

УДК 550.385.37

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ, ОНЧ ХОРЫ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ $Pc4$ (СОБЫТИЕ 3 АПРЕЛЯ 2011 г.)

© 2012 г. Ю. Маннинен¹, Н. Г. Клейменова^{2, 3}, О. В. Козырева²,
П. А. Беспалов⁴, Т. Раита¹

¹ Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

² Учреждение РАН Институт физики Земли, г. Москва, Россия

³ Учреждение РАН Институт космических исследований, г. Москва, Россия

⁴ Учреждение РАН Институт прикладной физики, г. Нижний Новгород, Россия

e-mail: jyrki.manninen@sgo.fi

Поступила в редакцию 26.07.2011 г.

Обсуждаются результаты анализа наземных наблюдений ОНЧ излучений в Скандинавии ($L \sim 5$) в апреле 2011 г. Детально исследуется нетипичное событие (3 апреля 2011 г.) одновременной генерации ОНЧ хоров на частотах ниже 3 кГц и квазипериодических ОНЧ излучений (QP) в полосе 4–6 кГц, которые не являлись дискретными излучениями, а представляли собой отдельные короткие (порядка 20 с) всплески шипений. Показано, что указанные излучения характеризовались, в основном, правой поляризацией, что свидетельствует о нахождении точки выхода волн из ионосферы вблизи пункта наземных наблюдений. На основе анализа спектральных особенностей излучений делается вывод о том, что области генерации хоров и QP излучений располагались на разных L оболочках. Появление QP излучений совпало с возбуждением в магнитосфере резонансных геомагнитных пульсаций диапазона $Pc4$, период которых был близким к квазипериоду повторения спектральных форм в QP излучениях. Однако на основе имеющихся данных нельзя сделать вывод, что именно эти геомагнитные пульсации вызвали квазипериодическую генерацию всплесков ОНЧ шипений. Временной сдвиг между всплесками QP и геомагнитными пульсациями был непостоянным и менялся от одного всплеска шипений к другому. Высказано предположение, что обсуждаемые QP излучения были результатом развития автоколебаний в радиационных поясах Земли.

1. ВВЕДЕНИЕ

Квазипериодические ОНЧ излучения (QP -emissions) известны давно. Разнообразие их спектральных форм приведено в монографии [Helliwell, 1965]. Эти излучения наиболее часто наблюдаются в дневное время на частотах меньше 3 кГц [Kimura, 1974]. В сопряженных точках QP излучения, как правило, появляются одновременно [Коротова и др., 1975; Sato and Kokubun, 1981].

В работах [Kitamura et al., 1969; Sato et al., 1974] QP излучения были разделены на два типа: связанные и не связанные с геомагнитными пульсациями. Первый тип (QP -1) — это ОНЧ излучения, обычно представляющие собой полосу КНЧ-ОНЧ шипения (hiss) на частотах ниже 2–3 кГц, интенсивность которых (или только верхняя граничная частота) флюктуирует с периодами одновременно наблюдаемых геомагнитных пульсаций. Второй тип квазипериодических ОНЧ излучений (QP -2) обычно не сопровождается геомагнитными пульсациями (по крайней мере, на земной поверхности) и состоит из отдельных регулярно повторяющихся спектральных элементов на частотах порядка 1.5–3.0 кГц. QP -1 излучения обычно наблюдаются в умеренно возмущенных условиях

при $Kp \sim 2$ –4, а QP -2 — в магнитоспокойных условиях при $Kp < 2$.

Первый тип (QP -1), т.е. модулированные шипения — довольно частое явление в субавроральных широтах [Распопов и Клейменова, 1977], при этом обычно модулированным оказывается не весь всплеск, а только его часть. Наиболее часто модулирующими геомагнитными пульсациями в ночные часы являются колебания типа $Pi2$ [например, Коротова и др., 1975], а в дневные $Pc3$ и $Pc5$ [Распопов и Клейменова, 1977; Маннинен и др., 1994; Morrison et al., 1990]. Многочисленные экспериментальные факты свидетельствуют о синхронных вариациях с одними и теми же периодами интенсивности ОНЧ излучений, геомагнитных пульсаций, потоков высыпающихся энергичных частиц и светимости полярных сияний [Kitamura et al., 1969; Kimura, 1974; Fukunishi et al., 1974; Коротова и др., 1975; Распопов и Клейменова, 1977; Sato and Kokubun, 1980; Morrison, 1990; Маннинен и др., 1994; Engebretson et al., 2004; Manninen, 2005]. Так, в ракетном эксперименте в обл. Кергелен ($L \sim 3.8$) была обнаружена одновременная модуляция интенсивности ОНЧ излучения и потоков энергичных частиц с периодом около 80 с со сдвигом фазы $\sim 30^\circ$ [Gendrin et al., 1970]. Моду-

лированные ОНЧ излучения и пульсирующие с теми же периодами (~12–25 с) потоки высыпавшихся энергичных электронов наблюдались также и на спутниках Интеркосмос-3 и Интеркосмос-5 [Захаров и др., 1974] вблизи плазмопаузы в ограниченных областях L -оболочек, где, по мнению авторов, происходило возбуждение ОНЧ излучений.

Второй тип ($QP-2$), т.е. излучения, не сопровождающиеся геомагнитными пульсациями, как правило, наблюдаются за плазмопаузой и имеют период повторения дискретных элементов от 10 до 50 с. Обычно во время каждого отдельного события период повторения дискретных ОНЧ сигналов остается постоянным. Так, наблюдения на спутнике GEOS-1 вблизи экваториальной плоскости показали [Tixier and Cornilleau-Wehrline, 1986], что квазипериодические ОНЧ излучения наблюдались преимущественно вне плазмопаузы на магнитных оболочках $L \sim 5-7$, излучения регистрировались одновременно на спутнике и на земной поверхности в точке, расположенной вблизи проекции спутника, с ослаблением ~20 дБ. При этом авторы не обнаружили четкой разницы между $QP-1$ и $QP-2$ излучениями, а в качестве модулирующих колебаний рассматривались волны сжатия (compressional component), отвечающие гармоникам фундаментальной частоты резонансных колебаний силовых линий.

Иногда $QP-2$ излучения представляют собой квазипериодические “пятна” шумовых излучений, часто распадающиеся на отдельные сигналы длительностью ~3–5 с [Sato and Kokubun, 1981]. В работе [Bespalov et al., 2010] приведены спутниковые и наземные экспериментальные данные, относящиеся к таким короткопериодическим сигналам, а возбуждение этих сигналов объяснено в рамках теории пассивной синхронизации мод в плазменном магнитосферном мазере.

Исследования квазипериодических излучений обычно проводятся с помощью наземных наблюдений, поскольку спутники слишком быстро пересекают широтные зоны и не могут различать пространственные и временные вариации, а геостационарные спутники находятся на экваторе на L -оболочке большей, чем те, на которых происходит генерация этих ОНЧ излучений. Отметим, что в многоспутниковых проектах Cluster, Double Star, THEMIS указанное ограничение было преодолено для хоровых излучений.

К сожалению, в настоящее время на Земле осталось всего несколько станций, где выполняется регулярная регистрация ОНЧ излучений. При этом на многих из них проводится лишь запись интегральной интенсивности ОНЧ излучений в выбранных полосах частот (filter bank record), при которой оба типа квазипериодических излучений проявляются одинаково — как до-

вольно регулярные осцилляции огибающей ОНЧ излучений в некоторой полосе частот.

