

УДК 550.385.37

## ДНЕВНЫЕ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБС. СОДАНКЮЛЯ ( $L \sim 5.3$ ) НА ПЕРЕДНЕМ ФРОНТЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2013 г. Ю. Маннинен<sup>1</sup>, Н. Г. Клейменова<sup>2</sup>, О. В. Козырева<sup>2</sup><sup>1</sup>Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия

e-mail: jyrki.manninen@sgo.fi; kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 20.11.2012 г.

Обсуждаются результаты анализа цифровых высокочувствительных наземных наблюдений ОНЧ излучений, выполненных в северной Финляндии ( $L = 5.3$ ) в мае–июне 2012 года. В это время был отмечен подход к магнитосфере Земли трех высокоскоростных потоков солнечного ветра, на переднем фронте которых отмечалась генерация длительных интенсивных дневных всплесков ОНЧ излучений в двух частотных полосах: выше и ниже  $\sim 2.5$  кГц. На частотах выше  $\sim 2.5$ – $3.0$  кГц наблюдались ОНЧ шипения, временная структура которых часто состояла из квазипериодической последовательности отдельных более сильных пятен шумовых сигналов. Низкочастотную полосу представляли собой хоры, наложенные на интенсивные шипения на частотах ниже  $\sim 1.5$  кГц. Высокочастотные ( $f > 2.5$  кГц) волны были эллиптическими, преимущественно лево-поляризованными, а низкочастотные – право-поляризованными. Высказано предположение, что генерация высокочастотных ОНЧ шипений происходила на  $L < 5$ , а ОНЧ хоров на  $L > 5$ . Обсуждается возможный сценарий генерации и распространения наблюдаемых ОНЧ излучений.

DOI: 10.7868/S0016794013030127

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Естественные электромагнитные колебания в диапазоне частот между гирочастотами ионов и электронов называются ОНЧ (очень низкочастотными) излучениями. Эти волны играют важную роль в динамике энергичных частиц в околоземном пространстве, а именно, в поперечном переносе энергичных электронов, их локальном ускорении и высыпании из магнитосферы Земли. Среди ОНЧ излучений выделяются два основных класса: шумовые излучения, называемые шипениями (hiss), и дискретные излучения – хоры (chorus). Большая часть ОНЧ волн – это результат развития циклотронной неустойчивости в радиационных поясах Земли. Интерес к ОНЧ излучением возрос после появления классической теоретической работы Трахтенгерца [1963] и монографии Хелливела [Helliwell, 1965]. Основные результаты исследований ОНЧ излучений опубликованы в ряде обзоров, например [Распопов и Клейменова, 1977; Naykawa and Sazhin, 1992; Sazhin and Naykawa, 1992]. Недавно вышла новая монография Трахтенгерца и Райкрофта [2011], в которой изложен количественный и самосогласованный теоретический подход к взаимодействию волн и частиц в околоземной плазме с учетом обратных связей и внутренней нелинейности.

Известно, что на земной поверхности ОНЧ излучения наблюдаются, в основном, в ночные и

утренние часы, днем всплески ОНЧ излучения появляются лишь во время магнитных возмущений [Распопов и Клейменова, 1977 и цитируемая там литература].

Несмотря на то, что очень важную информацию о характеристиках ОНЧ излучений в магнитосфере Земли дают измерения на спутниках, однако временная динамика ОНЧ излучений может быть исследована только с помощью наземных наблюдений, число которых в последние годы, к сожалению, резко сократилось. В то же время в северной Финляндии ежегодно проводятся регулярные кампании наземных ОНЧ наблюдений в пункте, удаленном на расстояние  $\sim 35$ – $40$  км от возможных источников промышленных помех (населенных пунктов, линий электропередач и промышленных объектов и т.д.). В отличие от используемой ранее аналоговой записи в выбранных полосах частот (filter bank record), в финских наблюдениях используется цифровая компьютерная регистрация ОНЧ сигналов с высокой пороговой чувствительностью приемника порядка  $10^{-6}$  нТл при отношении сигнал/шум 150 дБ.

Очередная финская ОНЧ кампания проводилась с 7 мая по 8 июня 2012 г. В это время в солнечном ветре было зарегистрировано три высокоскоростных потока со скоростью, достигающей 750 км/с. Целью данной работы является детальный анализ динамики спектрально-временной структуры днев-

ных всплесков ОНЧ излучений, зарегистрированных во время этой кампании.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ОНЧ НАБЛЮДЕНИЙ

Во время майской ОНЧ кампания 2012 г., как и в предыдущие кампании [Клейменова и др., 2011; Маннинен и др., 2012], регистрация ОНЧ волн проводилась на временном пункте Kannuslehto (KAN – географические координаты:  $\varphi = 67.74^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 26.27^\circ \text{ E}$ , исправленные геомагнитные координаты:  $\Phi = 64.2^\circ$ ;  $\Lambda = 107.9^\circ$ ,  $L = 5.3$ ) в 35 км от обс. Соданкюля (SOD). Измерения осуществлялись с помощью двух вертикальных ортогональных рамочных антенн, что позволяло исследовать поляризационные характеристики сигналов. Описание регистрирующей аппаратуры и метода анализа цифровых данных с применением специальных компьютерных программ, разработанных проф. Т. Туруненом (обс. Соданкюля), приведено в работе [Manninen, 2005].

В это время по данным OMNI [[ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft\\_data/omni/](http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/)] было зарегистрировано три высокоскоростных потока солнечного ветра: 9–13 мая, 23–25 мая и 4–9 июня (рис. 1). Всем им за несколько часов предшествовал подход к магнитосфере Земли областей с повышенной плотностью солнечного ветра ( $N_p$ ). Такая ситуация характерна для CIR (Corotating Interactive Regions) потоков солнечного ветра, когда в ходе движения от Солнца быстрый поток солнечного ветра догоняет более медленный, и сжимая плазму, создает перед собой область повышенной плотности и магнитного поля (плотный транзит). Такие высокоскоростные потоки, как правило, приводят к развитию в магнитосфере Земли слабой или умеренной магнитной бури. В данном случае наблюдались слабые магнитные бури, что видно на рис. 1, где кроме данных о параметрах солнечного ветра и ММП приведены вариации *Dst*-индекса.

