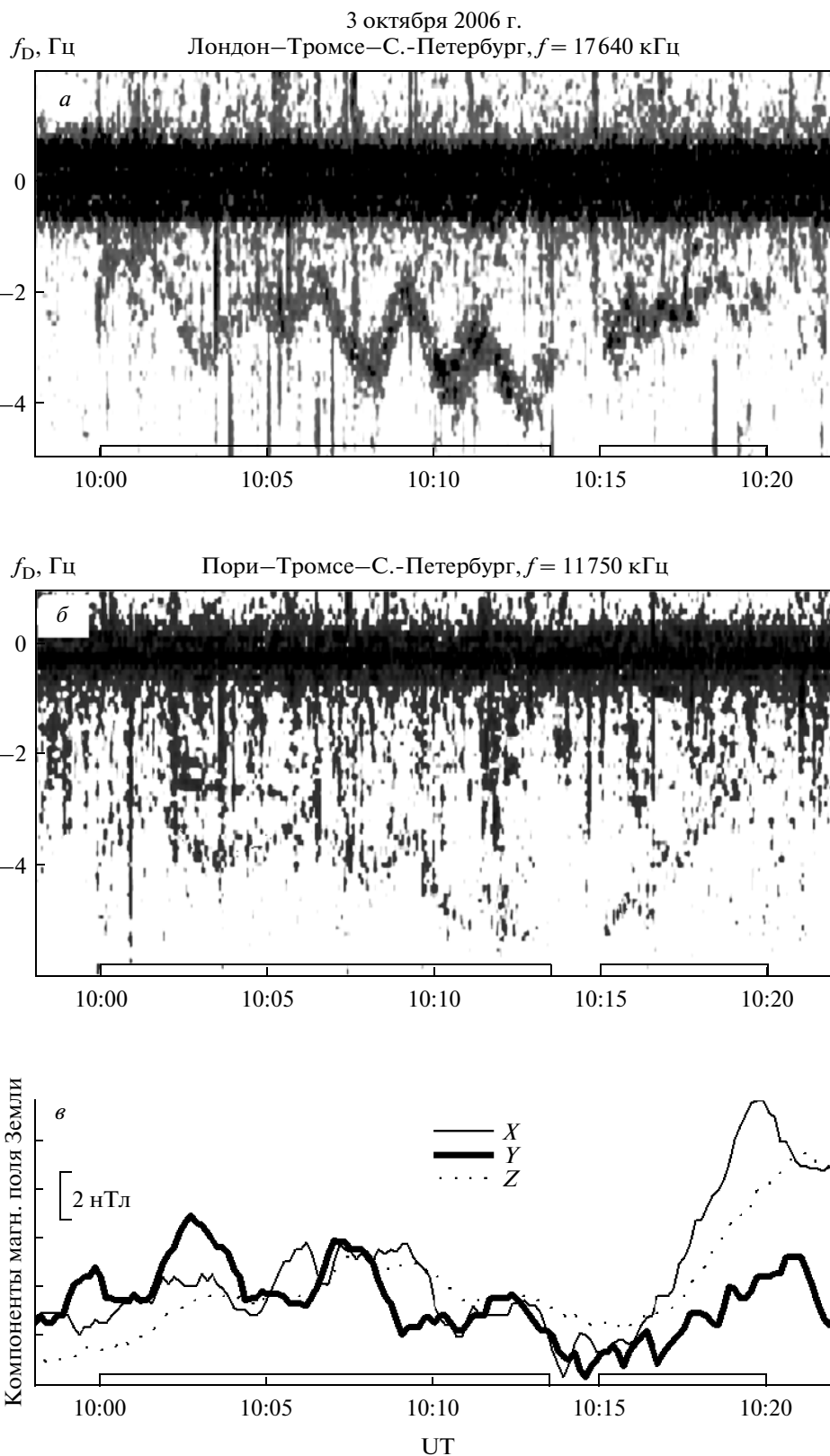


Рис. 2. Сонограммы КВ радиосигналов, зарегистрированные 3 октября 2006 г. с 09.58 до 10.22 UT на трассах (а) Лондон–Тромсе–С.-Петербург и (б) Пори–Тромсе–С.-Петербург. Распространению сигнала по дуге большого круга между приемником и передатчиком соответствует $f_D = 0$. (в) Вариации X -, Y - и Z -компонент магнитного поля по данным магнитометра г. Тромсе.

изошло внезапное увеличение AE индекса (рис. 4е) с 80 до 400 нТл (началась суббурия). Оценка кинетической задержки наземных наблюдений относительно спутниковых составляла ~55–58 мин.

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

4.1. Волновые процессы по данным наземных магнитометров

Анализ изменения во времени компонент магнитного поля выполнен по 10-секундным измерениям магнитометрами станций TRO, AND, KEV (<http://www.geo.fmi.fi/image/>). На предварительном этапе исследований с помощью пакета MATLAB данные составляющих магнитного поля Земли были пропущены через широкополосный фильтр Чебышева 1 типа с частотной полосой 2.8–15.5 мГц (соответствует периодам 65–360 с). В результате применения Фурье анализа рассчитаны динамические спектры в скользящем окне ~ 12 мин (72 точки) для X - и Y -компонент магнитного поля Земли. При последующем дополнительном анализе составляющих волновых возмущений использовались также фильтры: 3.3–5 мГц (соответствует периодам 200–300 с) и 5–8.3 мГц (120–200 с).

