УДК 550.385

СПОРАДИЧЕСКИЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ НА ЧАСТОТАХ ДО 15 ГЦ В ПЕРИОД МАГНИТНОЙ БУРИ 7–14 НОЯБРЯ 2004 ГОДА: ОСОБЕННОСТИ АМПЛИТУДНЫХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПЕКТРОВ И СВЯЗЬ С ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫМИ ВОЛНАМИ В МАГНИТОСФЕРЕ

Е. Н. Ермакова[1]*, *А. Г. Яхнин*[2], *Т. А. Яхнина*[2], *А. Г. Демехов*[2,3,4], *Д. С. Котик*[1]

[1] Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;
[2] Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты;
[3] Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;
[4] Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе исследуется динамика спектров геомагнитных пульсаций на необычно высоких частотах (в т. ч. на частотах, превышающих частоту шумановского резонанса 8 Гц), впервые обнаруженных на среднеширотном пункте «Новая Жизнь» (параметр Мак-Илвайна $L = 2{,}6$) во время сильной магнитной бури 07–14.11.2004. Для интерпретации частот наблюдавшихся пульсаций использованы данные низкоорбитальных спутников NOAA, регистрирующих локализованные высыпания энергичных протонов (с энергиями 30÷80 кэВ), и расчёты однопроходового циклотронного усиления электромагнитных ионно-циклотронных волн. Сопоставлены амплитудные и поляризационные характеристики спектров излучений на частотах до 15 Гц на станциях «Новая Жизнь» и «Ловозеро» ($L = 5{,}2$). Показано, что колебания магнитного поля в частотном диапазоне 7÷15 Гц коррелируют с высыпаниями протонов и протонными сияниями на геомагнитных широтах 50°÷57° ($L = 2{,}42 \div 3{,}37$). Показано также, что при достаточно высокой анизотропии питч-углового распределения протонов кольцевого тока на таких низких геомагнитных широтах частотный спектр наблюдаемого высокочастотного излучения хорошо согласуется с рассчитанным положением максимума однопроходового циклотронного усиления электромагнитных ионно-циклотронных волн. На основании анализа данных и результатов расчётов сделан вывод о том, что зарегистрированные сигналы по своему происхождению являются высокочастотным аналогом пульсаций Pc1 и связаны с генерацией ионно-циклотронных волн в магнитосфере на необычно низких широтах, обусловленных, вероятно, смещением на эти широты плазмопаузы во время сильной магнитной бури.

ВВЕДЕНИЕ

Изучению спорадических излучений в частотном диапазоне Pc1 (0,2÷5 Гц) посвящено большое количество публикаций (см., например, обзоры [1–4]). Как известно, такие пульсации связывают с электромагнитными ионно-циклотронными волнами, возникающими при развитии циклотронной неустойчивости энергичных ионов в области кольцевого тока магнитосферы [4]. Пульсации Pc1, наблюдаемые на земной поверхности, могут распространяться по ионосферному волноводу достаточно далеко от точки падения ионно-циклотронной волны на ионосферу. Циклотронная неустойчивость приводит к рассеянию протонов кольцевого тока в конус потерь, т. е. к высыпанию протонов в атмосферу. Высыпания протонов, связанные с электромагнитными ионно-циклотронными волнами (пульсациями Pc1), были описаны в работах [5–7]. Они представляют собой локализованные по широте высыпания энергичных (с энергией $E > 30$ кэВ) протонов внутри зоны анизотропных потоков протонов к экватору от границы изотропных высыпаний, обусловленных рассеянием частиц на токовом слое [8]. Поскольку заряженные частицы из магнитосферы высыпаются вдоль силовых линий магнитного поля Земли, регистрация высыпаний

* l.ermakova@nirfi.sci-nnov.ru

энергичных протонов позволяет использовать их для диагностики положения источника ионно-циклотронных волн. Пример использования высыпаний энергичных протонов для анализа положения таких источников можно найти, например, в работе [9]. Изучение протонных сияний, обусловленных высыпаниями энергичных протонов и регистрируемых спутником IMAGE, показало, что источник квазимонохроматических пульсаций Pc1 локализован как по широте, так и по долготе, существует до нескольких часов, находится, по-видимому, в плазмопаузе и участвует вместе с плазмосферой в процессе коротации [10–12].

В данной работе мы приводим результаты наблюдений и комплексного исследования геомагнитных пульсаций магнитосферного происхождения во время сильной магнитной бури 7–14 ноября 2004 года. Наш интерес к этому событию был вызван тем, что, по данным работы [13], в ходе этой бури, а именно в интервале 00–02 UT 10 ноября 2004 года, локализованные высыпания энергичных протонов и довольно необычные протонные сияния (в виде дуги, располагавшейся в послеполуночном секторе на геомагнитной широте порядка 50°) не сопровождались регистрацией пульсаций в диапазоне Pc1 в том же интервале долгот. При этом в долготном секторе протонных высыпаний работало несколько магнитометров, способных зарегистрировать такие пульсации. В работе [13] приводятся данные магнитных измерений с канадских наземных станций, которые в этот период находились в послеполуденном секторе и на которых наблюдались интенсивные пульсации вблизи частоты 0,3 Гц. Однако вряд ли эти сигналы имеют непосредственное отношение к рассматриваемым протонным высыпаниям, поскольку они были зарегистрированы очень далеко, и им соответствовали «свои» высыпания; кроме того, частота 0,3 Гц слишком низка, чтобы соответствовать характерным частотам электромагнитных ионно-циклотронных волн на геомагнитных широтах около 50°.

Наземная станция «Новая Жизнь» (Нижегородская область, Россия) располагалась в секторе наблюдения дуги протонного сияния в непосредственной близости от её проекции (геомагнитная широта станции примерно 52°, $L \approx 2{,}6$). Индукционный магнитометр на этой станции измеряет вариации магнитного поля в частотном диапазоне до 20 Гц. В данной работе также анализируются данные станции авроральной зоны «Ловозеро» (Мурманская область, Россия; геомагнитная широта 64°, $L \approx 5{,}2$), расположенной в том же интервале долгот и имеющей аналогичный индукционный магнитометр.

Кроме интервала времени, соответствующего наблюдению дуги протонного сияния (начало 10 ноября 2004 года), будут рассмотрены и некоторые другие временны́е интервалы во время этой бури. Для регистрации локализованных высыпаний энергичных протонов мы используем данные прибора MEPED (Medium Energy Proton and Electron Detector) на борту спутников NOAA POES (Polar Operational Environmental Satellites), имеющих круговую полярную орбиту на высоте около 800 км. Этот прибор измеряет как высыпающиеся, так и захваченные на высоте спутника заряженные частицы с энергией, превышающей 30 кэВ [14].

Далее для краткости геомагнитные пульсации, обнаруженные на необычно высоких частотах (6÷15 Гц) и связанные с электромагнитными ионно-циклотронными волнами в магнитосфере, будем называть «высокочастотными пульсациями Pc1», подобно обычным пульсациям Pc1.

1. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Анализ данных по регистрации магнитных компонент фонового шума по оси север-юг ($H_{\text{СЮ}}$) и восток–запад ($H_{\text{ВЗ}}$) на станции «Новая Жизнь» позволил выделить несколько периодов регистрации спорадических сигналов магнитосферного происхождения в частотном диапазоне 6÷15 Гц. Изучаемые события были зарегистрированы во время сильной магнитной бури. На рис. 1 приведены индексы геомагнитной активности за период 6–15 ноября 2004 года. Главная фа-

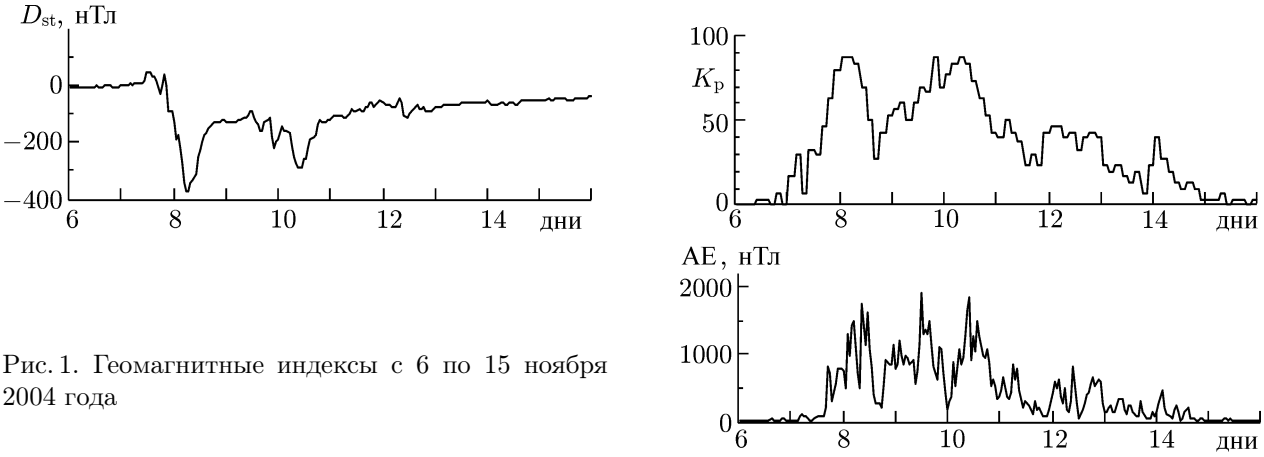

Рис. 1. Геомагнитные индексы с 6 по 15 ноября 2004 года

за магнитной бури началась 7 ноября, минимальное значение параметра D_{st} составило −373 нТл в 07:00 UT 8 ноября. Второй по интенсивности минимум $D_{st} = -289$ нТл был зарегистрирован в 10:00 UT 10 ноября.

Шумовые низкочастотные поля (горизонтальные магнитные компоненты) регистрировались индукционными магнитными датчиками. При обработке выполнялось построение спектров на временны́х реализациях с продолжительностью в 20 с с последующим 10-минутным усреднением. Графики приведены без учёта калибровок.

1.1. Интервал 00:00-05:00 UT 10.11.2004

На рис. 2 приведены спектрограмма пульсаций в диапазоне до 16 Гц в интервале 00:00–05:00 UT 10 ноября 2004 года и амплитудные спектры магнитной компоненты $H_{ВЗ}$ на станции «Новая Жизнь». Обращает на себя внимание то, что между гармониками шумановского резонанса (спектральные максимумы на частотах около 8 и 14 Гц) наблюдаются два явно выраженных всплеска пульсаций на частотах 10÷12 Гц в интервалах примерно 01:00–02:00 UT и 03:30–04:40 UT. Как следует из работы [13], в период 00:00–02:00 UT 10.11.2004 на спутнике IMAGE наблюдались протонные сияния (протонная дуга, см. рис. 2 в работе [13]), а спутником NOAA регистрировались высыпания на довольно низких геомагнитных широтах около 50°. Пример высыпаний в этом интервале показан на рис. 3*а*.

В интервале времени 02:10–03:30 UT протонные высыпания на этой широте ослабли, данные спутников NOAA показывают отсутствие высыпаний в послеполуночном секторе (данные не приведены). В это время не было и сигнала на частотах 10÷12 Гц. Затем спутники вновь зарегистрировали высыпания протонов (см. рис. 3*б*), а на станции «Новая Жизнь» наблюдалось излучение между шумановскими резонансами (рис. 2*а* и *в*). В долготном секторе протонных высыпаний находилось, как мы уже отмечали, несколько станций, регистрирующих геомагнитные пульсации (например, обсерватория ПГИ «Ловозеро» и станции финской сети индукционных магнитометров). Заметим, что станция «Новая Жизнь», как и другие станции, не зарегистрировала пульсаций в классическом диапазоне Pc1. В то же время, как мы убедились, рассмотрев данные остальных станций в высокочастотном диапазоне, никакая другая станция, кроме «Новой Жизни», не зарегистрировала сигнал на частотах 10÷12 Гц.

Одновременное появление и исчезновение пульсаций и протонных высыпаний позволяет нам считать, что этот сигнал является аналогом пульсаций Pc1, а его регистрация только на одной станции связана с её близким расположением к подножию силовой трубки, в которой генерировались ионно-циклотронные волны. Повышенная частота этого сигнала, по-видимому, связана