На переднем фронте каждого из этих потоков на земной поверхности наблюдались продолжительные дневные всплески ОНЧ излучений. Кроме того, интенсивный всплеск дневных ОНЧ излучений был также зарегистрирован 20 мая после прихода к магнитосфере Земли межпланетной ударной волны, когда одновременно было отмечено резкое возрастание скорости и плотности солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (*B* ММП).

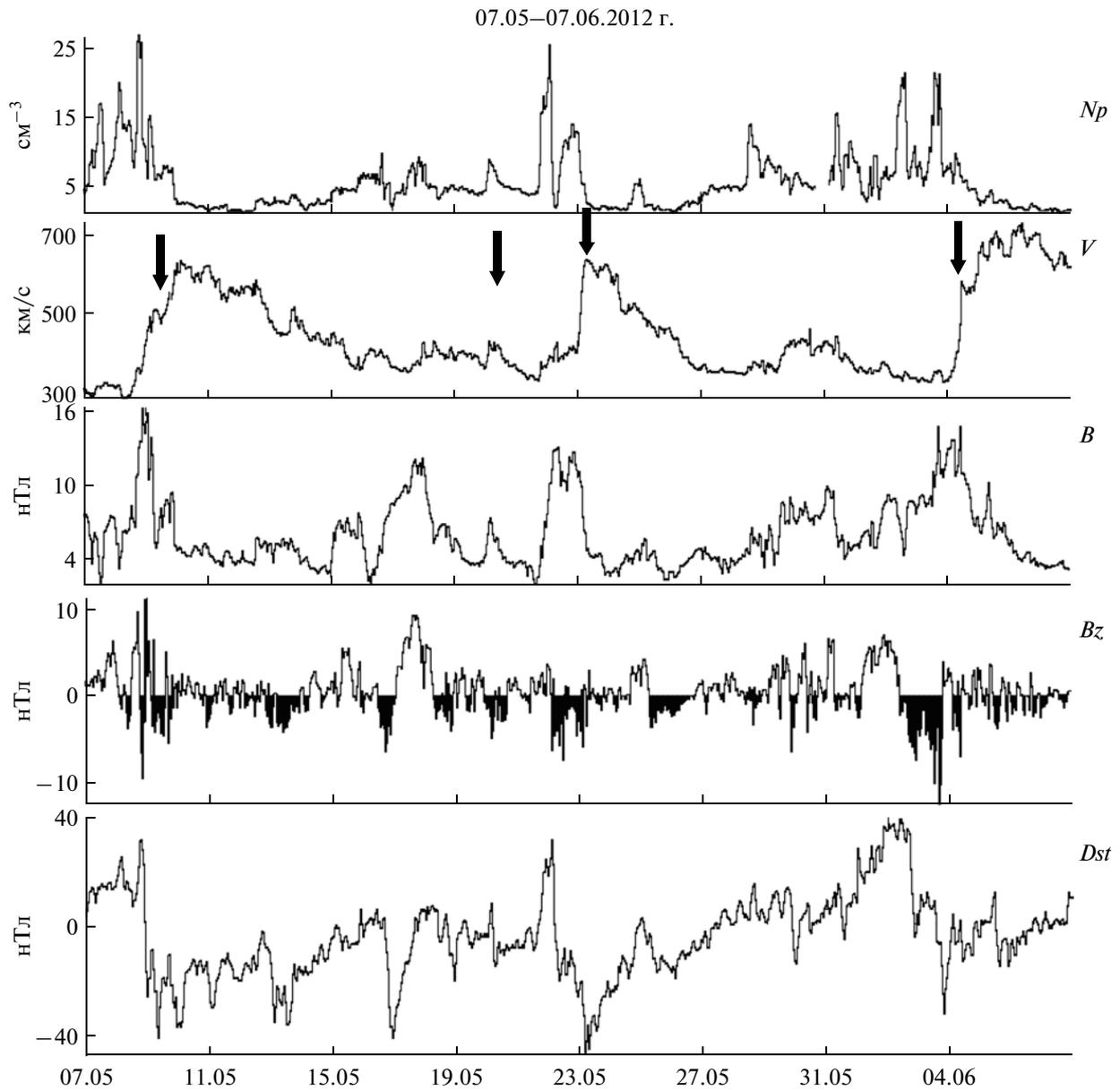
Рассмотрим подробнее всплеск ОНЧ излучений на переднем фронте первого высокоскоростного потока (9 мая) и сравним его характеристики с ОНЧ излучениями, вызванными межпланетной ударной волной (20 мая).

**ОНЧ излучения 9 мая 2012.** Ситуация в межпланетной среде (вариации динамического давления, скорости и плотности солнечного ветра и *Vz*-компоненты ММП) и на земной поверхности (вариации *AE* индекса) в обсуждаемый интервал времени показана на рис. 2а. В средней части рис. 2а приведены магнитограммы двух авроральных обсерваторий (IQA и FCC), находящихся в это время в ночном секторе Земли, и двух обсерваторий дневного сектора (SOR и SOD), расположенных на меридиане точки ОНЧ наблюдений (KAN).

В нижней части рис. 2а приведена спектрограмма ОНЧ излучений в диапазоне 0.5–6.0 кГц. Горизонтальные сплошные линии на рисунке – это индустриальные помехи в виде гармоник излучений от линий электропередач (избавиться от них не представляется возможным). Следует заметить, что при проведении спектрально-временного анализа спектрограммы ОНЧ излучений строятся в виде цветных графиков, перевод которых в черно-белый вариант, к сожалению, приводит к значительной потере качества и наглядности результатов анализа.