Регулярные кампании ОНЧ наблюдений ежегодно проводятся в северной Финляндии на временных точках, расположенных на расстояниях ~35–40 км от населенных пунктов, линий электропередач и промышленных объектов, т.е. от возможных источников промышленных помех. Цифровая компьютерная регистрация ОНЧ сигналов выполняется в полосе 0.5–10 кГц с пороговой чувствительностью приемника порядка 10^{-15} Тл при отношении сигнал/шум 150 дБ, с частотой опроса ~40 кГц и разрешением в 16 бит. Регистрация ОНЧ излучений осуществляется с помощью двух вертикальных ортогональных рамочных антенн, что позволяет исследовать поляризационные характеристики сигналов. В работе [Manninen, 2005] приведено описание регистрирующей аппаратуры и метода анализа цифровой информации с помощью специальных компьютерных программ, разработанных проф. Т. Туруненом.

Целью данной работы является исследование особенностей нетипичных квазипериодических ОНЧ излучений на частотах выше 4 кГц, зарегистрированных в ходе последней ОНЧ кампании в марте–апреле 2011 г. Детально рассмотрено событие 3 апреля 2011 г., когда необычные квазипериодические ОНЧ излучения на частотах ~3.5–6.0 кГц наблюдались одновременно с хорами на частотах меньше 3 кГц. Такого типа ОНЧ излучения ранее в литературе никогда не обсуждались.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НАБЛЮДЕНИЙ

В апреле 2011 г. на севере Финляндии был проведен сеанс ОНЧ наблюдений вблизи обс. Соданкюля (временный пункт Kannuslehto, географические координаты: $\varphi = 67.74^\circ$ N, $\lambda = 26.27^\circ$ E, исправленные геомагнитные координаты: $\Phi = 64.2^\circ$; $\Lambda = 107.9^\circ$, $L \sim 5$). В данной работе будет рассмотрен всплеск квазипериодических ОНЧ излучений, зарегистрированный 3 апреля в интервале 04–06 UT в умеренно возмущенных условиях ($Kp \sim 3$) при высокоскоростном потоке солнечного ветра (~600 км/с) и небольших отрицательных значениях Bz ММП.

На рисунке 1 приведена 3-х часовая спектрограмма ОНЧ излучений (quick-look plot) в диапазоне частот 0.5–7.0 кГц. Горизонтальные сплошные линии на рисунке — это промышленные помехи в виде гармоник излучений от линий электропередач. Темные вертикальные линии в верхней части спектрограммы — дальние атмосферерики (твики). Заметим, что исходные спектрограммы ОНЧ излучений строятся в виде цветных графиков, перевод которых в черно-белый вариант, к сожалению, приводит к значительной потере наглядности и выразительности. На ОНЧ спектрограмме (рис. 1)

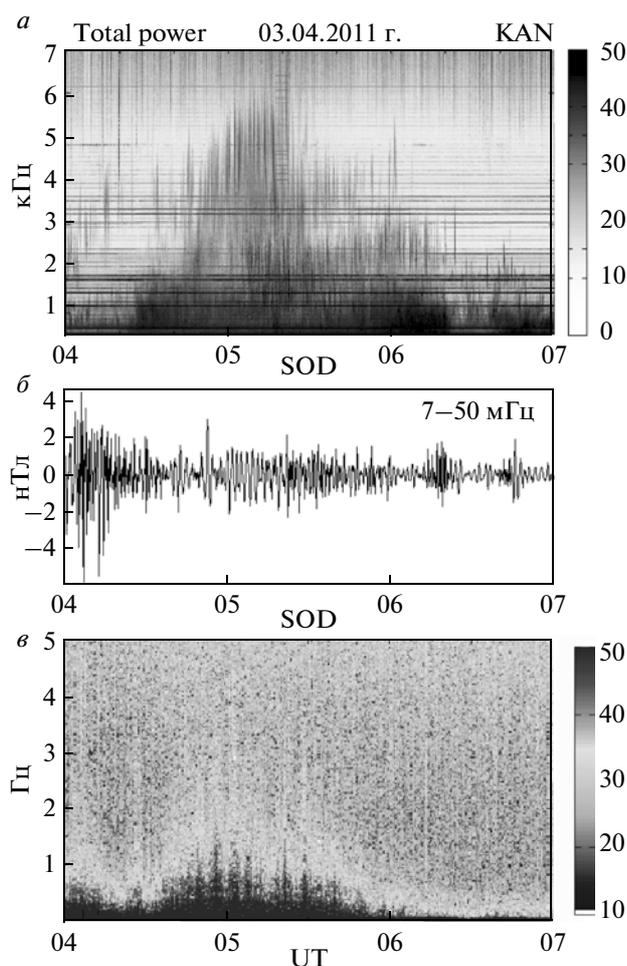


Рис. 1. Спектрограмма ОНЧ излучений 3 апреля 2011 г. в интервале 04–07 UT (а), отфильтрованные в полосе 7–50 мГц геомагнитные пульсации в обс. SOD (б) и спектрограмма геомагнитных пульсаций типа *Pi1C* (в).

видно, что интенсивные хоровые излучения на частотах ниже $\sim 1.5\text{--}2.0$ кГц наблюдались в интервале $\sim 04.30\text{--}06.20$ UT. Несколько позже ($\sim 05.10\text{--}06.30$ UT) хоры отмечались также и в более высокочастотной полосе ($f \sim 1.8\text{--}3.0$ кГц), а в интервале 04.55–05.20 UT регистрировались также интенсивные квазипериодические излучения (*QP*) на частотах выше ~ 4 кГц, детальный анализ которых будет проведен ниже.

Необычным в обсуждаемом событии была одновременная генерация ОНЧ хоров на частотах меньше 3 кГц и *QP* излучений на частотах $\sim 4\text{--}6$ кГц.

Генерация всплесков ОНЧ хоров сопровождалась шумовыми геомагнитными пульсациями типа *Pi1C* (нижний график на рис. 1), что обычно для ОНЧ хоров и свидетельствует об усилении потоков высыпающихся в ионосферу энергичных электронов [Troitskaya and Kleimenova, 1972].

Всплеск квазипериодических ОНЧ излучений был зарегистрирован через 2 ч после окончания

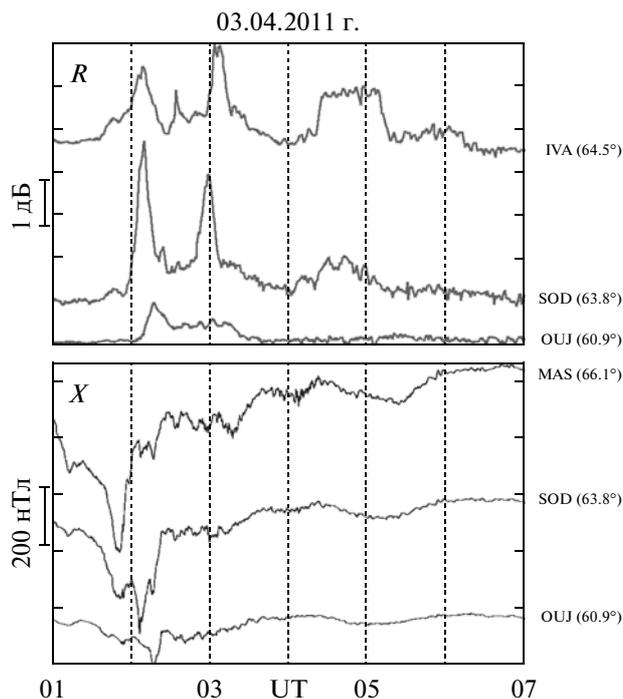


Рис. 2. Вариации риометрического поглощения и магнитосферная суббури по данным наблюдений на трех обсерваториях скандинавского профиля IMAGE

небольшой (~ 350 нТл) суббури, сопровождаемой всплесками риометрического поглощения (рис. 2). Эти условия типичны для утренних ОНЧ хоров. Усиление риометрического поглощения в начале всплеска *QP* излучений свидетельствует об увеличении потоков высыпающихся энергичных электронов, связанных с генерацией ОНЧ хоров. Однако типичных для хоров геомагнитных пульсаций в диапазоне *Pc5* ($f \sim 1.7\text{--}6.7$ мГц) в это время не наблюдалось.