На рис. 5 в качестве примера представлены результаты спектральных вычислений для компонент магнитного поля, отфильтрованных в полосе (2.8–15.5) мГц, измеренных станцией TRO в период времени с 09:50 до 10:22 UT. Значения периодов T наблюдаемых волновых колебаний X - и Y -компонент приведены с шагом 50 с на рис. 5а и рис. 5б соответственно. Из рис. 5а можно видеть, что периоды геомагнитных пульсаций в X -компоненте, наблюдаются в диапазонах: $T_1 = (210 \pm 25)$ с, $T_2 = (150 \pm 20)$ с и $T_3 = (100 \pm 20)$ с. Периоды пульсаций, наблюдаемые в Y -компоненте, отличались от периодов в X -компоненте и составляли: $T_1 = (240 \pm 20)$ с, $T_2 = (160 \pm 20)$ с и $T_3 = (90 \pm 10)$ с. Рис. 5в демонстрирует вариации амплитуд спектральных максимумов S в X - и Y -компонентах (тонкие линии для X - и толстые линии для Y -компонент). На интервале 09:50–10:16 UT результаты вычислений приведены для двух значимых спектральных максимумов S_1 и S_2 , а на интервале времени 10:16–10:20 UT учтена амплитуда третьего значимого спектрального максимума для X -компоненты. Из представленных на рис. 5 данных можно видеть, что в период с 09:50 до 10:16 UT спектральные амплитуды геомагнитных пульсаций в Y -компоненте S_Y были на порядок выше спектральных амплитуд пульсаций X -компоненты, $S_Y > S_X$. Заметим, что с 09:58 до 10:04 UT в Y -компоненте спектральный максимум для периода $T_2 \sim (160 \pm 20)$ с был выше, чем S_Y для $T_1 \sim (240 \pm 20)$ с, т.е. $S_{Y2} > S_{Y1}$. В период времени с 10:16 до 10:22 UT основным спектральным максимумом являлся экстремум для периодов $T_3 \sim (90-100)$ с и спектральные амплитуды пульсаций в X -компонен-

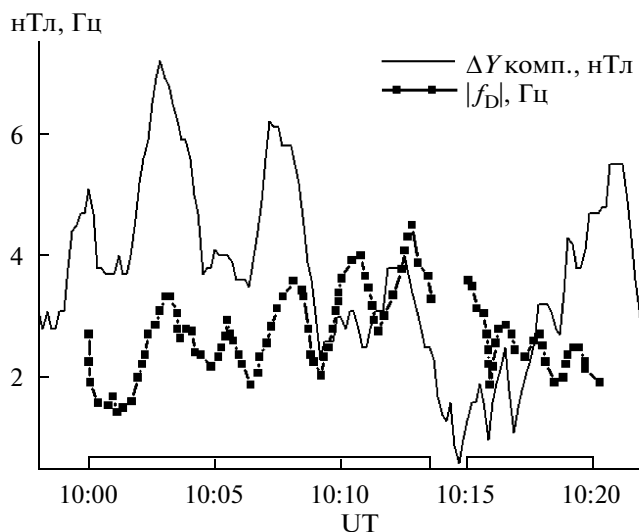


Рис. 3. Данные измерений модуля сдвига доплеровской частоты $|f_D|$ на трассе Лондон–Тромсе–С.-Петербург и относительной вариации ΔY -компоненты геомагнитного поля (Тромсе).

те превышали на 1–1.5 порядка амплитуды S_Y , $S_X > S_Y$. Спектральные амплитуды S_{X1} , S_{X2} и S_{Y1} , S_{Y2} для периодов T_1 и T_2 в этот интервал времени были сопоставимы.

4.2. Волновые процессы по результатам доплеровских измерений

По данным ракурсных измерений на двух и более диагностических радиотрассах представляется возможным определить вектор (амплитуду и направление) скорости \mathbf{V} движения МИИН в ИВО ионосферы [Борисова и др., 2007]. Проекция скорости движения ионосферных неоднородностей на направление вектора разности $\Delta \mathbf{k}$ волновых векторов падающей (\mathbf{k}_0) и рассеянной (\mathbf{k}_s) волн $\mathbf{k} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_0$ определяется выражением [Гершман и др., 1984];

$$V_{\Delta k} = (f_D / f_{\text{диагн}}) (c / 2 \sin(\theta/2)), \quad (1)$$

где f_D – доплеровское смещение частоты, $f_{\text{диагн}}$ – частота диагностической радиоволны, θ – угол рассеяния, c – скорость света.

По одновременным измерениям доплеровского смещения частоты на двух диагностических трассах f_{D1}/f_{D2} рассчитанным из сферической геометрии значениям углов рассеяния θ_1 и θ_2 из выражения (1) находятся две проекции скорости движения неоднородностей V_1 и V_2 используя которые можно определить амплитуду V и азимутальное направление A_{zV} вектора скорости \mathbf{V} при условии пренебрежения размерами ИБО:

$$V = V_2 / \cos \{ \arctg [(\cos(\alpha - \beta) / \sin \alpha)] \}, \quad (2)$$