Всплеск ОНЧ излучений начался в ~03.50 UT после прихода к магнитосфере Земли резкого скачка плотности и динамического давления солнечного ветра (до 8 нПа), вызвавшего небольшую суббурю, зарегистрированную в предполуночном секторе на высокоширотной обсерватории IQA (рис. 2а). В вариациях *AE* индекса эта суббуря не видна, потому что этот индекс определяется по данным наблюдений обсерваторий, расположенных на широтах ниже обс. IQA. В начале ОНЧ всплеска это были хоровые излучения в полосе ~1.6–3.5 кГц, типичные для утреннего сектора после окончания ночной суббури. Они традиционно наблюдались при отрицательных значениях *Vz* ММП. Затем, после поворота *Vz* ММП к северу и резкого скачкообразного уменьшения динамического давления солнечного ветра до 4 нПа, ОНЧ излучения резко усилились (в 04.40 UT), и одновременно с хорами внезапно появились интенсивные шипения в полосе частот ~0.5–3.0 кГц.

В ~05.50 UT в структуре излучений появились два новых всплеска ОНЧ шипений в более высокой частотной полосе ~3.5–5.5 кГц. В это время на геостационарных спутниках GOES-13 и GOES-15 в ночном секторе магнитосферы наблюдалось нестационарное высыпание высокоэнергичных электронов (эти графики здесь не приводятся). Известно, что локальная инжекция энергичных электронов в ночном секторе сопровождается их магнитным дрейфом, вследствие чего внутри плазмосферы или в оторвавшихся плазменных облаках может происходить генерация шумовых ОНЧ излучений за счет циклотронной неустойчивости [Трахтенгерц и Райкрофт, 2011].

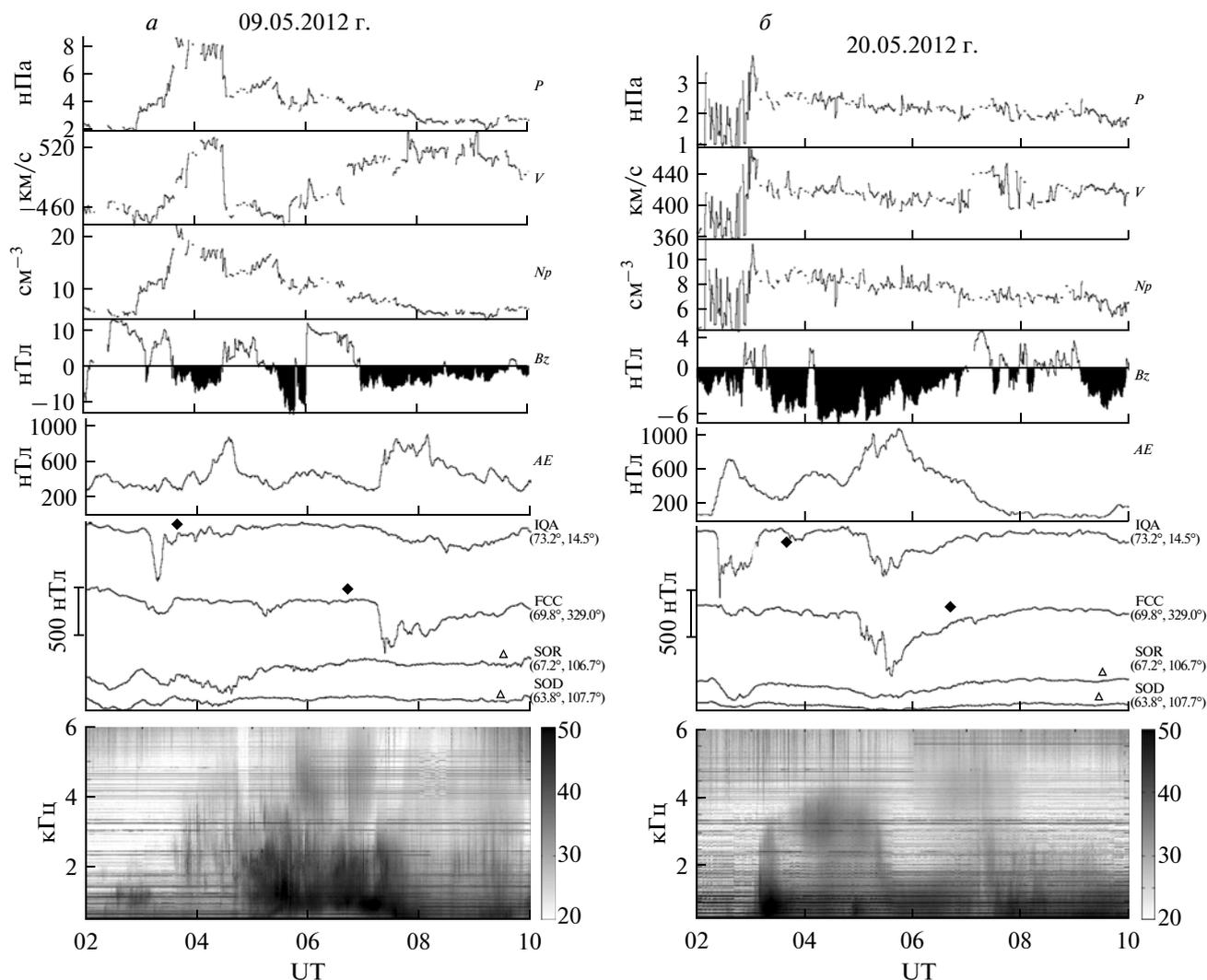


**Рис. 1.** Вариации плотности ( $Np$ ) и скорости ( $V$ ) солнечного ветра, межпланетного магнитного поля ( $B$ ) и его вертикальной компоненты ( $Bz$ ), а также  $Dst$ -вариация в период ОНЧ кампании мая 2012 г., стрелками показаны анализируемые события.