На рисунке 1 видно, что квазипериод *QP* излучений составляет порядка 2 мин. Для выяснения, наблюдались ли в это время геомагнитные пульсации близкого диапазона частот, 10-ти секундные данные наблюдений на Скандинавском профиле IMAGE были отфильтрованы в диапазоне геомагнитных пульсаций *Pc3-4* ($f \sim 7\text{--}50$ мГц) и приведены в средней части рис. 1. Видно, что с появлением *QP* излучений на частотах выше 4 кГц, шумовой режим *Pc3-4* пульсаций сменился на квазимонохроматический с видимым периодом $\sim 100\text{--}110$ с (диапазон *Pc4*). Как только генерация *QP* излучений прекратилась, монохроматические геомагнитные пульсации также прекратились.

На рис. 3а показаны амплитудные спектры геомагнитных пульсаций и вариаций риометрического поглощения для двух интервалов: 04.55–05.14 UT, когда наблюдались *QP* излучения, и 05.21–05.40 UT – после их окончания. На

03.04.2011 г.

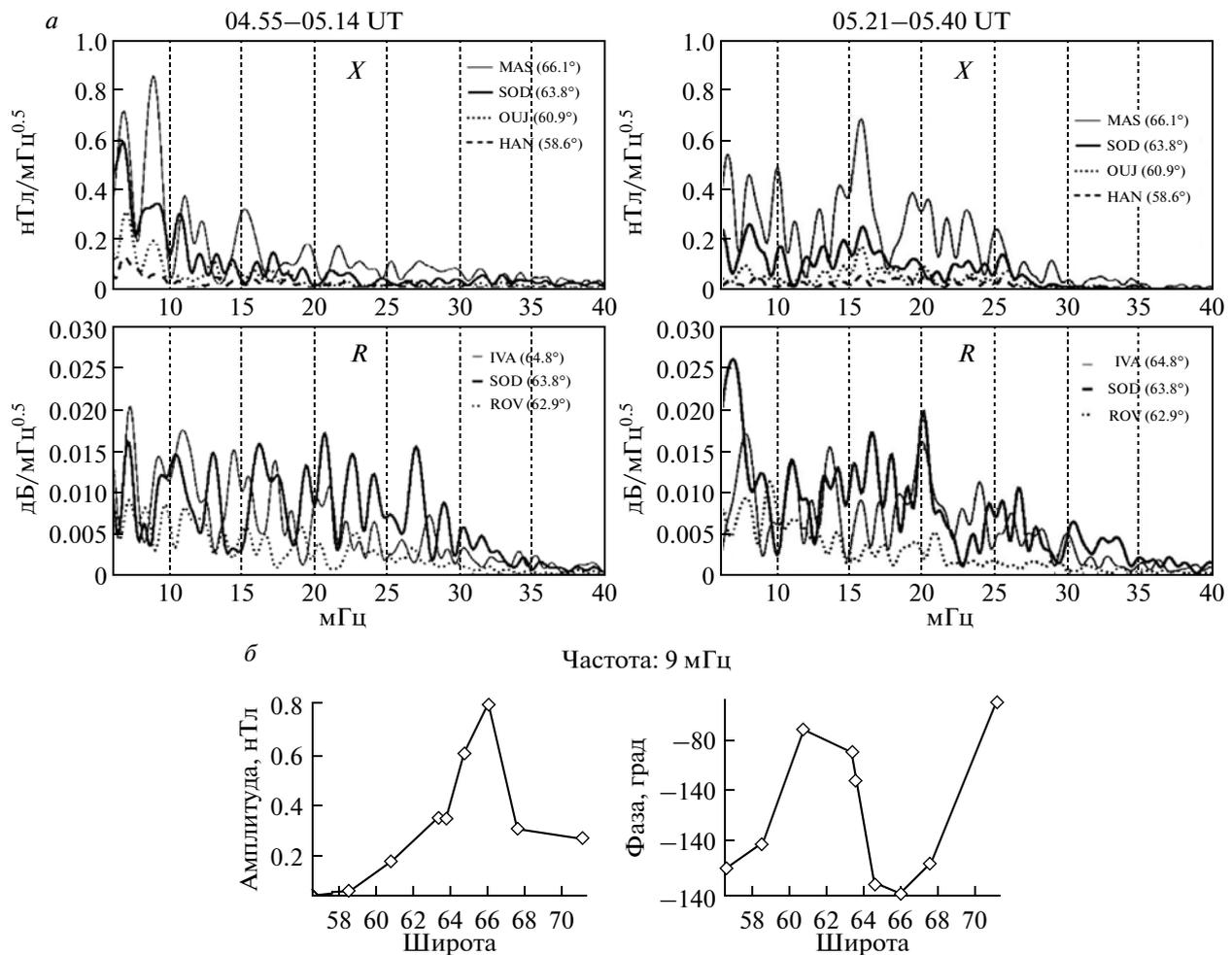


Рис. 3. Амплитудные спектры геомагнитных пульсаций и вариаций риометрического поглощения на нескольких скандинавских станциях (*a*) во время (04.55–05.14 UT) и после (05.21–05.40 UT) всплеска *QP* излучений, *б* – широтное распределение амплитуды и фазы геомагнитных пульсаций на частоте 9 мГц в первом интервале.

графиках приведены данные нескольких станций, расположенных вблизи пункта ОНЧ наблюдений (SOD), на более высоких широтах (MAS и IVA) и более низких широтах (OUI, HAN и ROV).

В первом интервале наибольшая амплитуда геомагнитных пульсаций на всех станциях отмечалась на частотах 8–10 мГц (периоды ~100–120 с). Во втором интервале геомагнитные колебания были более высокочастотными и носили шумовой характер. Спектры вариаций риометрического поглощения в обоих интервалах отличались от спектров геомагнитных пульсаций и носили шумовой характер с некоррелированными между обсерваториями максимумами. Заметим, что полоса частот 8–10 мГц соответствует фундаментальной частоте резонанса силовых линий на $L \sim 6$ ($\Phi = 66^\circ$), т.е. на широте станции MAS. На рис. 3б показано пространственное распределение амплитуд и фаз гео-

магнитных колебаний на частоте спектрального максимума (9 мГц) в интервале 04.55–05.14 UT. Четко видно, что амплитудный максимум и смена фаз колебаний наблюдались на геомагнитной широте $\sim 66^\circ$, что подтверждает резонансную природу этих пульсаций. Более детально структура ОНЧ излучений в интервале 05–06 UT, т.е. вблизи максимума всплеска *QP* излучений, показана на рис. 4. Видна одновременность окончания *QP* излучений и квазимонохроматических геомагнитных пульсаций диапазона *Pc4*.