$$A_{zV} = A_{z_{k1}} - \arctg [(\cos(\alpha - \beta) / \sin \alpha)],$$

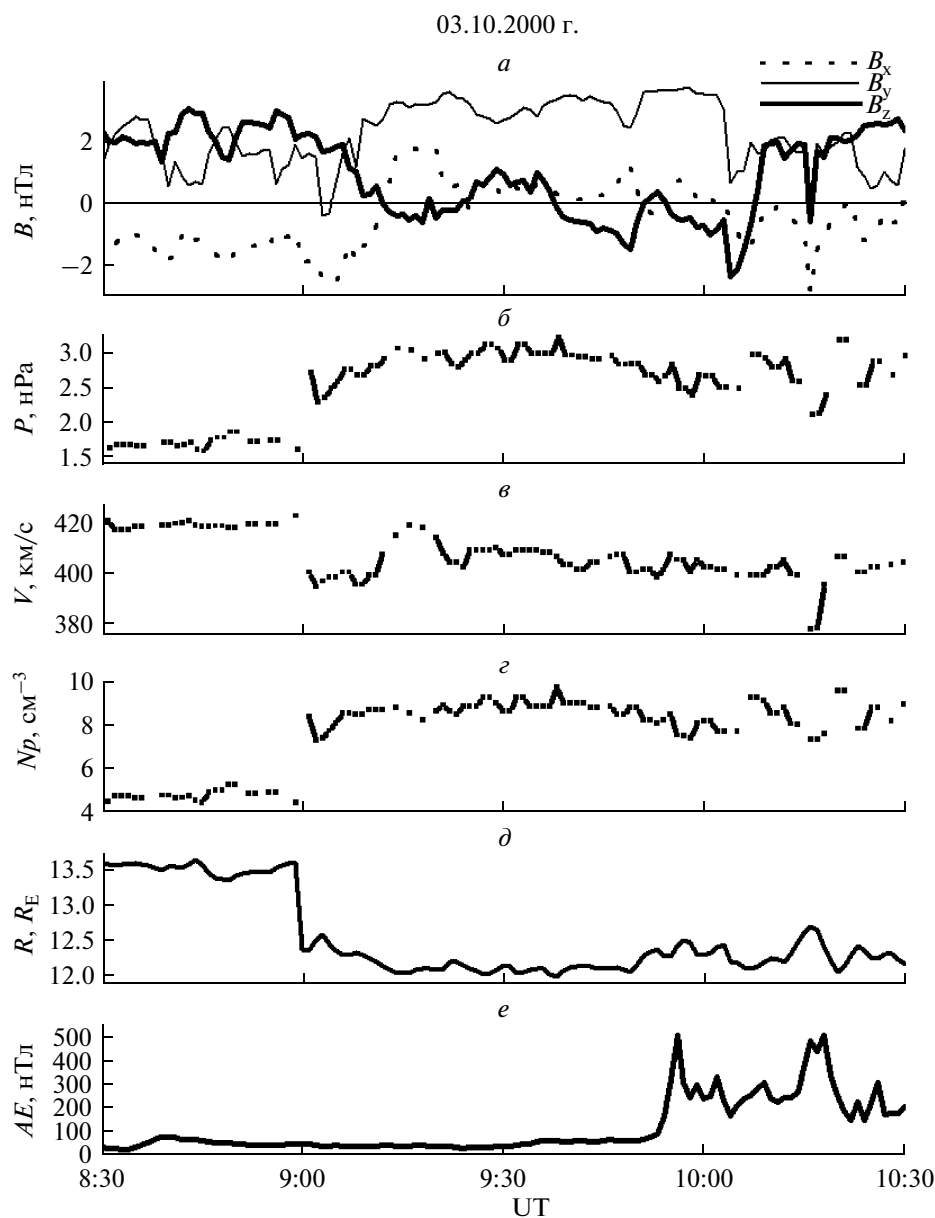


Рис. 4. Условия в межпланетной среде 3 октября 2006 г.: (а) B_x -, B_y -, B_z -компоненты ММП; (б) давление P , (в) скорость V и (г) плотность N_p солнечного ветра; (д) положение магнитопаузы в подсолнечной точке, выраженная в радиусах Земли (R_E); (е) вариации AE индекса.

где $\beta = V_1/V_2$; $\alpha = Az_{k1} - Az_{k2}$ — угол между азимутальными направлениями разностных векторов $\Delta \mathbf{k}_1$ и $\Delta \mathbf{k}_2$ (Az_{k1} и Az_{k2}) на первой и второй диагностической трассе соответственно.

В результате обработки динамических доплеровских спектров радиосигналов были определены средние значения сдвига доплеровской частоты f_D ракурсно-рассеянных сигналов, измеренных на двух диагностических трассах 3 октября 2006 г. с 10:00 до 10:20 UT. На рис. 6а приведены значения f_D усредненные на интервале 10 с в циклах модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами комплекса EISCAT/Heating.

По данным одновременных наблюдений доплеровским методом на двух трассах Лондон—Тромсе—С.-Петербург и Пори—Тромсе—С.-Петербург (рис. 6а) с использованием (2) выполнили расчет скорости движения МИИН в ионосфере. Результаты вычислений скорости V движения МИИН в векторном виде представлены на рис. 6б. Амплитуда скорости менялась в диапазоне (65 ± 20) м/с, а азимутальное направление движений МИИН изменялось в пределах $(300 \pm 10)^\circ$. Для сравнения приведем результаты расчетов проекция скорости движения по доплеровским измерениям на одной трассе Лондон—Тромсе—С.-Петербург (рис. 2а, 3) с использованием (1). Азимутальное направление разностного

вектора $\Delta \mathbf{k}$ для данной трассы составляет 182° (табл. 2 в работе Борисова и др., 2007). Величина проекции скорости для измерений 3 октября 2006 г. составила (30 ± 15) м/с.

На рис. 6в в векторном виде приведены результаты численных расчетов электрического поля \mathbf{E} в искусственно возмущенной F области ионосферы, выполненные в предположении, что скорость дрейфа ионосферных неоднородностей определяется как $\mathbf{E} \times \mathbf{V}_0$ где \mathbf{V}_0 — постоянное магнитное поле Земли. Значения электрического поля \mathbf{E} в верхней ионосфере изменялось во время эксперимента от ~ 2 мВ/м до ~ 4.5 мВ/м. Направлено ионосферное электрическое поле \mathbf{E} на северо-восток.

Для высокоширотной станции Тромсе значения горизонтальных компонент геомагнитного поля H - и X -, а также D - и Y - практически не отличаются, поэтому весь анализ проводился в прямоугольной системе координат. При сопоставлении волновых структур, зафиксированных наземными и ионосферными наблюдениями 3 октября 20006 г. с 10:00 до 10:20 UT, не обнаружено качественного соответствия в вариациях рассчитанных компонент скорости движения ионосферных неоднородностей и вертикальной компоненты магнитного поля. Наблюдалось сходство в поведении модуля скорости ионосферных неоднородностей $|V|$ и горизонтальной (X) компоненты магнитного поля, а также азимута движения МИИН Az_v и склонения (Y) магнитного поля.