Результаты поляризационного анализа обсуждаемого всплеска ОНЧ излучений (рисунки здесь не приводятся, поскольку перевод цветных поляризационных спектрограмм в черно-белые делает невозможным воспроизведение различий в их тонких цветовых деталях) показал, что данный ОНЧ всплеск характеризовался правой, близкой к круговой поляризацией волн. Это может быть проинтерпретировано как расположение точки выхода ОНЧ волн из ионосферы в окрестности станции KAN [Yearby and Smith, 1994].

В верхней части рис. 3 показаны две 10-ти минутные спектрограммы обсуждаемого ОНЧ всплес-

ка в 05.50 UT и 07.08 UT, на которых видно, что спектральная структура излучений в 05.50 UT включала одновременное появление трех различных, по-видимому, независимых частотных полосы эмиссий. Полоса более высокочастотных ( $\sim 3.5\text{--}5.5$  кГц) шипений представляла собой квазипериодическую последовательность отдельных более сильных пятен шумовых сигналов; на частотах ниже  $\sim 3.5$  кГц наблюдались хоры, а на частотах ниже  $\sim 1.5$  кГц регистрировались интенсивные шипения. К концу ОНЧ всплеска (правый верхний график на рис. 3) остались только две низкочастотные полосы излучений — более редкие хоры и интенсивные ши-



**Рис. 2.** Вариации динамического давления ( $P$ ), скорости ( $V$ ) и плотности ( $Np$ ) солнечного ветра,  $Bz$ -компоненты ММП и  $AE$ -индекса, а также магнитограммы нескольких авроральных станций, международные коды и геомагнитные координаты которых показаны справа (светлый треугольник – геомагнитный полдень, затемненный круг – полночь), и спектрограмма ОНЧ излучений:  $a$  – для события 9 мая 2012 г.,  $b$  – для события 20 мая 2012 г.

пения. Динамика спектральной структуры ОНЧ излучений четко видна на 1-мин спектрограммах ОНЧ излучений (рис. 4, верхние графики). Близкая ситуация, когда полоса квазипериодических всплесков шипений наблюдались на более высоких частотах, чем одновременные ОНЧ хоры, отмечалось в работе [Маннинен и др., 2012].

Дневные всплески ОНЧ излучений, наблюдающиеся на переднем фронте высокоскоростных потоков солнечного ветра 23 мая и 4 июня, были похожи на обсуждаемое выше событие. Поляризационный анализ ОНЧ излучений показал, что в этих событиях на частотах выше  $\sim 2.5$  кГц наблюдалась левая поляризация волн, а на частотах ниже  $\sim 2.5$  кГц – правая. В работе [Manninen, 2005] показано, что такая ситуация является типичной для наземных наблюдений на  $L \sim 5$ .

Тонкая структура ОНЧ излучений 4 июня показана на рис. 3 и 4 (нижние графики). Видно, что в этом случае, как и 9 мая, низкочастотная полоса (ниже  $\sim 1.5$  кГц) представляла собой шипения с наложением отдельных хорных сигналов, а высокочастотная полоса – слабые шипения с наложением повторяющихся групп отдельных дискретных ОНЧ излучений. Центральная частота этих сигналов возрастала со временем от  $\sim 2.8$  кГц до  $\sim 3.6$  кГц.

Событие 23 мая здесь детально не рассматривается, поскольку оно сопровождалось значительным (до 3 дБ) риометрическим поглощением. В таких условиях ОНЧ волны испытывают значительное поглощение при прохождении через сильно возмущенную ионосферу.

Таким образом, на переднем фронте всех трех высокоскоростных потоков солнечного ветра,