Известно, что фазовые сдвиги *QP* излучений и геомагнитных пульсаций, возникающие за счет разницы в скоростях распространения свистовых и альвеновских волн в магнитосфере, позволяют установить, находится область взаимодействия волн в ионосфере или магнитосфере. Для определения фазовых соотношений *QP* излучений и геомагнитных пульсаций они представлены на рис. 5

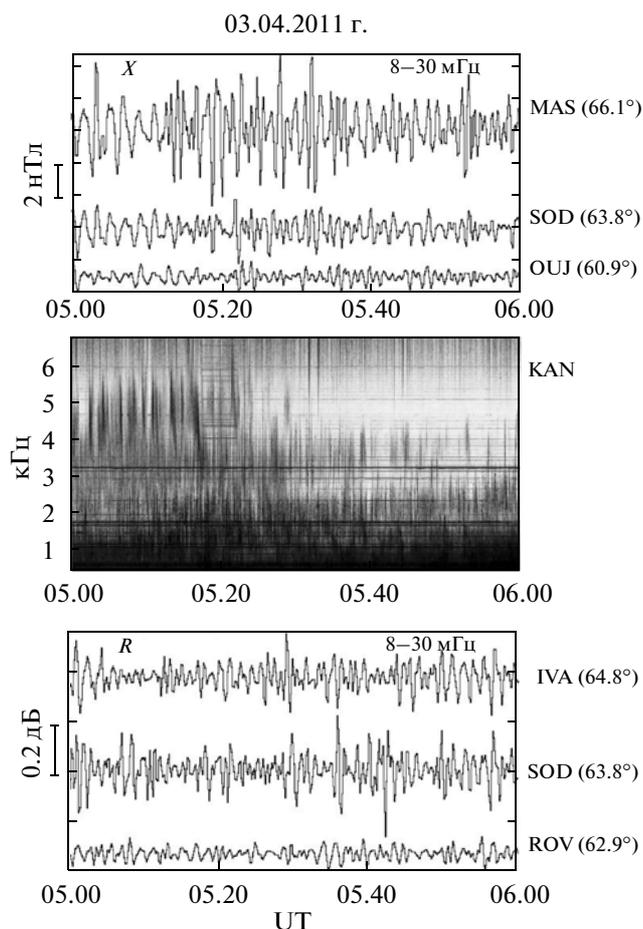


Рис. 4. Геомагнитные пульсации (верхние графики) и вариации риометрического поглощения (нижние графики) в полосе 8–30 МГц во время QP излучений (средний график) в интервале 05–06 UT.

в более крупном масштабе. Видно, что несмотря на близкий диапазон периодов (~ 2 мин) QP излучений и геомагнитных пульсаций, четкой корреляции между ними нет, и сдвиг фаз изменяется от одного всплеска ОНЧ излучений к другому. Это, в частности, позволяет сделать вывод, что взаимодействие волн происходит не в ионосфере.

Для иллюстрации спектральной структуры QP излучений на рис. 6 показаны два 4-х минутных отрезка спектрограмм. На них также приведены геомагнитные пульсации, отфильтрованные в полосе спектрального максимума (8–10 МГц). Этот рисунок, прежде всего, позволяет заключить, что QP излучения представляют собой не дискретные сигналы, а отдельные всплески шипений в полосе ~ 4 –6 кГц длительностью от 20 до 60 с. Четкой временной связи появления отдельных всплесков шипений с наблюдаемыми одновременно геомагнитными пульсациями $Pc4$ (период 110 с) не установлено.

На рис. 6 также видно, что QP излучения сопровождаются одновременной генерацией ОНЧ

хоров на более низких частотах (~ 2 –4 кГц), которые состоят из отдельных групп очень коротких сигналов с возрастающими частотами. Возбуждение высокочастотных QP излучений, т.е. отдельных всплесков шипений в полосе ~ 4 –6 кГц, происходит независимо от ОНЧ хоров, наблюдаемых на частотах меньше 4 кГц. Отмеченные морфологические свойства излучений дают основание предположить, что область генерации этих излучений различна. Спектральная структура ОНЧ хоров четко видна на рис. 7, где приведены четыре одноминутных отрезка спектрограмм мм. Хоры представляют собой хаотическую последовательность групп сигналов с повышающимися частотами от 1.5 до 3.5 кГц.

На рис. 8 приведены результаты поляризационного анализа ОНЧ излучений, верхние графики – спектрограммы полной мощности сигналов, средние – право-поляризованных (R) волн и нижние – лево-поляризованных (L) волн. Слева показан первый временной интервал, а справа более детально его центральная часть. Видно, что как QP излучения, так и ОНЧ хоры являются преимущественно право-поляризованными волнами, что позволяет предположить, что эти сигналы пришли к точке наблюдения с близких расстояний, т.е. точка выхода волн из ионосферы была удалена от приемного пункта на расстояние, не более порядка высоты ионосферы.

На основе анализа эллипсов поляризации ОНЧ излучений в горизонтальной плоскости были вычислены углы прихода волн на различных частотах (рис. 9). Углы определялись как направление малых осей эллипсов поляризации, что позволяет определить лишь направления, а не вектора прихода волн. Это значит, что, можно утверждать, что волны пришли, например, с направления север–юг, но остается неизвестным, пришли ли волны с севера или с юга. Анализ данных наблюдений показал, что квазипериодические ОНЧ излучения в полосе частот 4–6 кГц приходят преимущественно с направления север–юг, а ОНЧ хоры – с направления восток–запад. Указанная закономерность подтверждает наш вывод о том, что источники QP излучений и ОНЧ хоров различны.

Прежде, чем переходить к более детальной интерпретации экспериментальных данных, обсудим основные свойства квазипериодических ОНЧ излучений.

3. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ

Поскольку квазипериодические ОНЧ излучений типа $QP-1$, как правило, хорошо сопряжены [Распопов и Клейменова, 1977], то можно заклю-

чить, что область их взаимодействия с геомагнитными пульсациями находится в экваториальной области магнитосферы. Заметим, что в магнитосфере на $L \sim 4-6$ резонансные колебания силовых линий попадают в диапазон частот геомагнитных пульсаций $Pc4$ ($f \sim 7-20$ мГц), а на больших расстояниях – в диапазон $Pc5$ ($f \sim 2-7$ мГц).

В экваториальной плоскости магнитосферы отмечается хорошая корреляция “пик в пик” квазипериодических ОНЧ излучений и геомагнитных пульсаций [Tixier and Cornilleau-Wehrlin, 1986]. Однако на земной поверхности такая корреляция обычно отсутствует, прежде всего, за счет разницы в скоростях распространения свистовых и альвеновских волн в магнитосфере Земли. Сдвиг фаз увеличивается с уменьшением периодов модулирующих колебаний. Кроме того, следует учитывать, что при распространении через ионосферу спектры и фазы геомагнитных пульсаций претерпевают существенные изменения. Следовательно, сдвиг фаз между квазипериодическими ОНЧ излучениями и геомагнитными пульсациями может изменяться со временем.

Заметим, что не все геомагнитные пульсации, возбуждающиеся в магнитосфере, могут выйти к земной поверхности. Так, геомагнитные колебания с большими волновыми азимутальными числами, как правило, к земной поверхности не выходят. Исходя из этого, разделение квазипериодических ОНЧ излучений по наземным данным на $QP-1$ и $QP-2$ не всегда физически обосновано. Кстати, подобный вывод высказывался ранее в работе [Tixier and Cornilleau-Wehrlin, 1986].