Рис. 6г и 6д демонстрируют вариации амплитуды скорости $|V|$ и азимутального угла направления движения МИИН Az_v соответственно (толстые линии). Одновременно с расчетными зависимостями $|V|(t)$ и $Az_v(t)$ на рис. 6в и 6г приведены зависимости от времени X - и Y - горизонтальных компонент магнитного поля Земли, измеренных магнитометром TRO. Из представленных данных можно видеть, что в целом наблюдается соответствие во временном ходе поведения волновых колебаний в ионосферных и магнитных данных: между амплитудой скорости V и X -компонентой, а также между азимутом движения Az_v и Y -компонентой магнитного поля Земли.

В таблице приведены значения периодов пульсаций зафиксированные 3 октября 2006 г. с 09:50 до 10:20 UT доплеровскими данным f_D и магнитометрическим измерениям X - и Y -компонент магнитного поля Земли, а также полученные в результате вычислений скорости движений в ионосфере (амплитуде $|V|_{\text{МИИН}}$ и азимуту $Az_{\text{МИИН}}$).

Представленные в таблице данные показывают, что наблюдаемые волновые структуры 3 октября 2003 г. во время работы КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating с 10:00 до 10:20 UT лежат в диапазоне 80–240 с и соответствуют диапазонам пульсаций Pc4–5.

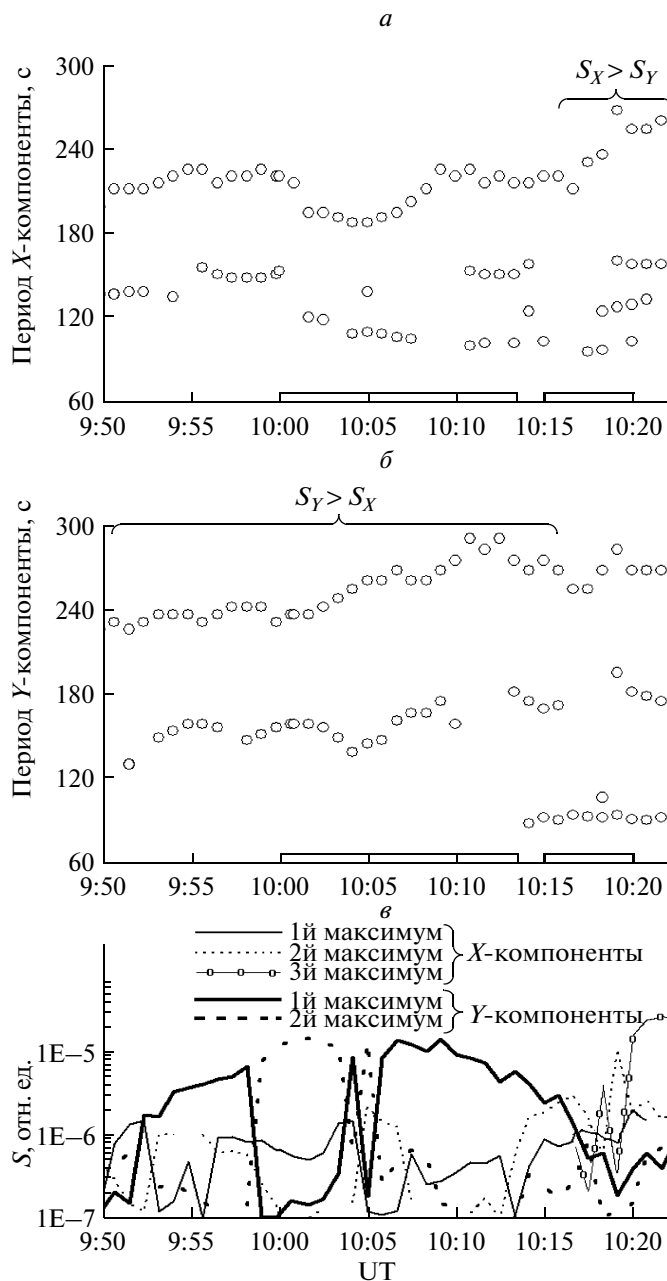


Рис. 5. Изменение периодов волновых процессов T от времени, полученные по данным измерений наземным магнитометром г. Тромсе (а) в X -и (б) в Y -компонентах магнитного поля. (в) Вариации первых максимумов спектральных амплитуд S_1, S_2 и S_3 .

5. ОБСУЖДЕНИЕ

В период проведения нагревных экспериментов с использованием нагревного стенда EISCAT/Heating 3 октября 2006 г. в утренние часы одновременно по данным доплеровских измерений и результатам показаний наземных магнитометров были зарегистрированы СНЧ волновые колебания в диапазоне периодов 80–240 с (рис. 2 и 5, таблица). Отметим,

3 октября 2006 г.