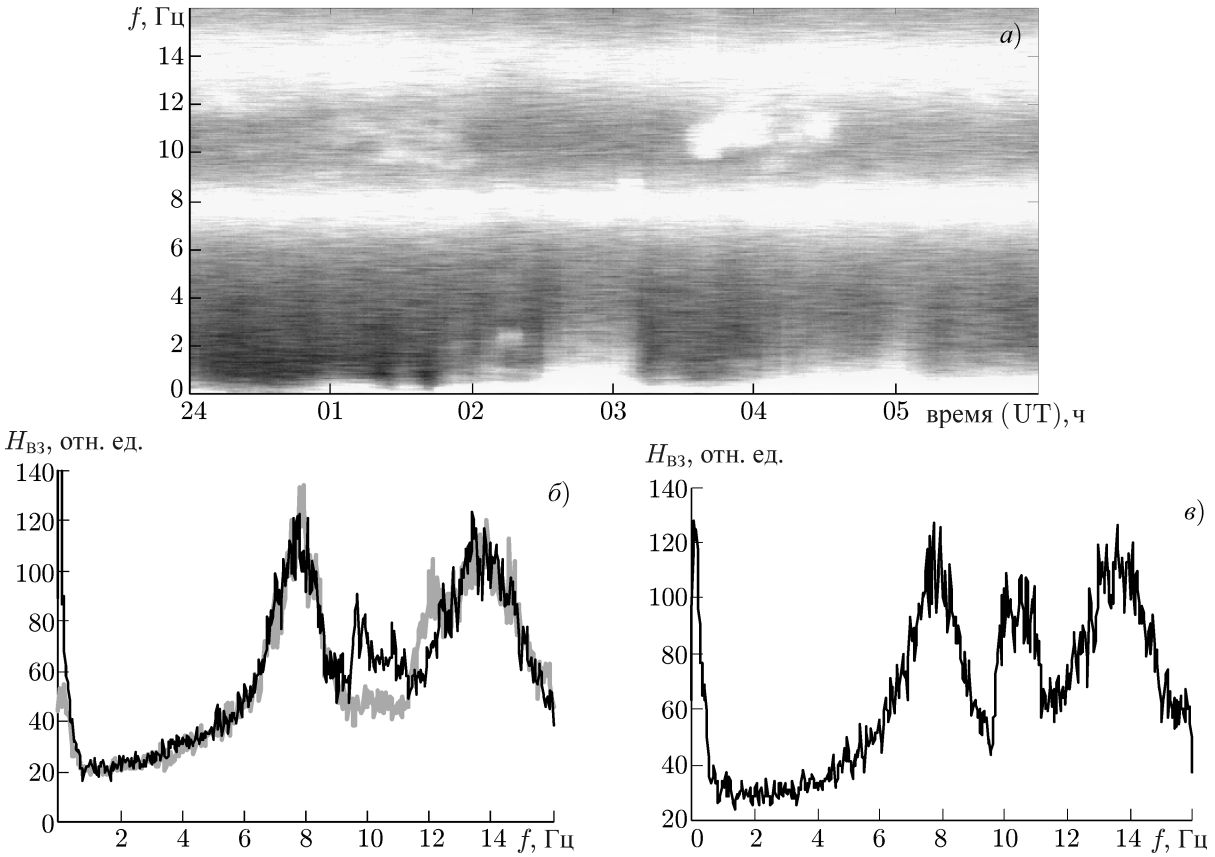

Рис. 2. Спектры магнитной компоненты $H_{ВЗ}$ в период наблюдения высокочастотных пульсаций Pc1 10.11.2004 на станции «Новая Жизнь». На панели (*а*) светлые области соответствуют более высоким значением $H_{ВЗ}$, на панели (*б*) светлая кривая соответствует интервалу времени 00:20–00:30 UT, тёмная — 01:47–01:57 UT, панель (*в*) отвечает интервалу времени 03:30–03:40 UT

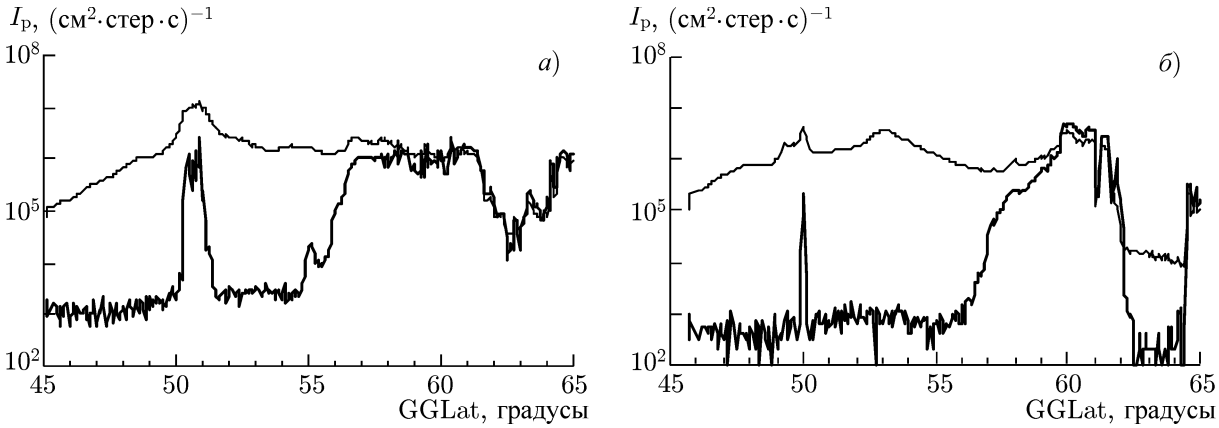

Рис. 3. Данные спутников NOAA по регистрации локализованных протонных высыпаний в 01:16 (*а*) и 04:10 UT (*б*) 10 ноября 2004 года. Здесь $I_р$ — поток энергичных частиц, здесь и далее GGLat — исправленная геомагнитная широта

с низкоширотным положением источника. Действительно, экваториальные значения гирочастот протона (f_{cH^+}) и иона гелия (f_{cHe^+}), которые определяют частотную полосу излучаемых волн, должны быть существенно выше, чем классический диапазон пульсаций Pc1. Оценка для $L = 2{,}4$