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Проведенный выше анализ наблюдений показал два важных результата. Во-первых, продемонстрирован аномальный случай, в котором частоты хоровых излучений были ниже частот шумовых излучений, наблюдаемых одновременно. Во-вторых, выявлены квазипериодические ОНЧ излучения, сопровождаемые геомагнитными пульсациями, но не похожие по своим морфологическим свойствам на известные $QP-1$ и $QP-2$ излучения. Рассмотрим эти два вывода последовательно.

1). В космических экспериментах на высокоапогейных спутниках Cluster было установлено [Santolik et al., 2006], что хоровые излучения возбуждаются электронами с энергиями более 20 кэВ вне плазмосферы [Li et al., 2010] в очень малой сигарообразной области около локального минимума магнитного поля в двух спектральных полосах, центрированных около половины минимальной электронной гирочастоты

$$\omega \approx \omega_{BL}/2. \quad (1)$$

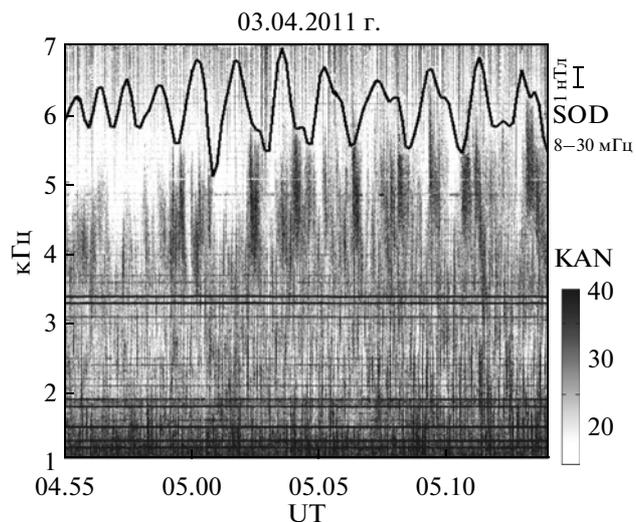


Рис. 5. Спектрограмма QP излучений и геомагнитные пульсации $Pc4$ в обл. SOD в интервале 04.55–05.14 UT.

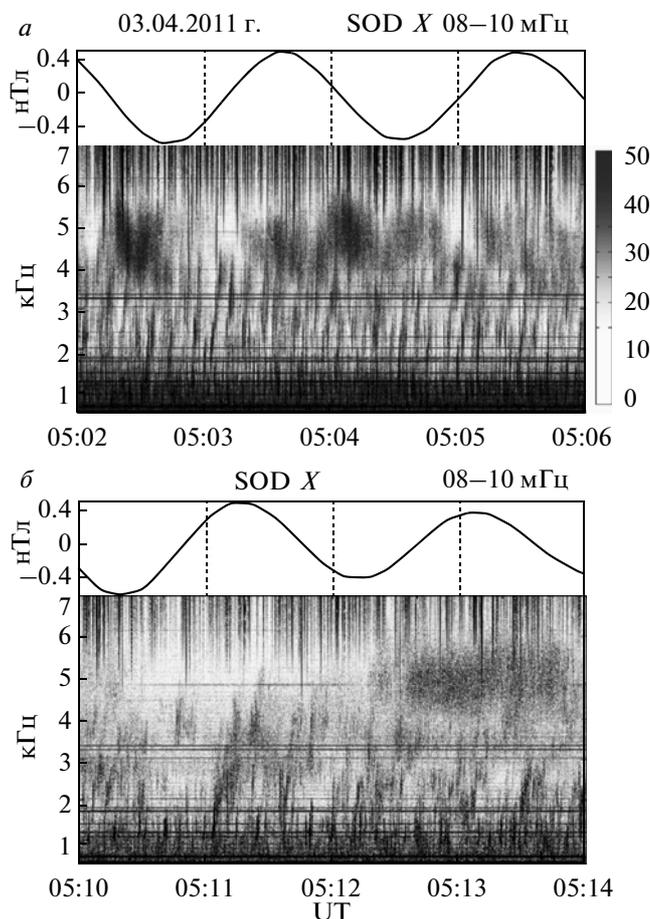


Рис. 6. Два 4-х мин интервала спектрограммы QP излучений и резонансные колебания в полосе частот 8–10 мГц (а, б).

В области дипольного геомагнитного поля экваториальная циклотронная частота может быть записана в виде $f_{BL} = \omega_{BL}/2\pi = 880/L^3$ (кГц). По-

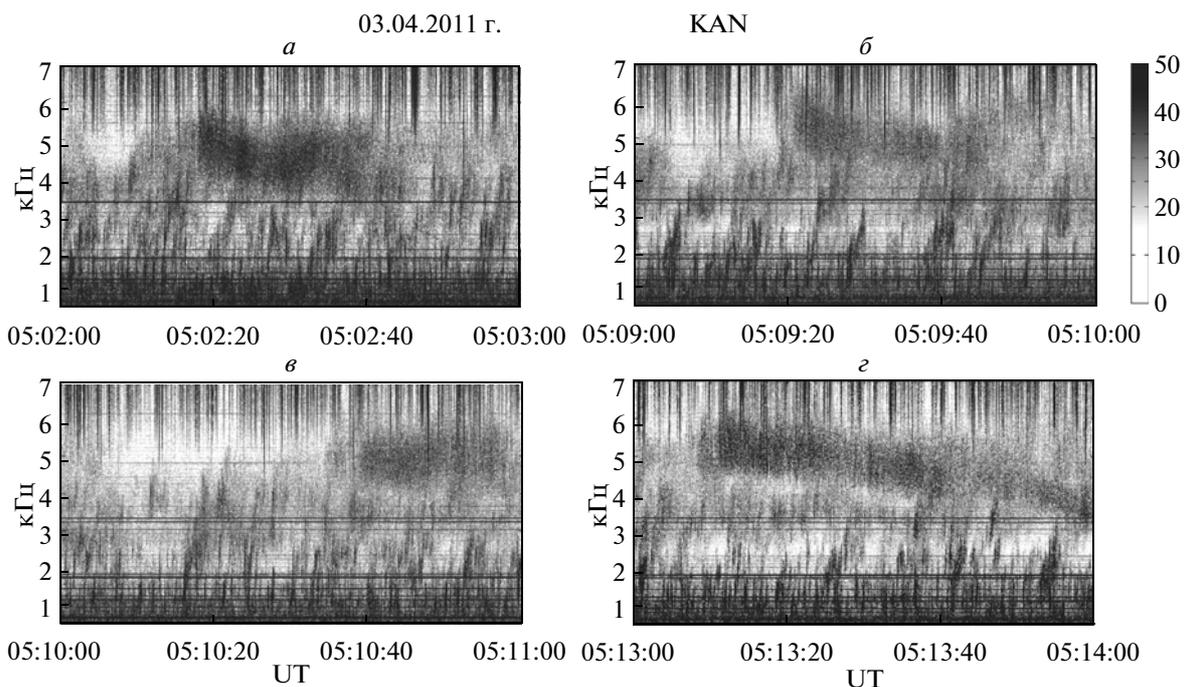


Рис. 7. Четыре одноминутных интервала спектрограммы QP излучений, иллюстрирующих их шумовую спектральную структуру.