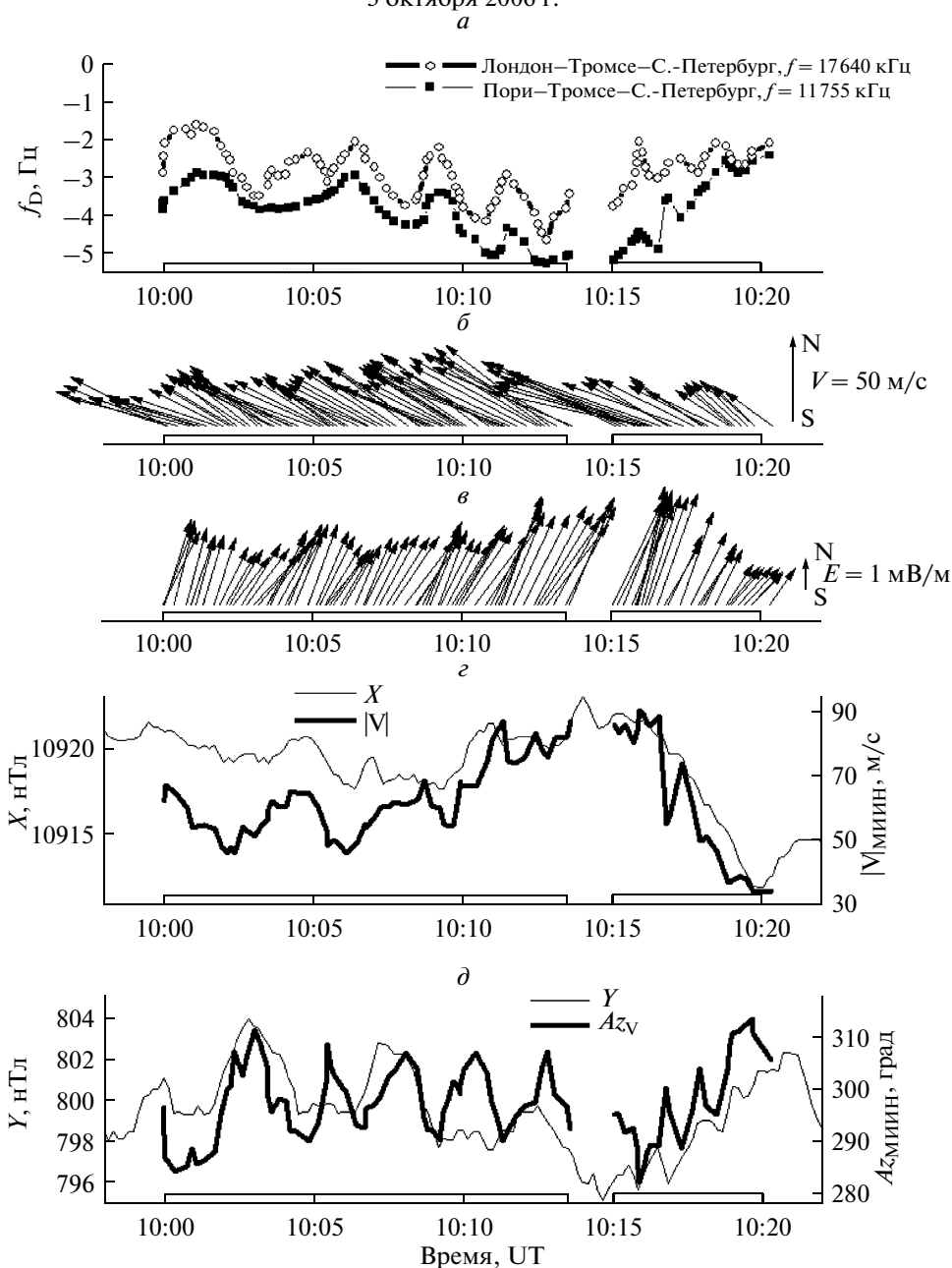


Рис. 6. Зависимости от времени: (а) Медианные значения f_D диагностических КВ сигналов, рассеянных на МИИН на трассах Лондон–Тромсе–С.-Петербург (○) и Пори–Тромсе–С.-Петербург (■); (б) – рассчитанные вектора скорости движения МИИН в F -области ионосферы для циклов нагрева стенда EISCAT/Heating; (в) – электрическое поле E в верхней ионосфере; (г) вариации скорости МИИН $|V|$ и X -компоненты магнитного поля; (д) вариации азимутального угла направления движения МИИН Az_{\min} и Y -компоненты магнитного поля.

что около 9:55 UT по данным AE -индекса авроральной активности началась суббуря.

В настоящее время является общепринятым, что классические утренние и дневные $Pc5$ пульсации в магнитосфере, так же как и пульсации типов $Pc2-4$, представляют собой тороидальные альвеновские резонансные колебания силовых линий геомагнитного поля [Chen and Hasegawa, 1974; Southwood,

1974]. Согласно работам [Пудовкин и др., 1976; Клейменова, 2007; Пилипенко, 2006] основным источником волн пульсаций диапазона $Pc3-5$ может быть неустойчивость Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе, приводящая к созданию турбулентной зоны при взаимодействии солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитным полем Земли, а также импульсы дина-

Периоды пульсаций T 3 октября 2006 г. по экспериментальным данным вариаций f_D результатам расчетов скорости движений в ионосфере (амплитуде $|V|_{\text{МИИН}}$ и азимуту $Az_{\text{МИИН}}$), а также по магнитометрическим измерениям X - и Y -компонент магнитного поля Земли.

Время, UT	T , с По наблюдениям доплеровским методом	T , с результаты расчетов по f_D		T , с по магнитометрическим измерениям	
		$ V _{\text{МИИН}}$	$Az_{\text{МИИН}}$	X -компонента	Y -компонента
9:50–10:00 (перед нагревом)	–	–	–	210, 150	240, 150
10:00–10:13.5	150, 210, 120	240, 150	150	210, 150	150, 240
10:15–10:20	90, 70	70, 90	80	90, 120, 260	90, 160, 250

мического давления СВ или его флюктуации. Эти процессы носят нестационарный и турбулентный характер, а существование естественных магнитогидродинамических резонаторов и волноводов в околосферной плазме приводит к квазипериодическому отклику на такое воздействие. Магнитозвуковые волны при распространении вглубь магнитосферы могут возбуждать тороидальные колебания на L -оболочке, если частота внешнего источника совпадает с локальной частотой собственных колебаний геомагнитной силовой линии. Пространственная структура поля пульсаций является результатом суперпозиции внешнего сигнала и резонансного отклика магнитосферы.

Пульсации $Pc5$ являются высокоширотным явлением, как правило, возбуждение этих волн в утреннем секторе сопровождается одновременным развитием магнитосферной суббури в ночном секторе. Максимум амплитуды $Pc5$ наблюдается в авральной зоне и смещается к более низким широтам при увеличении магнитной активности [Клейменова, 2007]. Согласно литературным данным пульсации $Pc5$ от других типов устойчивых пульсаций отличается не только большим периодом (150–600 с), но и их огромные амплитуды (десятьки нТл). В наших наблюдениях вариации амплитуды компонент магнитного поля с периодами диапазона $Pc5$ составляли всего лишь 1–3 нТл.