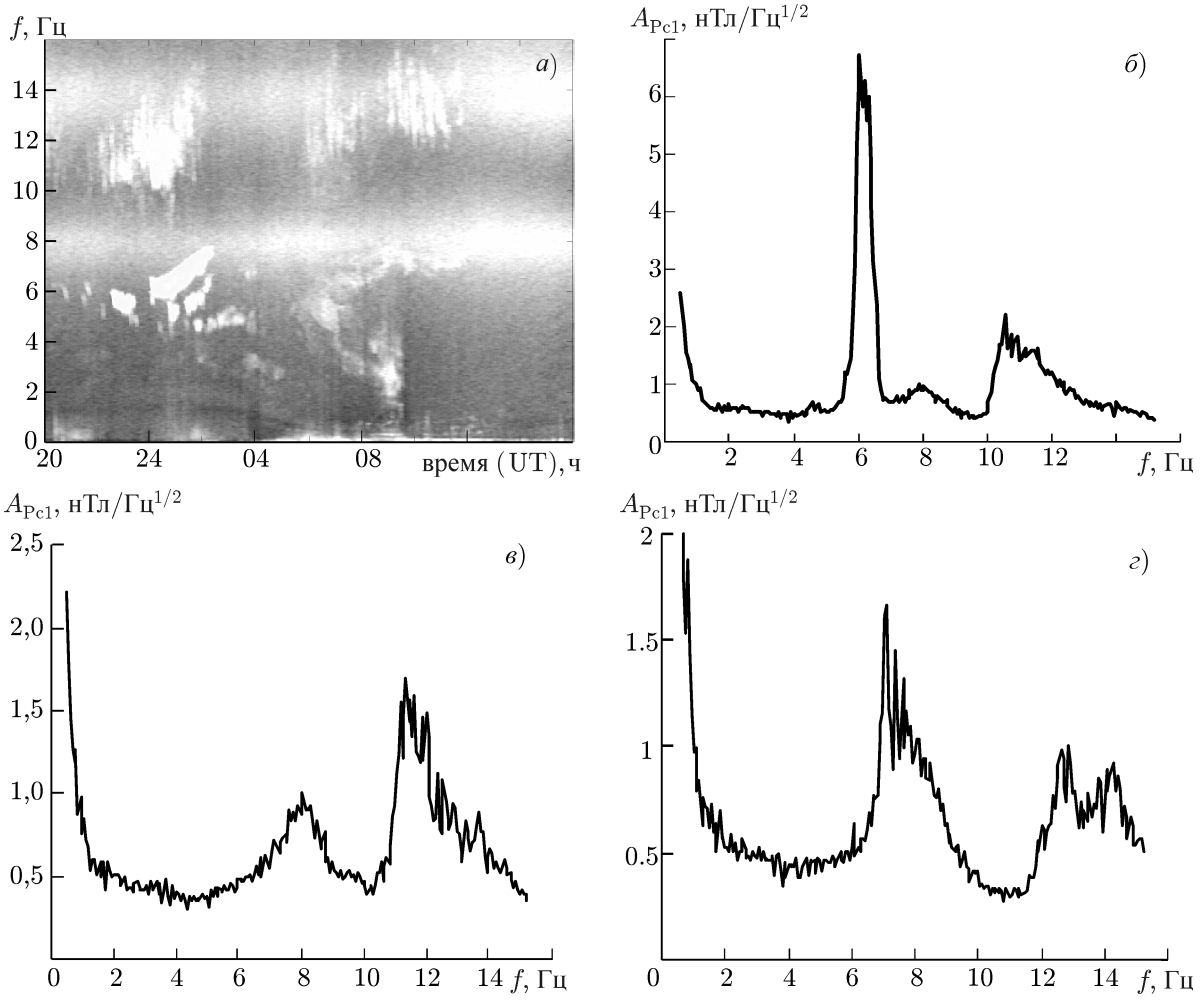

Рис. 4. Спектрограмма магнитной компоненты $H_{ВЗ}$ (*а*) и спектры амплитуды высокочастотных пульсаций Pc1 A_{Pc1} (*б–г*) в период регистрации двухполосного излучения 10–11.11.2004 на станции «Новая Жизнь». На панели (*а*) светлые области соответствуют бóльшим значениям $H_{ВЗ}$, панель (*б*) отвечает 00 UT 11.11.2004, (*в*) — 23:40 UT 10.11.2004, (*г*) — 11:00 UT 11.11.2004

даёт $f_{cHe^+} = 8{,}8$ Гц. Таким образом, наблюдаемые пульсации на частотах 10÷12 Гц попадают в диапазон ионно-циклотронных волн, расположенный выше f_{cHe^+}, но ниже f_{cH^+}, и могут быть связаны с ионно-циклотронной неустойчивостью в магнитосфере. Генерация на частотах выше гирочастоты иона гелия при определённых условиях подтверждается и расчётами инкремента данной неустойчивости, результаты которых мы обсудим ниже.

1.2. Явления в интервале времени с 22:30 UT 10.11.2014 до 12:30 UT 11.11.2004

В период с 22:30 UT 10 ноября и до 12:00 UT 11 ноября 2004 года были зарегистрированы высокочастотные пульсации Pc1, спектры которых имели ярко выраженный двухполосный характер. Наблюдались сигналы на частотах ниже первого и второго шумановского резонансов. Пульсации в этих частотных полосах имеют сходную динамику и соответствуют, вероятно, гелиевой и водородной полосам ионно-циклотронных волн и генерировались в одних и тех же областях (см. рис. 4).

Ширина нижней полосы составляла примерно 1 Гц, ширина более высокочастотной полосы

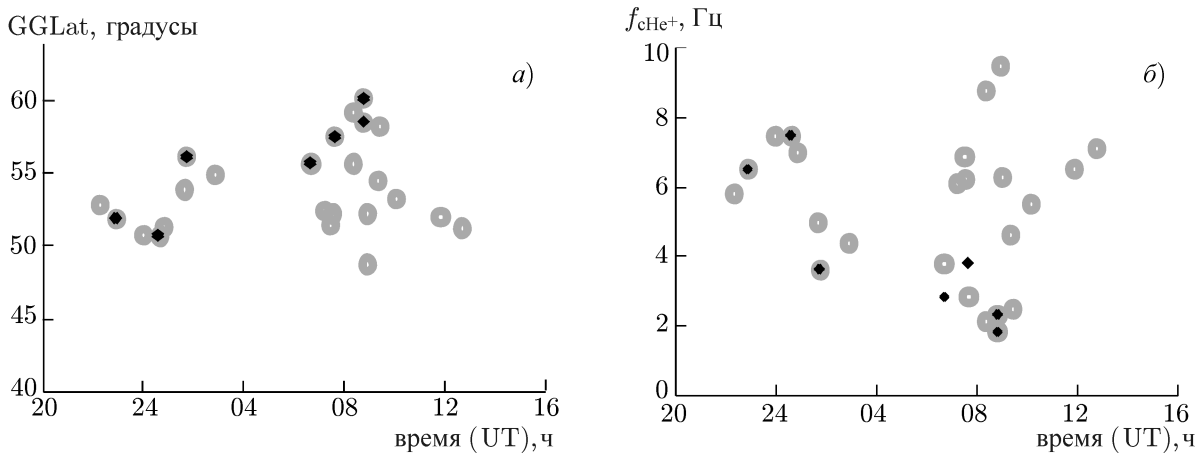

Рис. 5. Геомагнитные широты высыпаний (*а*) и гирочастота ионов гелия в областях ионно-циклотронной неустойчивости (*б*). Чёрным цветом отмечены высыпания, зарегистрированные в зоне ±2,5 часа от местного магнитного времени наземных станций «Новая Жизнь» и «Ловозеро»

2÷2,5 Гц. После 00:00 UT 11.11.2004 на частотах ниже первого шумановского резонанса появились две полосы излучений, связанных, возможно, с появлением дополнительных областей генерации ионно-циклотронных волн на более высоких геомагнитных широтах. В период наблюдения высокочастотных пульсаций Pc1 на частотах выше и ниже первого шумановского резонанса амплитуда сигналов на частотах 6÷8 Гц была в 1,5÷3,5 раза больше, чем на частотах 11÷13 Гц (см. рис. 4*б*, *г*). Надо отметить, что около 23:40 UT исчезло излучение на частотах ниже первого шумановского резонанса, и высокочастотные пульсации Pc1 наблюдались только между первой и второй гармониками шумановского резонанса (рис. 4*в*) так же, как и во время первого периода регистрации высокочастотных пульсаций Pc1 (00:00–05:00 UT 10.11.2004).