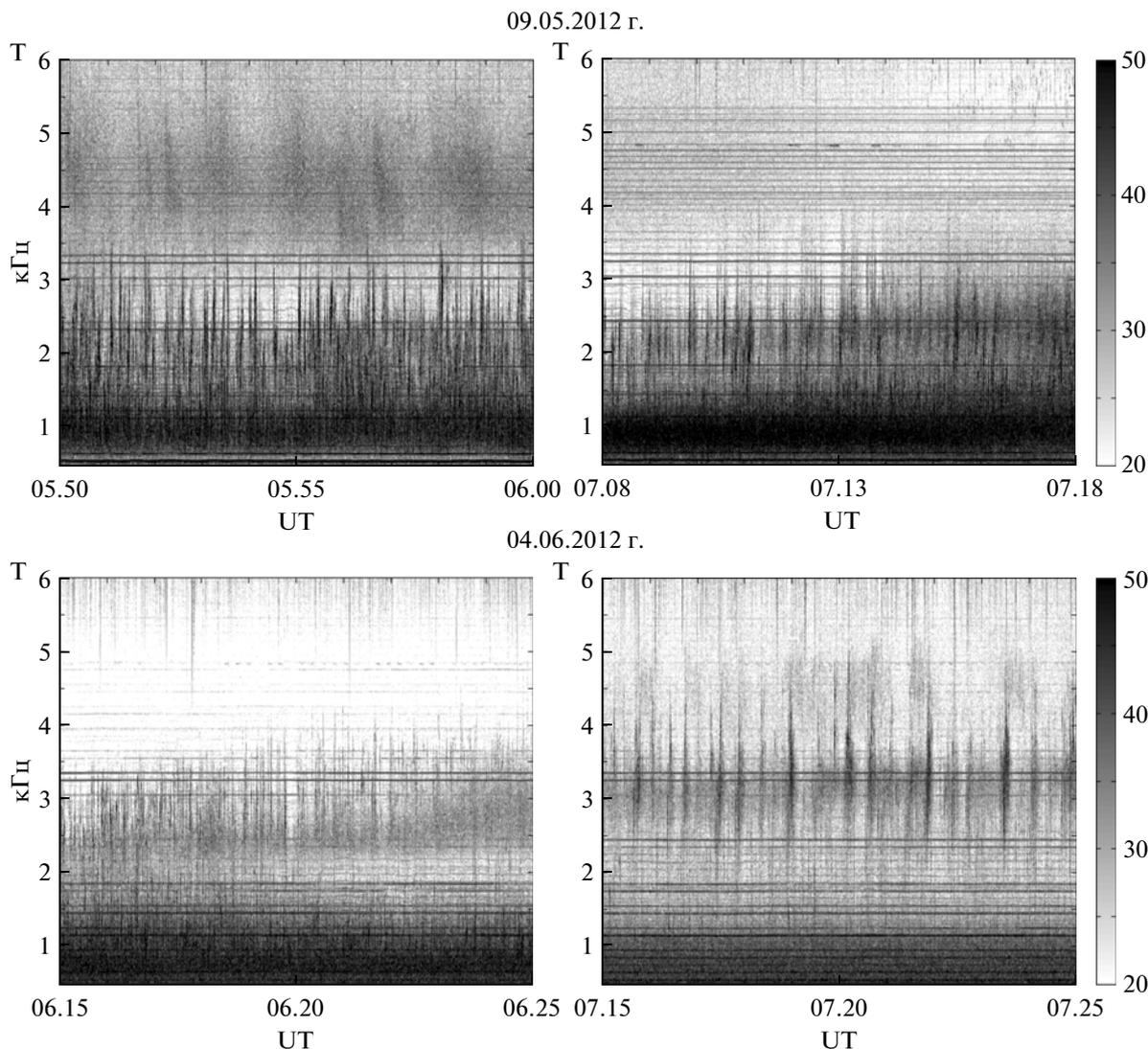


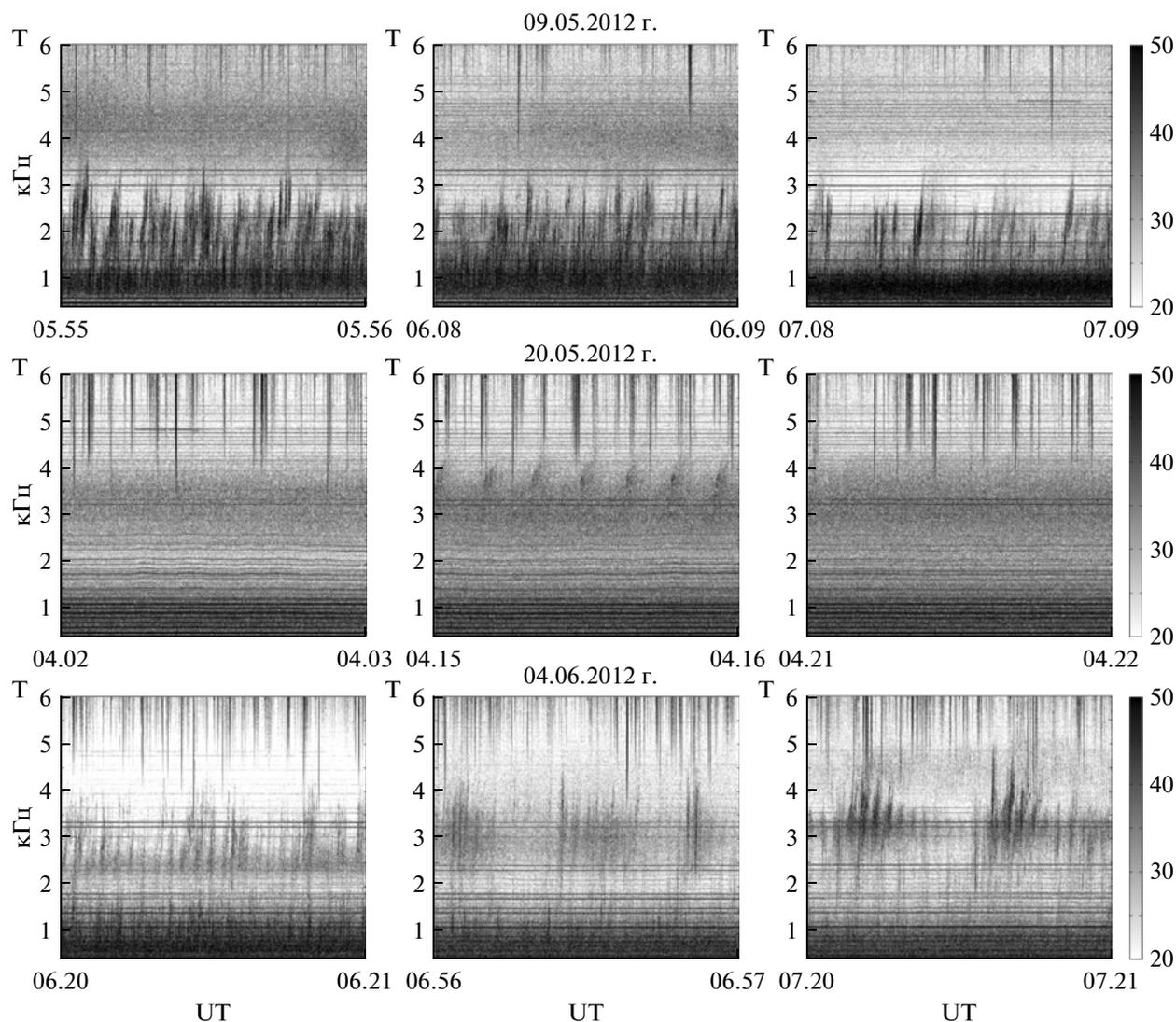
Рис. 3. 10-минутные спектрограммы в начале и конце двух всплесков ОНЧ излучений.

наблюдаемых в период майской ОНЧ кампании 2012 года, отмечалась генерация длительных дневных всплесков ОНЧ шипений в двух частотных полосах. Нижняя полоса состояла из хоровых излучений, наложенных на интенсивные шипения. На рис. 1 видно, что всем анализируемым ОНЧ всплескам за несколько часов предшествовало появление плотных транзиентов в солнечном ветре на фоне отрицательных значений  $V_z$  ММП.