Для проверки идеи немагнитосферного происхождения волновых возмущений, наблюдаемых 3 октября 2003 г., проведены вычисления частоты $f_{\text{СНЧ}}$ волн на Земле, связанных с величиной $B_{\text{СНЧ}}$ волны в целом, и пульсации $Pc4$ –5 в частности [Тверская и Хорошева, 1982; Козырева и др., 2004; Ролдугин и др., 2006], оказываются индикаторами влияния ММП и СВ на магнитосферу Земли. Учитывая связь частоты пульсаций PcA с модулем B ММП можно оценить частоту возбуждаемых волн f по эмпирическому соотношению [Le and Russell, 1996]

$$f(\text{мГц}) = (0.72 + 4.67 \cos \theta_{\text{XB}} |B|) (\text{нТл}), \quad (3)$$

где $|B|$ – модуль ММП в нТл и θ_{XB} – пространственный угол конуса, образованного X -компонентой и полным вектором \mathbf{B} ММП.

Оценки периодов волновых колебаний $T = 1/f$ по соотношению (3) дают значения периодов $T \sim (60$ – $240)$ с для интервала времени 10:00–10:16 UT и периоды $T \sim (60$ – $300)$ с для интервала времени 10:16–10:20 UT 3 октября 2003 г. Оценочные расчеты периодов наблюдаемых пульсаций показали их зависимость от величины модуля B ММП. Расчеты проводились с учетом кинетической задержки наземных наблюдений относительно спутниковых ~ 55 мин. Таким образом, зарегистрированные периоды геомагнитных пульсаций $T \sim (80$ – $240)$ с находятся в диапазоне возможных волновых возмущений, создаваемых как отклик на взаимодействие ММП с магнитным полем Земли.

Величина азимутального числа m является значимым параметром исследования низкочастотных колебаний в земной магнитосфере в предположении возможного механизма их генерации неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. Для двух пар магнитометров, и расположенных на одной геомагнитной широте ϕ на расстоянии D км, параметр m можно определить из соотношения [Olson and Ros-toker, 1978]

$$m = \frac{2\pi R \Delta\Phi}{360D} \cos \phi, \quad (4)$$

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

Вычисления параметра m были выполнены по данным наблюдений наземных магнитометров сети IMAGE, расположенных на близкой геомагнитной широте, с геомагнитными координатами (ϕ – широта и λ – долгота): TRO, $\phi = 66.57^\circ$, $\lambda = 103.47^\circ$, AND, $\phi = 66.40^\circ$, $\lambda = -100.9^\circ$ и KEV, $\phi = 66.23^\circ$, $\lambda = 109.75^\circ$ (см. рис. 1).

Расчетные значения m для различных пар магнитометров качественно и количественно соответствовали друг с другом. Величина азимутального числа m с 09:55 до 10:25 UT в среднем составляла $m = -2 \dots -4$, за исключением моментов времени 09:59, 10:05, 10:12 UT, когда $|m|$ скачком приобретал значения $|m| > 8$ –20. Периоды СНЧ пульсации с азимутальными числами $|m| > 8$ –20 относились к диапазону (120–130) с. По данным расчетов период

резонансных колебаний составляет (190–260) с. Отметим, что вычисления азимутального числа m по данным доплеровских наблюдений в ионосфере на двух частотах дали большие по величине значения $m \sim 25\text{--}30$.

Вследствие детальных исследований [Howard and Menk, 2001; Howard and Menk, 2005; Ролдугин и др., 2006; Клейменова, 2007] разработан механизм формирования пульсаций типов $Pc3\text{--}5$. Непосредственным результатом скачка динамического давления солнечного ветра является быстрая магнитозвуковая (БМЗ) волна. Возникшие вблизи подсолнечной точки магнитосферы пульсации $Pc3\text{--}5$ при распространении к Земле благодаря магнитосферным неоднородностям включают механизм возбуждения волны Альвена. На определенных широтах формируются осцилляции на гармониках собственных частот силовой линии магнитосферы, в то время как на других широтах бегущие волны переносят энергию к более низким высотам.

В соответствии с современными представлениями магнитосферные СНЧ волны, которые имеют внешние относительно Земли источники энергии, такие как импульс в СВ, ударные волны СВ, или неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе, в общем, характеризуются малыми значениями эффективного азимутального волнового числа m (или, что эквивалентно, крупномасштабными азимутальными размерами). СНЧ волны с мелко-масштабными 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].

Средние значения азимутального числа $m = -2\text{...}-4$ в период проведения эксперимента 3 октября 2006 г. указывают на развитие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе. Согласно работе [Клейменова, 2007] пульсации $Pc5$ в магнитосфере часто сопровождаются пульсирующими с теми же периодами потоками высыпавшихся энергичных частиц из радиационных поясов. Поэтому представляется возможным предположить наличие потоков частиц в нашем эксперименте, учитывая существование волновых возмущений с большими азимутальными числами m .

Результаты спектрального анализа данных магнитометров показали, что с 09:55 до 10:15 UT спектры пульсаций имели, как правило, два максимума, которые характеризовались периодами $T = 210$; 150 с в X - и $T = 240$; 150 с в Y -компонентах. Данные, приведенные на рис. 5а, 5б и в таблице демонстрируют плавное увеличение периода пульсаций со временем. Отметим, что значения периодов T в таблице полученные как по данным доплеровских наблюдений f_D так по результатам расчетов вектора скорости движения МИИН, представлены только

для интервалов работы нагревного комплекса. Рассмотрение данных в таблице показывает, что периоды пульсаций в X - и Y -компонентах магнитного поля не изменились с началом работы комплекса EISCAT/Heating и оставались такими же, как и перед нагревом. Анализ значений спектральных амплитуд S_X - и Y -компонент магнитного поля выявил, что до 10:15 UT выполнялись условия $S_Y > S_X$, т.е. преобладали пульсации, вызванные тороидальными (альвеновскими) колебаниями геомагнитного поля. После 10:15 UT максимальное значение спектрального максимума наблюдалось для X -компоненты с периодами $T \sim 90$ с. Спектральные амплитуды для остальных выявленных волновых возмущений были незначимы. Следовательно, после 10:15 UT возросла вероятность появлений пульсаций, обусловленных полоидальными (магнитозвуковыми) колебаниями ($S_X > S_Y$) [Пудовкин и др., 1976].