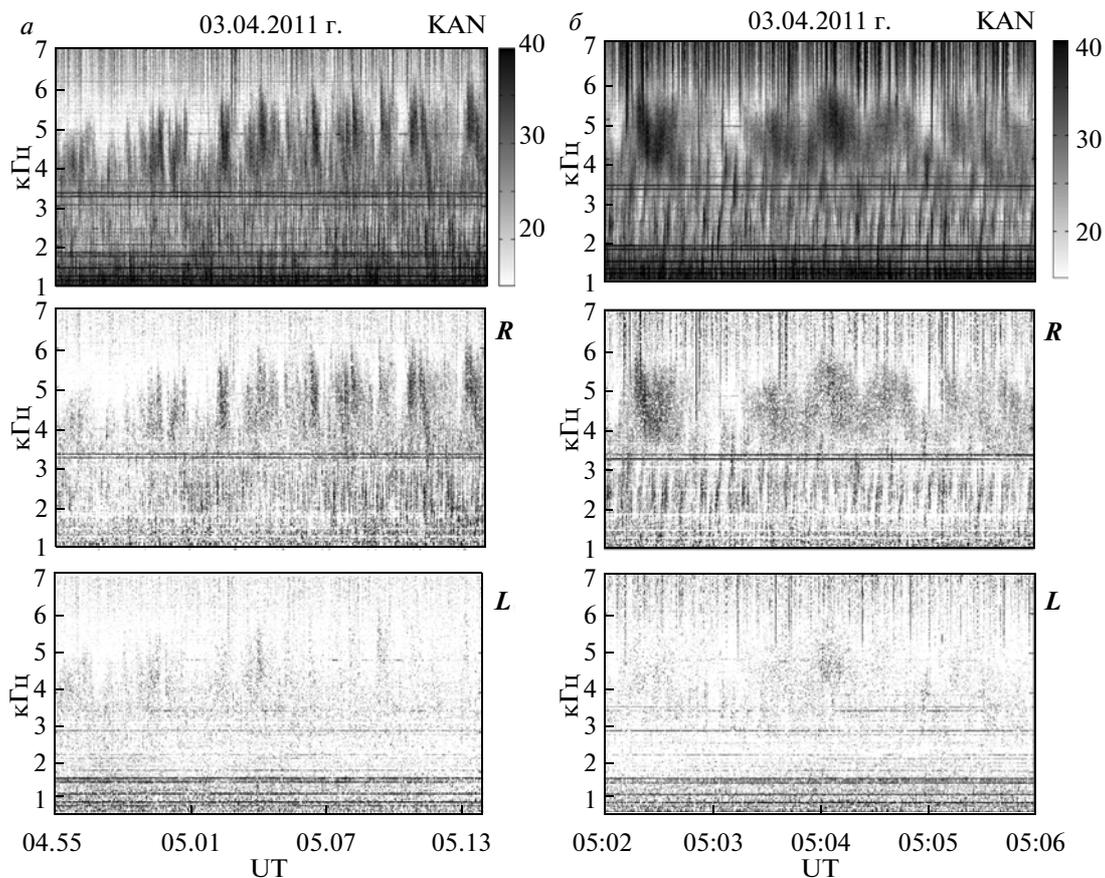


Рис. 8. Анализ поляризационных характеристик QP излучений, верхние графики – полная интенсивность, R – интенсивность право поляризованных волн, L – лево поляризованных волн: a – интервал 04.55–05.14 UT, $б$ – интервал 05.02–05.06 UT.

этому, если на земной поверхности хоры регистрировались в полосе частот $\sim 1.5\text{--}3.5$ кГц (рис. 6 и 7), то согласно формуле (1) они пришли с магнитных оболочек $L > 5$.

Характерные частоты рассматриваемых шумовых излучений зависят от нескольких факторов: магнитного поля, концентрации фоновой плазмы, энергетического и углового спектра электронов в радиационных поясах. В магнитосфере шумовые излучения наблюдаются [Wang et al., 2011] на значительно более низких частотах, чем хоры, если сравнивать их частоту с минимальной электронной гирочастотой на соответствующей магнитной оболочке. Кроме того, шумовые излучения могут формироваться хорами, пришедшими с более высоких магнитных оболочек [например, Wang et al., 2011 и цитируемая в этой работе литература]. Однако, расчеты групповых траекторий, приведенные в этих работах, показывают, что для попадания в область шипений хоры должны совершить много скачков между сопряженными областями ионосферы. При этом излучения полностью затухнут без дополнительного усиления.

По нашему мнению, возбуждение шумовых ОНЧ излучений происходит при развитии циклотронной неустойчивости на частотах, много меньших минимальной гирочастоты в диапазоне $\omega \approx (1/3\text{--}1/5)\omega_{BL}$. Циклотронная неустойчивость эффективна, если параметр $\beta_* = (\omega_{pL}V/\omega_{BL}c)^2 \geq 1$. При анизотропии функции распределения порядка единицы генерация свистовых волн происходит на частотах

$$\omega \approx \omega_{BL} \min \{ (1 - T_{\parallel}/T_{\perp}), 1/\beta_* \}, \quad (2)$$

где T_{\parallel}/T_{\perp} — характеризует поперечную анизотропию функции распределения энергичных электронов в области генерации, ω_{pL} — электронная плазменная частота в вершине магнитной трубки, V — характерная скорость энергичных электронов, c — скорость света.

Самостоятельной и пока не достаточно изученной проблемой является прохождение ОНЧ излучений через ионосферу. В рамках простейшей плоскостройной модели можно показать, что в дневных условиях ослабление ОНЧ излучений в ионосфере очень большое и имеет место хорошая изоляция магнитосферы от волновода Земля—ионосфера [Беспалов и Мизонова, 2004]. Объясняется это тем, что в дневной ионосфере нет резких скачков показателя преломления, для электромагнитных волн свистового диапазона выполняется приближение геометрической оптики, и излучения очень сильно затухают в ионосфере. Исключение могут составить ионосферные области со значительными горизонтальными градиентами концентрации, где возможно эффективное прохождение ОНЧ излучений через ионосферу. Из-за сложного характера реального

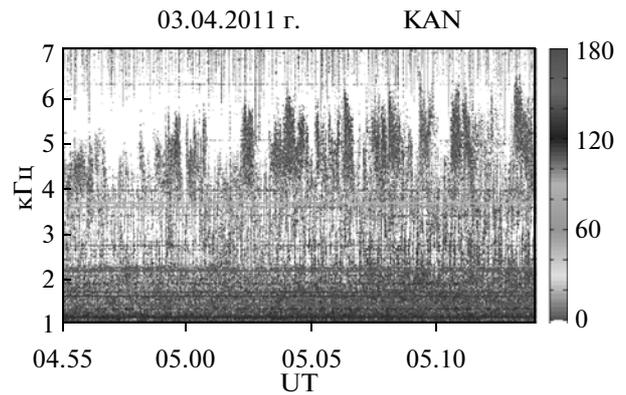


Рис. 9. Зависимость горизонтальных углов прихода ОНЧ волн от частоты для интервала времени 04.55–05.14 UT.

распространения ОНЧ излучений в магнитосфере в таких областях происходит “суммирование” дискретных и шумовых спектральных форм излучений, приходящих с разных магнитных оболочек.

Известно, что гирочастота быстро убывает с увеличением L -оболочки, а частота свистовой моды не может быть выше электронной гирочастоты. Согласно рис. 8 точка выхода ОНЧ волн из ионосферы находилась в окрестности пункта наблюдений ($L \sim 5$). Минимальная гирочастота электронов на этой L -оболочке составляет 7 кГц, следовательно, генерация наблюдаемых QP излучений в полосе 4–6 кГц заведомо происходила в области $L < 5$, а хоры на частотах $\sim 1.5\text{--}3.5$ кГц (рис. 6 и 7) — в области $L > 5$.