**ОНЧ излучения 20 мая 2012.** В этот день был отмечен подход к магнитосфере Земли межпланетной ударной волны (рис. 2б), проявившийся на земной поверхности как внезапный магнитный импульс ( $S_i$ ) в 02.50 UT. Импульс сопровождался резким всплеском ОНЧ шипений на частотах меньше 3.5 кГц. Подобные всплески ОНЧ излучения ранее неоднократно наблюдались на земной

поверхности во время внезапного начала магнитной бури ( $SC$ ), например, [Клейменова и Осепян, 1982 и цитируемая там литература].

Как и в предыдущих ОНЧ событиях, началу дневного ОНЧ всплеска предшествовала интенсивная суббуря в ночном секторе (обс. IQA). Около 04 UT структура ОНЧ всплеска изменилась, и появились новые, более высокочастотные (2–4 кГц) ОНЧ шипения. Поляризационные характеристики излучений были такими же, как в событиях 23 мая и 4 июня, а именно, высокочастотные ( $f > 2.5$  кГц) волны были эллиптическими, преимущественно лево-поляризованными, а низкочастотные — право-поляризованными. Это может быть результатом особенностей прохождения ОНЧ волн через ионосферу [Volland, 1995], когда одна мода волн переходит в другую, и распространением в волноводе Земля — ионосфера, когда на земной



**Рис. 4.** 1-минутные спектрограммы в отдельные интервалы времени для трех из рассмотренных всплесков ОНЧ излучений.

поверхности вблизи точки выхода волн из ионосферы наблюдается правая поляризация, а на расстояниях больших 100 км — левая. [Nagano et al., 1982].

Одноминутные спектрограммы ОНЧ излучений (рис. 4, средние графики) показывают, что в данном событии излучения представляли собой две полосы шипений, граница между которыми находилась на частоте около 2.2 кГц. Яркие вертикальные сигналы на спектрограммах — дальние атмосферерики — твики (tweeks). Во время этого всплеска в очень коротком интервале времени (~04.10–04.20 UT) было зарегистрировано появление квазипериодических ОНЧ излучений в узкой полосе частот 3.3–4.3 кГц с периодом повторения около 10 с. Такие ОНЧ излучения могут быть результатом развития собственных колеба-

ний в магнитосферном мазере [Беспалов, 1981; Bessalov and Trakhtengerts, 1986].

Таким образом, ОНЧ излучения на переднем фронте высокоскоростных (*CIR*) потоков солнечного ветра и всплеск ОНЧ излучений, вызванный приходом межпланетной ударной волны, имели много общего, прежде всего, возбуждение ОНЧ шипений в двух полосах частот, выше и ниже ~2.2–2.5 кГц. Основное их отличие состояло в том, что в последнем случае не наблюдалось хороших излучений.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Амплитудно-частотный спектр ОНЧ излучений формируется не только в области генерации в магнитосфере Земли, но при распространении

сигнала в магнитосфере, ионосфере и волноводе Земля-ионосфера. Лишь малая часть возбуждающихся вблизи экватора ОНЧ волн и зарегистрированная на спутниках может выйти к поверхности Земли [Maeda and Oya, 1963; Srivastava, 1974]. Только канализированные в магнитосфере волны могут достичь ионосферных высот. Постоянно действующим волноводным каналом для ОНЧ волн является плазмопауза [Inan and Bell, 1977; Thorne et al., 1979], при этом волны могут канализироваться как внешней, так и внутренней кромкой плазмопаузы. В работе [Семенова и Трахтенгерц, 1980] показано, что волны на частотах меньше половины гирочастоты электронов канализируются внутренней кромкой плазмосферы, а на частотах больше этой величины – внешней. Наблюдения над ионосферой на спутнике Ariel-4 показали [Kaiser and Bullough, 1975], что при пересечении спутником плазмопаузы, определяемой по положению ионосферного провала (trough), внутри плазмосферы регистрировались неструктурированные шипения, а за плазмопаузой хоры. Такие же результаты были получены и на ряде других спутников, например, [Wang et al., 2011].

Волноводные каналы (ducts) обычно оканчиваются на высотах порядка 1000–2000 км, и ниже ОНЧ волны распространяются во все стороны, как вода из душа. До высоты порядка 120 км поглощение ОНЧ волн мало (1–3 дБ), но затем оно резко возрастает (до порядка 60 дБ), при этом существует очень узкий (несколько градусов) конус углов волновых нормалей для прохождения ОНЧ волн к земной поверхности [Srivastava, 1974]. Волны с волновыми нормальными вне этого конуса захватываются в нижней ионосфере и не могут выйти в волновод Земля-ионосфера. Таким образом, лишь очень небольшая часть магнитосферных ОНЧ волн может выйти к земной поверхности.

В то же время недавно появилась теоретическая работа [Kuzichev, 2012], в которой автор показывает возможность выхода свистовых волн к земной поверхности также и за счет рассеивания на неоднородностях плотности в слое  $F$  ионосферы. По-видимому, этот механизм может быть наиболее эффективным в области ионосферного провала, находящегося вблизи ионосферной проекции плазмопаузы.

Поскольку в волноводе Земля-ионосфера право-поляризованные волны быстро затухают, можно предположить, что точка выхода низкочастотной полосы ОНЧ излучений, характеризующихся правой поляризацией, находилась в окрестности станции KAN. Вероятно, в это время станция KAN располагалась вблизи проекции плазмопаузы. Исходя из геофизической ситуации, можно предположить следующий сценарий.