Следует выделить ещё одну особенность амплитудно-частотных спектров высокочастотных пульсаций Pc1. Она заключается в сложной структуре, которая имеет вид почти вертикальных полос, наиболее отчётливо заметных на высоких частотах 12÷15 Гц. Период следования полос составлял 20÷30 мин, изменение частоты в этих полосах равнялось 2÷3 Гц на частотах 12÷15 Гц. Подобные спектры иногда регистрируются и в обычном диапазоне пульсаций Pc1, причём как на земной поверхности (см., например, работы [15–17]), так и в магнитосфере (см., работы [18, 19]). В диапазоне Pc1 такие излучения также наблюдаются на частотах выше гирочастоты ионов гелия [18, 19]. Их появление в диапазоне пульсаций Pc1 обычно связывают с вариациями динамического давления солнечного ветра или давления в переходной области между ударной волной и магнитопаузой [17], либо с резонансными осцилляциями в магнитосфере [16], которые модулируют инкремент ионно-циклотронной неустойчивости. Надо отметить, что подобная структура спектров пульсаций Pc1 наблюдалась на частотах 4÷5 Гц в период постепенного уменьшения характерных частот геомагнитных пульсаций 13.11.2004 (см. следующий раздел, рис. 6*а*). При этом изменение частоты вдоль вертикальных полос составляло примерно 1 Гц, что в 2÷3 раза меньше, чем разброс по частоте для вертикальной структуры на частотах 12÷15 Гц. Выяснение природы этих сигналов выходит за рамки нашего рассмотрения. В то же время, подобие спектров пульсаций в «классическом» диапазоне и на аномально высоких частотах указывает на сходный механизм их генерации.

Магнитосферное происхождение наблюдаемого высокочастотного излучения и то, что оно, вероятно, связано с низкоширотным положением плазмопаузы, подтверждается данными регистрации высыпаний энергичных протонов на спутниках NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17. К сожалению, лишь небольшое количество пролётов спутников, на которых были зарегистрированы

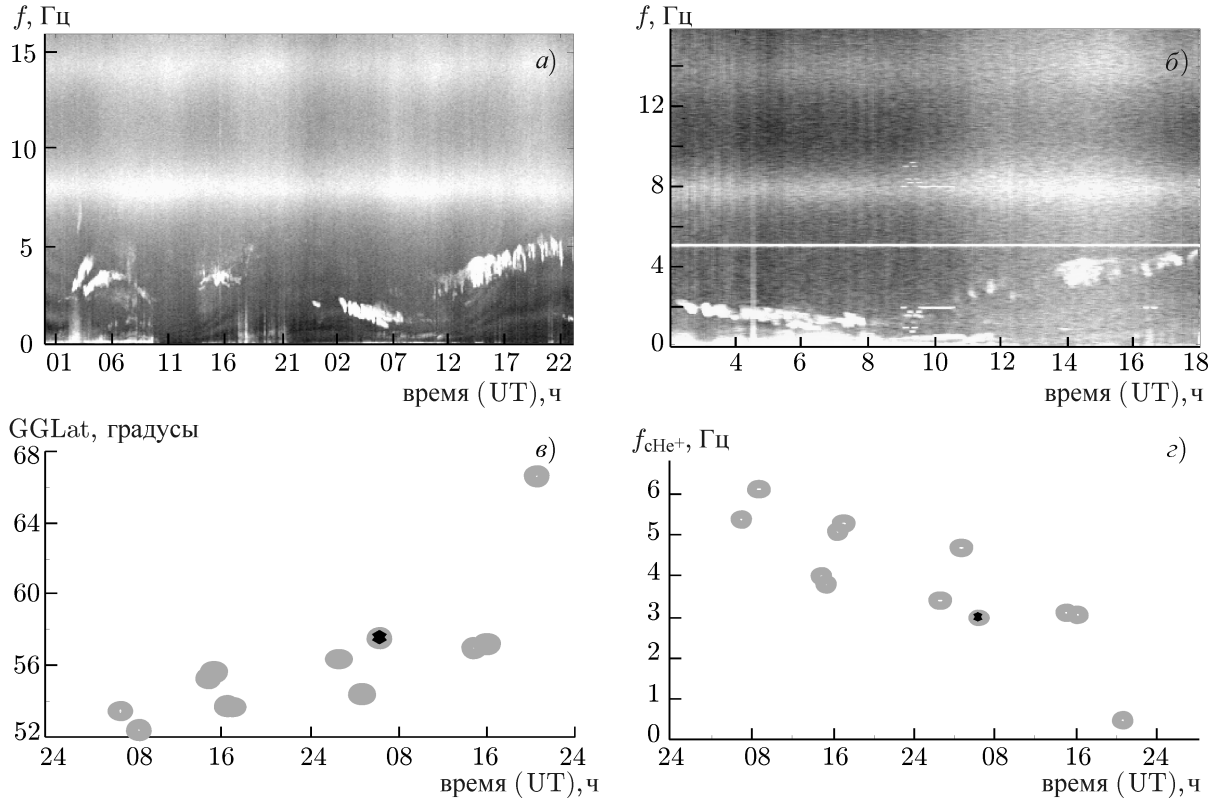

Рис. 6. Спектрограммы магнитной компоненты $H_{СЮ}$ (светлые области соответствуют бóльшим значениям) за 12–13.11.2004 на станции «Новая Жизнь» (*а*) и за 13.11.2004 на станции «Ловозеро»; исправленные геомагнитные широты высыпаний (*в*) и экваториальные гирочастоты иона гелия для высыпаний, зарегистрированных на спутниках NOAA (*г*)

высыпания, находилось в интервале ±2,5 часа от местного магнитного времени (MLT) наземной станции «Новая Жизнь». На рис. 5*а* приведены исправленные геомагнитные широты положения всех локализованных высыпаний, которые удалось зарегистрировать во время рассмотренных интервалов наблюдения высокочастотных пульсаций Pc1, а на рис. 5*б* — значения гирочастоты иона гелия, соответствующие широте высыпаний.

Несмотря на то, что по спутниковым измерениям было зарегистрировано небольшое число высыпаний в долготных секторах, близких к наземным станциям, анализ динамики геомагнитных широт высыпаний и гирочастот гелия показал, что на некоторых отрезках времени эта динамика имеет сходный характер в разных секторах MLT. Она, в целом, соответствует и изменениям в спектрах наблюдаемых многополосных высокочастотных излучений. Например, нарастание частоты излучения в период с 23:00 UT 10.11.2004 до 01:00 UT 11.11.2004 сопровождается уменьшением геомагнитной широты зарегистрированных высыпаний. Появление нескольких полос после 00:00 UT 11.11.2004 в нижней части спектра можно объяснить довольно большúм разбросом в геомагнитных широтах высыпаний от 50° до 56°. В интервале 06:00–10:00 UT 11.11.2004 в долготном секторе наземных станций наблюдались высыпания только на относительно высоких широтах (55°÷60°), что обусловило появление сигналов на частотах 2÷3 Гц. Протонные высыпания на низких геомагнитных широтах в долготных секторах, близких к наземным станциям, обнаружены не были. Вероятно, низкоширотные высыпания, связанные с высокочастотными пульсациями Pc1 вблизи 6 Гц и 12÷13 Гц (см. рис. 4), все же имели место в секторе наземной станции, но не были зарегистрированы спутником из-за их высокой долготной локализации.

2. ЯВЛЕНИЯ 12–13 НОЯБРЯ 2004 ГОДА

Во временно́м интервале 12–13.11.2004 наблюдалось постепенное уменьшение характерных частот геомагнитных пульсаций. Это согласуется с ослаблением геомагнитной активности (см. рис. 1) и соответствующим возвращением области контакта кольцевого тока и плазмопаузы на более высокие широты. Для анализа динамики амплитудных спектров Pc1 в этом интервале также привлекались данные с высокоширотного пункта «Ловозеро». Уменьшение частоты пульсаций Pc1 наблюдалось на обеих наземных станциях, но имело немонотонный характер: через 6÷7 часов после падения частоты пульсаций до 2 Гц, были зарегистрированы излучения на частотах 3÷5 Гц (см. рис. 6*а*, *б*).