Во многих работах, например, [Inan and Bell, 1977; Santolik et al., 2009] при рассмотрении условий распространения ОНЧ хоры в магнитосфере отмечалось важное значение плазмопаузы в канализации свистовых волн. В обсуждаемом событии, судя по пространственному распределению фаз геомагнитных пульсаций (рис. 3б), плазмопауза могла располагаться на геомагнитной широте порядка 61° вблизи ОУЖ ($L \sim 4.3$), где на кривой имеется изгиб. Тот факт, что QP излучения приходили преимущественно с направления север—юг, может быть результатом канализирующего влияния плазмопаузы на распространение ОНЧ волн в магнитосфере.

По нашему мнению, генерация QP шумовых излучений имела место в более плотной плазме и на более низких магнитных оболочках, чем ОНЧ хоры. При прохождении ионосферы QP шумовые излучения суммировались с хоровыми излучениями, приходящими с более высоких магнитных оболочек.

2). Остановимся теперь на особенностях рассматриваемых выше квазипериодических ОНЧ излучений и их возможной связи с геомагнитными пульсациями.

Взаимодействие волновых возмущений с разными временными и пространственными масштабами — сложный нелинейный процесс в неоднородной на длине гидромагнитной волны среде. Общая проблема взаимодействия волновых возмущений различных масштабов обсуждалась для процессов в различных средах. Например, акустические и ленгмюровские волны взаимодействуют в изотропной плазме, гравитационные и капиллярные волн в океане и т.д. Обычно механизм взаимодействия таких волн состоит в следующем: низкочастотная волна модулирует параметры среды, которые определяют распространение высокочастотной волны, которая в свою очередь создает усредненный эффект на частоте длинной волны. Напомним, что при таком типе взаимодействия должны выполняться обычные условия трех-волнового синхронизма. Расчеты этого эффекта [Беспалов, 1977] показали, что если исходный спектр свистовых излучений не имеет изломов, то связанная с ним модуляция очень слабая.

В магнитосферных условиях среда является активной, и гидромагнитная волна модулирует не только условия распространения, но и инкремент циклотронной неустойчивости. Механизм модуляции ОНЧ излучений геомагнитными пульсациями, предложенный в работе [Coroniti and Kennel, 1970], учитывает, что ориентированная вдоль геомагнитного поля компонента магнитного поля гидромагнитной волны ($b_{||}$) модулирует инкремент циклотронной неустойчивости свистовых излучений. Такой механизм генерации квазипериодических ОНЧ излучений рассматривался во многих работах [например, Трахтенгерц, 1975; Коротова и др., 1975; Sato and Kokubun, 1980; 1981; Tixier and Cornilleau-Wehrlin, 1986; Morrison, 1990]. Однако проведенные в работе [Беспалов, 1977] расчеты показали, что связанная с этим механизмом глубина модуляции ОНЧ излучений во многих случаях не достаточна для объяснения экспериментальных данных.

Регулярной первопричиной квазипериодических ОНЧ излучений является наличие у радиационных поясов собственной частоты, отвечающей периодическим процессам накопления энергичных частиц в радиационных поясах и их высыпания в ионосферу во время импульсов электромагнитного излучения. Частота этих колебаний определяются следующим выражением [Беспалов и Трахтенгерц, 1976]:

$$\omega_J = (\nu/T_I)^{1/2}, \quad (3)$$

где $\nu = 2|\ln R|/T_g$ — средний декремент затухания свистовых волн в магнитосферном резонаторе, равный усредненному инкременту циклотронной неустойчивости в стационарном состоянии; T_I — среднее время жизни энергичных электронов

в магнитной ловушке; R — коэффициент отражения свистовых волн от ионосферы сверху, учитывающий и другие потери волн; T_g — период группового распространения свистовых волн в магнитосферном резонаторе. Если мощность источника частиц в трубке магнитного поля J близка к угловой зависимости функции распределения энергичных электронов, то колебания (3) в дневной магнитосфере — это релаксационные колебания с достаточно высокой добротностью $Q_J = \omega_J/2\nu_J \gg 1$. Такие колебания могут раскачиваться в линейном и нелинейном режиме даже таким довольно слабым фактором, как геомагнитные пульсации, если их частоты близки к (3). При этом наибольшую роль играет модуляция инкремента циклотронной неустойчивости.

В работах [Беспалов, 1981; Беспалов и Коваль, 1982] был предложен и разработан принципиально иной механизм генерации квазипериодических ОНЧ излучений QP -2 за счет развития автоколебательных процессов в плазменном магнитосферном мазере. Оказалось, что при малой мощности и подходящей угловой зависимости мощности источника энергичных частиц стационарное состояние в магнитосфере, соответствующее балансу между поступлением частиц от источника и их высыпанием в ионосферу, неустойчиво, и колебания параметров магнитосферного мазера сами собой раскачиваются.

Физический механизм указанного процесса связан с тем, что на переднем фронте электромагнитного импульса анизотропия функции распределения меняется таким образом, что инкремент циклотронной неустойчивости не падает, а возрастает. При этом происходит разбиение шумового излучения на отдельные четкие периодические импульсы. В пределах периода автоколебаний меняется анизотропия функции распределения, а с ней и характерная частота электромагнитных излучений [Беспалов и Клейменова, 1989]. Если частота внешнего воздействия много ниже, чем частота автоколебаний, то происходит медленное изменение параметров автоколебаний. Если частота слабого внешнего воздействия близка к частоте автоколебаний, то регулярные автоколебания легко переходят в хаотический режим со сложной временной структурой. В обсуждаемом выше событии 3 апреля 2011 г. (рис.1) короткие всплески шумовых ОНЧ излучений в полосе частот ~ 4 – 6 кГц, похожие на структуры QP излучений, отвечающие автоколебательному режиму циклотронной неустойчивости [Беспалов и Коваль, 1982], регистрировались как квазипериодические ОНЧ излучения с квазипериодом порядка 90–120 с ($f \sim 8$ – 11 мГц).

Автоколебания, вероятно, способны также обеспечить возбуждение слабых геомагнитных пульсаций, поскольку при модуляции содержа-

ния энергичных электронов в силовой трубке магнитного поля меняется ее диамагнитный момент [Беспалов и Трахтенгерц, 1976]. В обсуждаемом выше событии появление квазипериодических всплесков шипений совпало с появлением монохроматических геомагнитных пульсаций диапазона $Pc4$ (рис. 1) с максимумом в спектре на частоте 9 мГц (рис. 3). Анализ наблюдений на широтном профиле станций показал (рис. 3б), что область резонанса располагалась на геомагнитной широте 66° ($L \sim 6$). По нашему мнению, генерация квазипериодических ОНЧ излучений на частотах $\sim 4\text{--}6$ кГц происходила на магнитных оболочках $L < 5$ и была обусловлена развитием автоколебаний в радиационных поясах Земли. Можно предположить, что автоколебания в плазменном магнитосферном мазере могли сами быть источником геомагнитных пульсаций, достаточным для раскачки резонансных геомагнитных колебаний в окрестности магнитной оболочки $L \sim 6$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен детальный анализ нетипичного события (3 апреля 2011 г.) одновременной генерации квазипериодических (QP) ОНЧ излучений в полосе частот $4\text{--}6$ кГц и ОНЧ хоров на частотах ниже 3 кГц.

- Показано что обсуждаемые QP излучения представляли собой отдельные короткие (порядка 20 с) всплески шипений без дискретной тонкой структуры.