Резкое сжатие магнитосферы, вызванное, как плотным транзиентом на переднем фронте высо-

коскоростных потоков, так и межпланетной ударной волной (20 мая в 03 UT) привело к ускорению и приближению к Земле захваченных электронов радиационного пояса, находящихся в это время на дневной стороне. Это явилось причиной всплесков ОНЧ излучений, генерация которых может быть объяснена в рамках квазилинейной теории взаимодействия волн и частиц, как это обсуждалось во многих работах, например, [Трахтенгерц, 1963; Huang et al., 1983; Bespalov and Trakhtengerts, 1986; Solomon et al., 1988; Трахтенгерц и Райкрофт, 2011]. Возбуждение циклотронных ОНЧ излучений происходит на частотах, много меньших минимальной гирочастоты электронов. Циклотронная неустойчивость наиболее эффективна внутри плазмосферы.

Типичными ОНЧ излучениями внутри плазмосферы являются низкочастотные плазмосферные шипения [Thorne et al., 1973; Santolik et al., 2001; Bortnik et al., 2011; Tsurutani et al., 2012], интенсивность которых возрастает во время суббурь [Merendith et al., 2004] за счет инжекции энергичных электронов. Частота ОНЧ волн не может быть выше электронной гирочастоты. Минимальная гирочастота электронов на  $L$ -оболочке станции KAN составляет порядка 7 кГц, следовательно, генерация наблюдаемых ОНЧ шипений в полосе 4–6 кГц происходила на  $L < 5$  (внутри плазмосферы), а хоров на частотах  $\sim 1.5$ –3.5 кГц в области  $L > 5$ .

Сжатие магнитосферы привело также к перемещению плазмопаузы на меньшие  $L$ -оболочки. В таких условиях станция KAN ( $L = 5.3$ ) могла оказаться за плазмопаузой, что для рассмотренных выше событий было подтверждено модельными расчетами положения плазмопаузы [www.spaceweather.eu/en/plasmapause]. После того, как динамическое давление солнечного ветра упало, магнитосфера начала расширяться, а плазмопауза возвращаться к своему первоначальному положению, ее проекция могла оказаться в окрестности станции KAN, что способствовало выходу ОНЧ волн к земной поверхности. Подтверждением расширения магнитосферы может быть наблюдаемое уменьшение со временем резонансных частот геомагнитных пульсаций Pc4, наблюдаемых в это время в обс. Соданкюля (рис. 5). Уменьшение резонансных частот означает, что проекция данной точки перемещается на большие  $L$ -оболочки.

Поскольку ОНЧ волны из магнитосферы направляются к ионосфере как внешней, так и внутренней кромкой плазмопаузы, то возбужденные вне и внутри плазмосферы волны могут суммироваться, как в области выхода волн из ионосферы в волновод, так и при распространении этих волн в приземном волноводе.

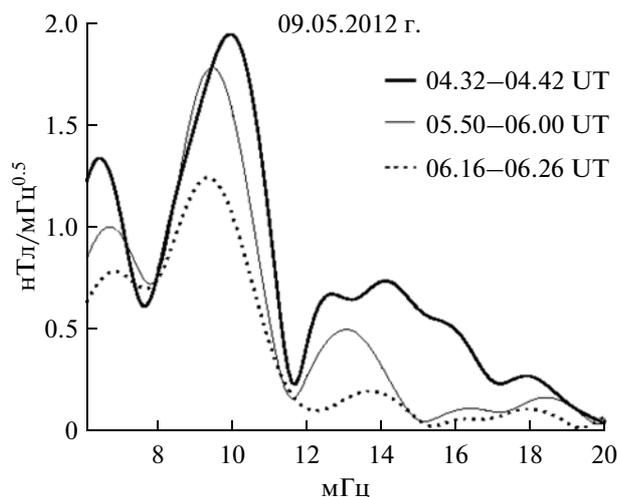


Рис. 5. Спектры геомагнитных пульсаций диапазона во время всплесков ОНЧ излучений 9 мая 2012 г.

Таким образом, мы предполагаем, что генерация дневных ОНЧ излучений была вызвана поджатием магнитосферы плотным транзиентом в солнечном ветре перед высокоскоростным потоком или межпланетной ударной волной. Отрицательные значения  $V_z$  ММП способствовали поступлению энергии в магнитосферу Земли и возрастанию потоков энергичных электронов. Это создавало условия для развития циклотронной неустойчивости и возбуждению ОНЧ излучений: высокочастотных шипений в полосе 4–6 кГц на  $L < 5$  и хоров на  $L > 5$ . Низкочастотные (меньше 1.5 кГц) шипения, согласно [Tsurutani et al., 2012 и цитируемой там литературе], могли возбуждаться, как внутри, так и вне плазмосферы. Излучения канализировались к Земле плазмопаузой и регистрировались на земной поверхности, когда точка наблюдений (станция KAN) оказывалась вблизи ее проекции.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа ОНЧ наблюдений на наземной станции, расположенной на  $L = 5.3$  установлено, что на переднем фронте высокоскоростных потоков солнечного ветра, как и при подходе к магнитосфере межпланетной ударной волны, наблюдалось возбуждение длительных (несколько часов) ОНЧ излучений в двух полосах частот, выше и ниже  $\sim 2.5$  кГц.

На частотах выше  $\sim 2.5$ – $3.0$  кГц наблюдались ОНЧ шипения, временная структура которых часто состояла из квазипериодической последовательности отдельных более сильных пятен шумовых сигналов. Низкочастотную полосу представляли собой хоры, наложенные на интенсивные шипения на частотах ниже  $\sim 1.5$  кГц. Высказано предположение, что генерация высокочастотных

ОНЧ шипений происходила на  $L < 5$ , а ОНЧ хоров на  $L > 5$ .

Высокочастотные ( $f > 2.5$  кГц) волны были эллиптическими, преимущественно лево-поляризованными, а низкочастотные – право-поляризованными, что может быть результатом расположения станции наблюдения (KAN) далеко (более 100 км) от точки выхода волн из ионосферы.