Возвращение плазмопаузы к более высоким широтам подтверждается и данными спутников NOAA, регистрирующими высыпания за этот период (рис. 6*в*, *г*). К сожалению, большинство высыпаний наблюдалось в долготных секторах, далёких от долгот указанных наземных станций.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ PC1 НА СТАНЦИЯХ «НОВАЯ ЖИЗНЬ» И «ЛОВОЗЕРО»

Для исследования возможности регистрации высокочастотных пульсаций Pc1 на более высоких широтах были проанализированы данные со станции «Ловозеро» ($L = 5{,}2$). Результаты обработки данных показали, что на этой станции магнитосферное излучение на частотах выше 6 Гц было зарегистрировано только во время наблюдения двухполосных высокочастотных пульсаций Pc1 на станции «Новая Жизнь» 11.11.2004 с 00:00 до 02:00 UT (см. рис. 7*а*, *б*). При этом на станции «Ловозеро» излучение наблюдалось лишь в одной, более низкочастотной полосе (на частотах ниже первого шумановского резонанса).

Из-за высокоширотного положения станции «Ловозеро» (CGLat = 64°) путь распространения излучений от места их выхода на землю вдоль МГД волновода существенно увеличивается по сравнению с длиной трассы распространения высокочастотных пульсаций Pc1 до более низкоширотного пункта «Новая Жизнь» (CGLat = 52°). Измерения показали, что на частотах от 6 до 8 Гц амплитуда высокочастотных пульсаций Pc1 на среднеширотной станции на порядок превосходила амплитуду на высокоширотной станции (см. рис. 7*в*, *г*). Надо отметить, что в период регистрации высокочастотных излучений на станции «Ловозеро» локализованные высыпания наблюдались в долготном секторе наземных станций на геомагнитных широтах порядка 50°.

В период возвращения плазмопаузы на более высокие широты и наблюдения излучений на более низких частотах в диапазоне от 2÷4 Гц разница в амплитуде излучения на наземных станциях уменьшалась, что было связано, по-видимому, с уменьшением разницы в длине трассы распространения низкочастотных волн от места их выхода на землю до наземных пунктов. Однако и в этот период амплитуда на более высокоширотной станции была в 2÷4 раза меньше, чем на среднеширотной (см. рис. 8). Это может быть связано с особенностями распространения электромагнитных излучений на частотах Pc1 в ионосферном волноводе и, например, с бо́льшим затуханием волн на трассе при распространении к станции «Ловозеро».

4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ PC1

Для более полного описания спектральных особенностей впервые зарегистрированных высокочастотных пульсаций Pc1 в дополнение к амплитудным спектрам были исследованы поляризационные характеристики этого излучения. Как известно, при ионно-циклотронной неустойчи-

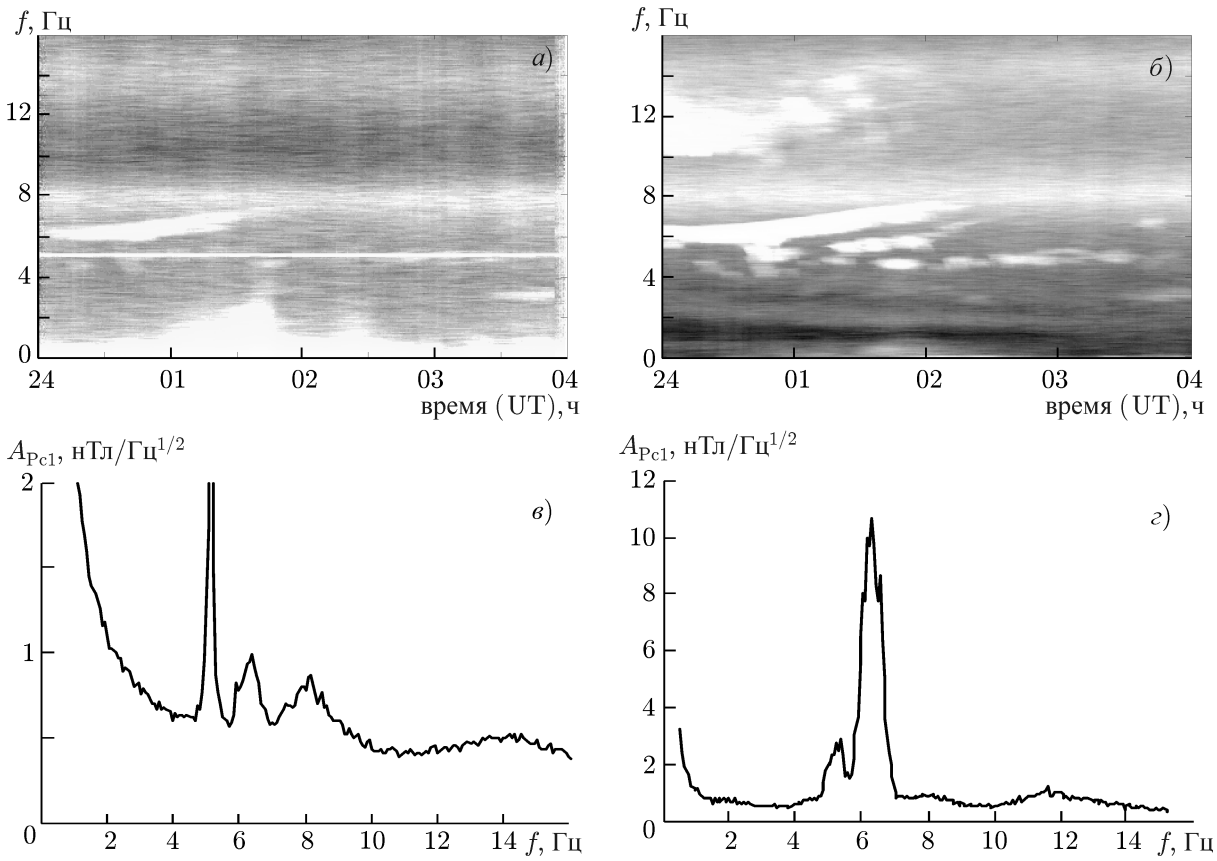

Рис. 7. Спектрограммы магнитной компоненты $H_{СЮ}$ (*а*, *б*) и спектры амплитуды высокочастотных пульсаций Pc1 (*в*, *г*) в 00:35 UT 11.11.2004 на наземных станциях «Ловозеро» (*а*, *в*) и «Новая Жизнь» (*б*, *г*)

вости в экваториальной плоскости генерируются левополяризованные низкочастотные волны [1]. Однако при распространении ионно-циклотроных волн вдоль магнитных силовых линий к земле их поляризация может претерпевать существенные изменения: при наличии тяжёлых ионов это изменение зависит от частоты волн и от параметров магнитосферной плазмы (концентрации и тепловой скорости тяжёлых ионов [20]). Таким образом, при наземной регистрации поляризация магнитосферных излучений с двухполосным спектром (выше и ниже гирочастоты ионов гелия) несёт в себе информацию о параметрах магнитосферной плазмы в области гирорезонанса тяжёлых ионов.