Из представленного материала (рис. 2, рис. 5, таблица) следует, что с 10:00 до 10:20 UT, несмотря на похожие вариации ионосферных и магнитных данных, значения периодов пульсаций в ионосфере и на Земле не совпадают. Сравнение периодов пульсаций для ионосферных и наземных измерений показывает, что для всех видов измерений с 10:00 до 10:13:30 UT характерны пульсации с периодами $T = 150$ с и $T = 210\text{--}240$ с. Во втором цикле нагрева с 10:15 до 10:20 1Д как в наземных, так и в ионосферных данных, наблюдались пульсации с $T \sim 80\text{--}90$ с. Особенностью данного интервала времени является присутствие в наземных наблюдениях периодов $T = 120, 260$ с для X - и $T = 160, 250$ с для Y -компоненты магнитного поля.

Несоответствие между ионосферными и наземными измерениями в работе [Hanuise et al. 1986] объясняется отсутствием картирования между ионосферными E и F областями. В работах [Ponomarenko et al.; 2001; Waters et al., 2007] такое различие объясняется влиянием пространственного интегрирования на высотах E слоя на наземные магнитометрические измерения и результаты наземных измерений существенно зависят от ионосферного распределения амплитуды и фазы СНЧ как по широте, так и по долготе.

По одновременным измерениям доплеровского смещения частоты на двух диагностических трассах выполнена реконструкция полного вектора скорости движения ионосферных неоднородностей \mathbf{V} и ионосферного электрического поля \mathbf{E} . На исследуемом интервале времени амплитуда скорости менялась в диапазоне (65 ± 20) м/с, а азимутальное направление движений МИИН изменялось в пределах $(300 \pm 10)^\circ$. Движение в ионосфере происходило в направлении на северо-запад. Расчеты электрического поля \mathbf{E} в искусственно возмущенной области показали, что величина поля \mathbf{E} в верхней ионосфере менялась во время эксперимента 3 октября 2006 г. в

пределах от ~ 2 мВ/м до ~ 4.5 мВ/м. Направление ионосферного электрического поля E на северо-восток согласуется с характерным направлением ионосферного электрического поля в утреннем секторе при развитии суббури на ночной стороне [Пудовкин и ДР. 1975].

Результаты выполненных наблюдений свидетельствуют, что с 10:00 до 10:20 UT 3 октября 2006 г. можно выделить два независимых волнообразных процесса с периодами колебаний ~ 120 – 150 с и 210 – 270 с, лежащими в диапазоне периодов пульсаций $Pc4$ – 5 . Пульсации $Pc4$ – 5 наблюдались как в полоидальных (X -компонента и $|V|$), так и тороидальных (Y -компонента и $Az_{\text{МИИН}}$ модах).

Таким образом, в утренние часы 3 октября 2006 г. при развитии суббури на ночной стороне в ионосфере и на поверхности Земли наблюдалась сложная картина отклика на взаимодействие магнитосферы с нестационарным СВ и ММП. Сначала развивались пульсации в тороидальной (альвеновской) компоненте. Затем в отдельные моменты времени генерировались СНЧ волны на частотах, кратных собственным частотам магнитных силовых линий с большими азимутальными числами m , возбуждаемые в результате взаимодействия волна – частица. После 10:15 UT; пульсации в основном формировались магнитозвуковой (X -компонента) волной.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты комплексных наблюдений пульсаций в диапазоне периодов $Pc4$ – 5 во время эксперимента 3 октября 2006 г., когда развивались резкие нестационарные процессы в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле при их взаимодействии с магнитосферой Земли. Наблюдения выполнялись методом ракурсного рассеяния диагностических КВ сигналов на магнитно-ориентированных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях (МИИН) и наземными магнитометрами. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о перспективности исследования проявлений магнитных пульсаций на ионосферных высотах на основе сочетания высокоширотного КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating и одновременных наблюдений на двух радиотрассах методом ракурсного рассеяния. При этом с помощью КВ нагревного комплекса создается контролируемым образом искусственно возмущенная область (ИВО) ионосферы с известными пространственными характеристиками (высота и горизонтальный размер), которая является “мишенью” для рассеяния диагностических КВ сигналов.

По данным одновременных доплеровских наблюдений на двух диагностических трассах Лондон–Тромсе–С.-Петербург и Пори–Тромсе–С.-Петербург реконструировано поведение полного вектора

горизонтальной скорости движения неоднородностей V и напряженности электрического поля E в искусственно возмущенной F -области ионосферы. Получено, что амплитуда скорости изменялась в диапазоне (65 ± 20) м/с, а азимутальное направление движений МИИН лежало в пределах $(300 \pm 10)^\circ$. Расчеты электрического поля E в искусственно возмущенной F -области ионосферы показали, что величина поля E менялась в пределах от ~ 2 мВ/м до ~ 4.5 мВ/м, а направлено оно было на северо-восток.