Работа была выполнена при поддержке Программы № 22 Президиума РАН и гранта РФФИ № 12-05-01030.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беспалов П.А. Самомодуляция излучения плазменного циклотронного мазера // Письма в ЖЭТФ. Т. 33. № 4. С. 192–195. 1981.
- Клейменова Н.Г., Осепян А.П. ОНЧ-излучения во время внезапных начал магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 22. № 4. С. 681–693. 1982.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Маннинен Ю., Раита Т., Корнилова Т.А., Корнилов И.А. Высокоширотные геомагнитные возмущения в начальную фазу рекуррентной магнитной бури (27 февраля–2 марта 2008 г.) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 6. С. 746–756. 2011.
- Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Беспалов П.А., Раита Т. Квазипериодические ОНЧ излучения, ОНЧ хоры и геомагнитные пульсации  $Pc4$  (событие 3 апреля 2011 г.) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 1. С. 82–92. 2012.
- Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 3. ОНЧ-излучения. Л.: ЛГУ, 1977. 144 с.
- Семенова В.И., Трахтенгерц В.Ю. О некоторых особенностях волноводного распространения низкочастотных волн // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 20. № 6. С. 1021–1027. 1980.
- Трахтенгерц В.Ю. О механизме генерации ОНЧ излучений во внешнем радиационном поясе Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 3. № 3. Р. 442–451. 1963.
- Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Дж. Свистовые и альвеновские мазеры в космосе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 344 с. 2011.
- Bepalov P.A., Trakhtengerts V.Y. The cyclotron instability in the Earth radiation belts // Reviews of Plasma Physics. V. 10. Ed. M.A. Leontovich-New York: Plenum, 1986. P. 155–192.
- Bortnik J., Chen L., Li W., Thorne R.M., Meredith N.P., Horne R.B. Modeling the wave power distribution and characteristics of plasmaspheric hiss // J. Geophys. Res. V. 116. A12209, doi:10.1029/2011JA016862. 2011.
- Haykawa M., Sazhin S.S. Mid-latitude and plasmaspheric hiss: a review // Planet. Space Sci. V. 40. № 10. P. 1325–1338. 1992.
- Helliwell R.A. Whistler and related ionospheric phenomena. Stanford. Stanford Univ. Press. 349 p. 1965.
- Huang C.Y., Goertz C.K., Anderson R.R. A theoretical study of plasmaspheric hiss generation // J. Geophys. Res. V. 88. P. 7927–7940. 1983.

- *Inan U.S., Bell T.F.* The plasmopause as a VLF guide // *J. Geophys. Res.* V. 82. P. 2819–2827. 1977.
- *Kaiser T.R., Bullough K.* VLF- and ELF-emissions // *Ann. Geophys.* V. 31. № 1. P. 137–141. 1975.
- *Kuzichev I.V.* On whistler mode wave scattering from density irregularities in the upper ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 117. A06325, doi: 10.1029/2011JA017130. 2012.
- *Maeda K., Oya H.* Penetration of VLF radio waves through the ionosphere // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 14. № 3. P. 151–171. 1963.
- *Manninen J.* Some aspects of ELF\_VLF emissions in geophysical research, Sodankyla Geophysical Observatory Publications. № 98. 177 p. 2005.
- *Meredith N.P., Horne R.B., Thorne R.M., Summers D., Anderson R.R.* Substorm dependence of plasmaspheric hiss // *J. Geophys. Res.* V. 109, A06209, doi:10.1029/2004JA010387. 2004.
- *Nagano I., Mambo M., Yoshizawa S., Kimura I., Yamagishi H.* Full wave calculation for a Gaussian VLF wave injection into the ionosphere // *Mem. Nat. Inst. Polar Res.* V. 22. P. 46–57. 1982.
- *Santolik O., Parrot M., Storey L.R.O., Pickett J.S., Gurnett D.A.* Propagation analysis of plasmaspheric hiss using Polar PWI measurements // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. № 6. P. 1127–1130. 2001.
- *Sazhin S.S., Hayakawa M.* Magnetospheric chorus emissions^ a review // *Planet. Space Sci.* V. 40. P. 681–697. 1992.
- *Solomon J., Cornilleau-Wehrlin N., Korth A., Kremser G.* An experimental study of ELF/VLF hiss generation in the Earth's magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 93. P. 1839–1847. 1988.
- *Srivastava R.N.* Propagation of VLF emissions in the magnetosphere and the ionosphere // *Planet. Space Sci.* V. 22. P. 1545–1564. 1974.
- *Thorne R.M., Smith E.J., Burton R.K., Holzer R.E.* Plasmaspheric hiss // *J. Geophys. Res.* V. 78. P. 1581–1596. 1973.
- *Thorne R.M., Church S.R., Gorney D.J.* On the origin of the plasmaspheric hiss: the importance of wave propagation and the plasmopause // *J. Geophys. Res.* V. 84. P. 5241–5247. 1979.
- *Tsurutani B.T., Falkowski B.J., Verkhoglyadova O.P., Pickett J.S., Santolik O., Lakhina G.S.* Dayside ELF electromagnetic wave survey: A Polar statistical study of chorus and hiss // *J. Geophys. Res.*, V. 117. A00L12, doi: 10.1029/2011JA017180. 2012.
- *Volland H.* Long-wave sferics propagation within the atmospheric waveguide // *Handbook of atmospheric electrodynamics.* V. 2. Ed. H. Volland. CRC Press Inc. NW Boca Raton, Florida, US. P. 56–93. 1995.
- *Wang C., Zong Q., Xiao F., Su Z., Wang Y., Yue C.* The relations between magnetospheric chorus and hiss inside and outside the plasmasphere boundary layer: Cluster observation // *J. Geophys. Res.* V. 116. A07221. doi:10.1029/2010JA016240. 2011.
- *Yearby K.H., Smith A.J.* The polarization of whistlers received on the ground near  $L = 4$  // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 56. P. 1499–1512. 1994.