Исследованию поляризации геомагнитных пульсаций Pc1 в классическом диапазоне частот посвящено много работ. Например, в работе [21] приведены результаты одновременной регистрация циклотронных волн на спутнике «Viking» и наземной регистрации излучений Pc-1 на станции Моусон (с геомагнитными координатами 70° ю. ш., 19° в. д. и $L = 8$). В этой работе было показано, что поляризация излучения пульсаций Pc1 при наземных измерениях была ближе к линейной, чем поляризация циклотронных волн, регистрируемых на спутниках. Это связано с особенностями распространения ионно-циклотронных волн вдоль силовых линий магнитного поля к земной поверхности. Этому же вопросу были посвящены теоретические исследования, выполненные в работах [22, 23]. Как известно, на поляризацию излучений в диапазоне микропульсаций также влияет распространение в ионосферном волноводе. Исследование особенностей поляризации пульсаций Pc1 при наземной регистрации было проведено в работах [24–26].

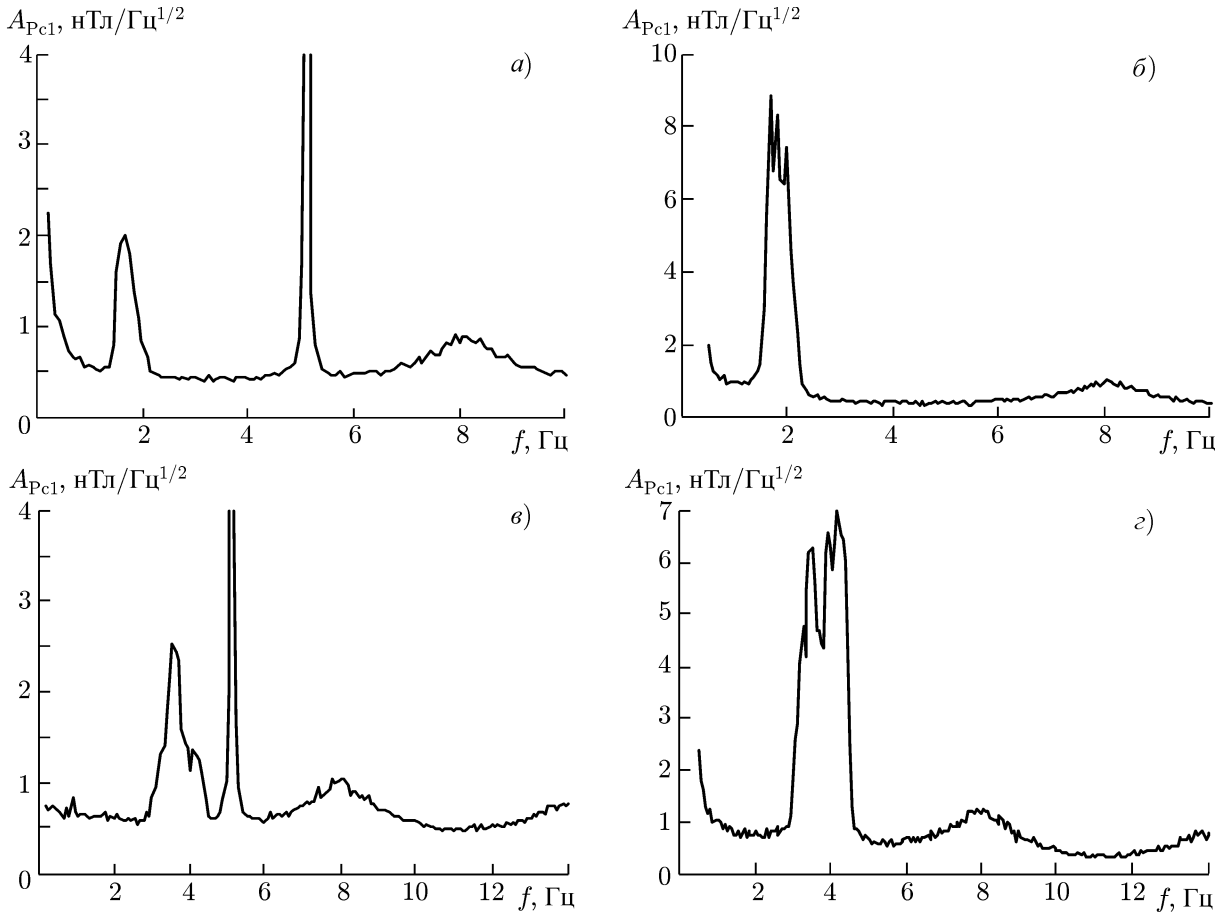

Рис. 8. Спектры амплитуды Pc1 в период возвращения плазмопаузы на более высокие геомагнитные широты в 03:00 UT (*а*, *б*) и 04:00 UT (*в*, *г*) 13.11.2004 на станциях «Ловозеро» (*а*, *в*) и «Новая Жизнь» (*б*, *г*)

4.1. Данные обработки

Для изучения поляризации высокочастотных пульсаций Pc1 мы анализировали спектры параметра ε, который характеризует сдвиг фаз между магнитными компонентами и определяется следующей формулой:

$$\varepsilon = \frac{|H_{\mathrm{R}}|/|H_{\mathrm{L}}| - 1}{|H_{\mathrm{R}}|/|H_{\mathrm{L}}| + 1}\,. \tag{1}$$

Здесь $H_{\mathrm{R}} = (H_{\text{СЮ}} + iH_{\text{ВЗ}})/\sqrt{2}$, $H_{\mathrm{L}} = (H_{\text{СЮ}} - iH_{\text{ВЗ}})/\sqrt{2}$, $H_{\text{СЮ}}$ и $H_{\text{ВЗ}}$ — компоненты магнитного поля, измеряемые магнитными датчиками.