Результаты спектрального анализа данных наземных магнитометров показали, что с 09:55 до 10:15 UT спектры пульсаций имели, как правило, два максимума, которые характеризовались периодами $T = 210$; 150 с и $T = 240$; 150 с в X - и Y -компонентах соответственно. Здесь преобладали пульсации, вызванные тороидальными (альвеновскими) колебаниями геомагнитного поля. В отдельные моменты времени генерировались СНЧ волны на частотах, кратных собственным частотам магнитных силовых линий с большими азимутальными числами m , возбуждаемые в результате взаимодействия волна – частица. После 10:15 UT возросла вероятность появлений пульсаций, обусловленных полоидальными (магнитозвуковыми) колебаниями. Показано, что в период эксперимента 3 октября 2006 г. наблюдались как волны крупномасштабного характера, соответствующие собственным резонансам магнитных силовых линий (малые значения азимутального числа $|m| \sim 2$ – 4), так и с мелкомасштабными азимутальными размерами (большие значения $|m| \sim 17$ – 20).

Показано, что в целом наблюдается соответствие во временном ходе поведения волновых колебаний в ионосферных и магнитных данных: между амплитудой скорости $|V|$ и X -компонентой, а также между азимутом движения Az_V и Y -компонентой магнитного поля Земли.

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.* Определение вектора скорости ионосферных неоднородностей по данным доплеровских измерений в искусственно модифицированной F области полярной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 76–84. 2007.
- Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я.* Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука. 392 с. 1984.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука. 208 с. 1973.
- Гульельми А.В.* Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли. // УФН. Т. 177. № 12. С. 1257–1276. 2007.

- Клейменова П.Г. Геомагнитные пульсации. // Модель космоса: Т. 1 : Физические условия в космическом пространстве // ред.: М.И. Панасюк и др. С. 611–626. 2007.
- Козырева О.В., Клейменова Н.Г., Шотт Ж.Ж. Геомагнитные пульсации начальной фазы магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 1. С. 37–46. 2004.
- Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А. Трансформация БМЗ волн в альфвеновские гиротропной продольно-неоднородной плазме // Физика Плазмы. Т. 33. № 6. С. 526–533. 2007.
- Пилипенко В.А. Резонансные эффекты ультра-низкочастотных волновых полей в околоземном пространстве. Автореферат на соискание ученой степени д.ф.-м.д. Д 002.113.03 ИКИ РАН. М. 34 с. 2006.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть 1. Полярные магнитные возмущения. Л.: ЛГУ. 220 с. 1975.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть 2. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: ЛГУ. 270 с. 1976.
- Ролдугин В.К., Мальцев Ю.П., Остапенко А.А., Ролдугин А.В. Возбуждение длиннопериодных регулярных пульсаций в магнитосфере во время SC // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 4. С. 465–476. 2006.
- Тверская Л.В., Хорошева О.В. О природе источника пакетов затухающих длиннопериодных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 22. № 5. С. 824–830. 1982.
- Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов ВТ., Помятое А.А., Фролов В.Л. Радарные наблюдения искусственной ионосферной турбулентности во время магнитной бури // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 47. № 9. С. 722–738. 2004.
- Blagoveshenskaya N.F., Troshichev O.A. Ionospheric phenomena produced by modification experiments // J. Atmos. Terr. Phys. V. 58. № 1–4. P. 397–406. 1996.
- 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.R., 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.
- Fenrich F.R., Samson J.C., Sofko G., Greenwald, R.A. ULF high- and low-m field line resonances observed with the Super Dual Auroral Radar Network // J. Geophys. Res. V. 100. P. 21535–21547. 1995.
- Hanuise C., Herberg A., Oksman J., Nielsen E., Stubbe P., Kopka H. Comparison between the ionospheric plasma drift and the motion of artificial induced irregularities as observed by HF backscatter radars // Ann. Geophysicae. V. 4. № 1. P. 49–54. 1986.
- Howard T.A., Menk F.W. Propagating of 10–15 mHz ULF waves with high spatial coherence at high latitudes // Geophys. Res. Letters. V. 28. № 2. P. 231–234. 2001.
- Howard T.A., Menk F.W. Ground observations of high-latitude Pc3–4 ULF waves // J. Geophys. Res. V. 110. A04205, doi:10.1029/2004JA010417. P. 1–17. 2005.
- Le G., Russell C.T. Solar wind control of upstream wave frequency. II J. Geophys. Res. V. 101. P. 2571–2576. 1996.
- Olson J.V., Rostoker G. Longitudinal phase variation of Pc4–5 micropulsations // J. Geophys. Res. V. 83. P. 2481–2488. 1978.
- Pilipenko V., Chugunova O., Mazur N., Fedorov E., Glassmeier K.-H. Pc3 waves in the polar cap: Observations and model // Proc. 6-th Intern. Conf. “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, May 23–27, 2006, ed.: V.N. Troyan, V.S. Semenov, M.V. Kubyshkina. P. 159–162. 2006.
- Ponomarenko P.V., Waters C.L., Sciffer M.D., Fraser B.J., Samson J.C. Spatial structure of ULF waves: Comparison of magnetometer and Super Dual Auroral Radar Network data // J. Geophys. Res. V. 106. № 6. P. 10509–10517. 2001.
- 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.
- Sinitsin V.G., Kelley M.C., Yampolski Yu.M., Hysell D.L., Zalizovski A.V., Ponomarenko P.V. Ionospheric conductivities according to Doppler radar observations of stimulated turbulence // J. Atm.-Solar Terr. Phys. V. 61. P. 903–912. 1999.
- Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere // Planet. Space Sci. V. 22. P. 483–491. 1974.
- Walker A.D.M., Greenwald R.A., Stuart W.F., Green C.A. STARE auroral radar observations of Pc5 geomagnetic pulsations // J. Geophys. Res. V. 84. P. 3371–3388. 1979.
- Waters C.L., Yeoman T.K., Sciffer M.D., Ponomarenko P., Wright D.M. Modulation of radio frequency signals by ULF waves // Ann. Geophysicae V. 25. P. 1113–1124. 2007.
- Wright D.M., Yeoman T.K. High-latitude HF Doppler observations of ULF waves: 2. Waves with small spatial scale sizes // Ann. Geophysicae. V. 17. P. 868–876. 1999.
- 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.