- Установлено, что как QP излучения, так и ОНЧ хоры характеризовались, в основном, правой поляризацией, что свидетельствует о нахождении точки выхода волн из ионосферы относительно недалеко от пункта наземных наблюдений.

- Сделан вывод о том, что область генерации QP излучений и ОНЧ хоров располагалась на разных магнитных оболочках. Генерация квазипериодических ОНЧ излучений на частотах $\sim 4\text{--}6$ кГц происходила на магнитных оболочках $L < 5$, а хоры на частотах $\sim 1.5\text{--}3.5$ кГц – в области $L > 5$.

- Обнаружено, что QP излучения приходили с направления север–юг, в то время как ОНЧ хоры – преимущественно с направления восток–запад. Это еще раз подтверждает наш вывод о том, что источники указанных излучений различны.

- Отмечено, что появление QP излучений совпало по времени с возбуждением в магнитосфере квазимонохроматических резонансных геомагнитных пульсаций диапазона $Pc4$, период которых был близким в квазипериоду повторения QP . Однако нельзя сделать вывод, что именно эти пульсации вызвали квазипериодическую генерацию всплесков ОНЧ шипений. Временной сдвиг между всплесками QP излучений и геомагнитны-

ми пульсациями был непостоянным и менялся от одного всплеска шипений к другому.

- Сделан вывод, что обсуждаемые QP излучения, по-видимому, были результатом развития автоколебаний в радиационных поясах Земли. Высказано предположение, что автоколебания в плазменном магнитосферном мазере могли сами быть источником раскачки резонансных колебаний магнитной оболочки, собственная частота которых близка к частоте автоколебаний.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 10-05-00247 и Программы ОФН № 16 РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. О нелинейных колебательных процессах в магнитосфере Земли // Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т. 19. № 5–6. С. 801–811. 1976.
- Беспалов П.А. Самомодуляция излучения плазменного циклотронного мазера // Письма в ЖЭТФ. Т. 33. № 4. С. 192–195. 1981.
- Беспалов П.А., Коваль Л.Н. Установление периодических режимов циклотронной неустойчивости в плазменных пробкотронах // Физика плазмы. Т. 8. № 6. С. 1136–1144. 1982.
- Беспалов П.А., Клейменова Н.Г. Влияние геомагнитных пульсаций на свистовые излучения вблизи плазмопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 29. № 2. С. 177–191. 1989.
- Беспалов П.А., Мизонова В.Г. Коэффициент отражения свистовых волн от ионосферы при нормальном падении // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 1. С. 55–59. 2004.
- Захаров А.В., Кузнецова В.А., Лихтер Я.И., Ларкина В.И. Модуляция интенсивности КНЧ излучений и потоков электронов во время магнитных бурь по данным ИСЗ “Интеркосмос-3” “Интеркосмос-5” // Низкочастотные волны и сигналы во внешней ионосфере. Апатиты. С. 110–116. 1974.
- Клейменова Н.Г., Виньерон Ж., Распопов О.М. Модуляция амплитуды ОНЧ шипений и хоров // Ионосферные исследования № 22. С. 36–40. М.: Советское радио, 1975.
- Коротова Г.И., Клейменова Н.Г., Распопов О.М. Модуляция ОНЧ шипений геомагнитными пульсациями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 15. С. 177–179. 1975.
- Маннинен Ю., Турунен Т., Култима Ю., Титова Е. Корреляция оптических эмиссий, квазипериодических ОНЧ излучений и магнитных $Pc3$ пульсаций // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 34. С. 42–47. 1994.
- Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 3. ОНЧ-излучения. Л.: ЛГУ, 1977. 144 с.
- Трахтенгерц В.Ю. Модуляция неустойчивостей в магнитосфере гидромагнитными колебаниями // Ионосферные исследования № 22. С. 8–11. М.: Советское радио, 1975.

- *Bespalov P.A., Parrot M., Manninen J.* Short-period VLF emissions as solitary envelope-waves in a magnetospheric plasma maser // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 72. P. 1275–1281. 2010.
- *Fukunishi H., Hayashi K., Kokubun S., Oguti T., Sato N.* Relationship between quasi-periodic VLF emissions and geomagnetic pulsations // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 6. P. 1515–1526. 1974.
- *Engebretson M.J., Posch J.L., Halford A.J., Shelburne G.A., Smith A.J., Spasojevic M., Inan U.S., Arnoldy R.L.* Latitudinal and seasonal variations of quasiperiodic and periodic VLF emissions in the outer magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 109. A05216. doi:10.1029/2003JA010335. 2004.
- *Gendrin R., Bertholier C., Cory H., Meyer A., Sukhera B., Vigneron J.* Very low frequency and particle rocket experiment at Kerguelen island // *J. Geophys. Res.* V. 75. V. 31. P. 6153–6168. 1970.
- *Helliwell R.A.* Whistler and related ionospheric phenomena. Stanford. Stanford Univ. Press. 349 p. 1965.
- *Inan U.S., Bell T.F.* The plasmopause as a VLF guide // *J. Geophys. Res.* V. 82. P. 2819–2827. 1977.
- *Kitamura T., Jacobs J.A., Watanabe T., Flint Jr.R.B.* An investigation of quasi-periodic VLF emissions // *J. Geophys. Res.* V. 74. P. 5652–5664. 1969.
- *Kimura I.* Interrelation between VLF and ULF emissions // *Space Sci. Rev.* V. 16. P. 389–411. 1974.
- *Li W., Thorne R.M., Nishimura Y. et al.* THEMIS analysis of observed equatorial electron distributions responsible for the chorus excitation // *J. Geophys. Res.* V. 115. A00F11. doi:10.1029/2009JA014845. 2010.
- *Manninen J.* Some aspects of ELF-VLF emissions in geophysical research, Sodankylä Geophysical Observatory Publications. № 98. 177 p. 2005.
- *Morrison K.* Quasi-periodic VLF emissions and concurrent magnetic pulsations seen at $L = 4$ // *Planet. Space Sci.* V. 38. P. 1555–1565. 1990.
- *Santolik O., Gurnett D.A., Pickett J.S., Parrot M., Cornilleau-Wehrlin N.* Five years of investigation of whistler-mode chorus using the measurements of the Cluster spacecraft, European Space Agency, (Special Publication). P. 75–82. 2006.
- *Santolik O., Gurnett D.A., Pickett J.S., Chum J., Cornilleau-Wehrlin N.* Oblique propagation of whistler mode waves in the chorus source region // *J. Geophys. Res.* V. 114. A00F03. doi: 10.1029/2009JA014586. 2009.
- *Sato N., Hayashi K., Kokubun S., Oguti T., Fukunishi H.* Relationships between quasi-periodic VLF emission and geomagnetic pulsations // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 36. P. 1515–1526. 1974.
- *Sato N., Kokubun S.* Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Regular period ELF-VLF pulsations and their geomagnetic conjugacy // *J. Geophys. Res.* V. 86. P. 9–18. 1981.
- *Tixier M., Cornilleau-Wehrlin N.* How are VLF quasi-periodic emissions controlled by harmonics of field line oscillations? The results of a comparison between ground and GEOS satellites measurements // *J. Geophys. Res.* V. 91. A6. P. 6899–6919. 1986.
- *Troitskaya V.A., Kleimenova N.G.* Micropulsations and VLF-emissions during substorms // *Planet. Space Sci.* V. 20. № 9. P. 1499–1519. 1972.
- *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.