На рис. 9 приведены спектры параметра поляризации ε на станции «Новая Жизнь» в периоды регистрации высокочастотных пульсаций Pc1. Из него видно, что высокочастотные пульсации, так же, как и классические пульсации Pc1, хорошо видны в спектре параметра ε, поскольку их поляризация отличается от поляризации фонового магнитного шума, источником которого являются наземные грозовые очаги. Для высокочастотных пульсаций Pc1 преобладала линейная или левая поляризация. В случае двухполосного характера спектров, поляризация на частотах выше и ниже гирочастоты ионов гелия имела одинаковый характер для интервалов 22:30 UT 10.11.2004–03:30 UT 11.11.2004 и 06:00–08:00 UT 11.11.2004. Исключением явился период регистрации высокочастотных пульсаций Pc1 09:00–12:00 UT 11.11.2004, когда в нижней полосе часть

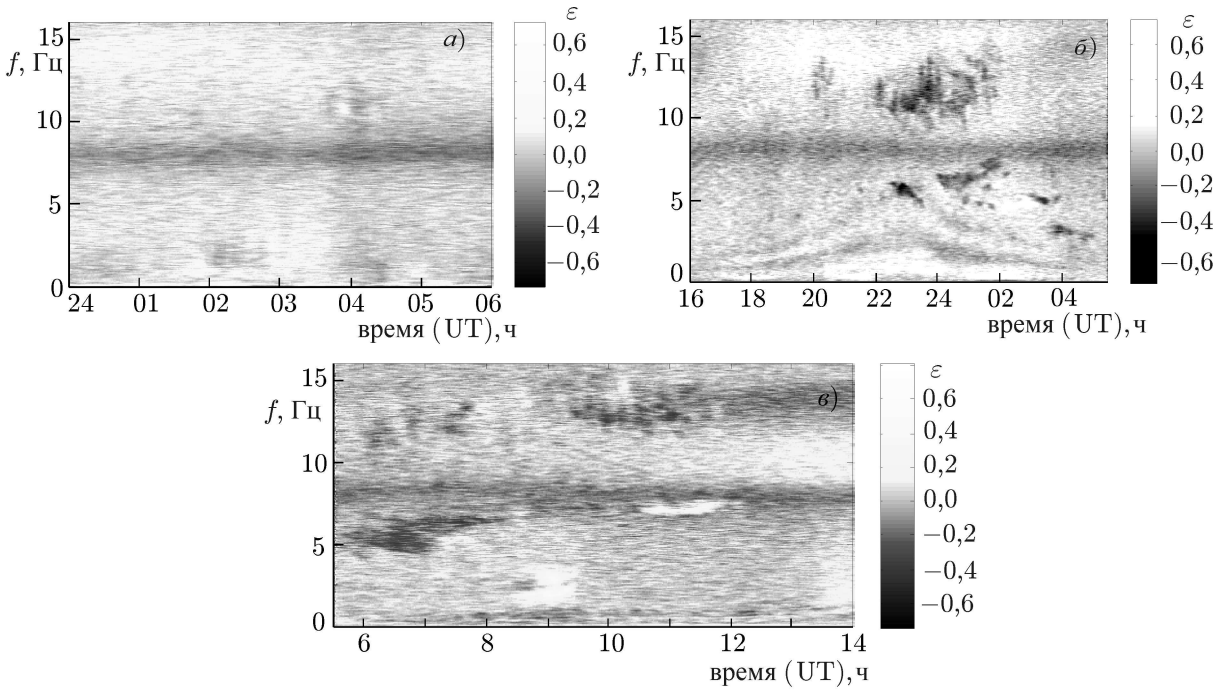

Рис. 9. Спектрограммы параметра поляризации для станции «Новая Жизнь» в периоды наблюдения высокочастотных пульсаций Pc1 10.11.2004 (*а*), 10–11.11.2004 (*б*) и 11.11.2004 (*в*)

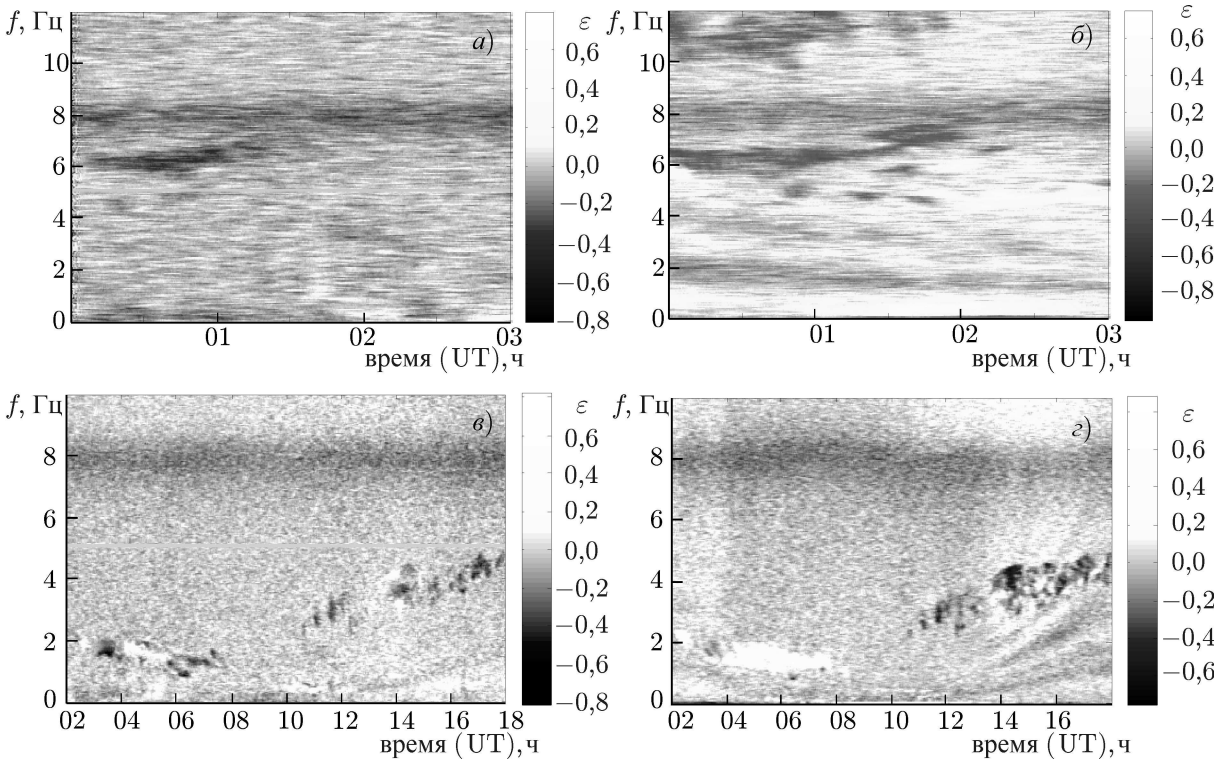

Рис. 10. Спектрограммы поляризационного параметра для станции «Новая Жизнь» (*б*, *г*) и «Ловозеро» (*а*, *в*) для 11.11.2004 (*а*, *б*) и 13.11.2004 (*в*, *г*)

времени наблюдалось преобладание правополяризованного сигнала. Сходный характер поляризации мы наблюдаем для высокочастотных пульсаций Pc1 (частоты 6÷8 Гц) и для станции «Ловозеро» (рис. 10*а*, *б*). При уменьшении частоты наблюдаемого излучения мог наблюдаться разный характер поляризации пульсаций Pc1 на двух этих станциях. Так, в период восстановления плазмопаузы 13.11.2004 после 05:00 UT на частотах ниже 2 Гц на станции «Ловозеро» преобладали левополяризованные сигналы, а на станции «Новая Жизнь» пульсации имели ярко выраженную правую поляризацию. Разница в поляризации сигналов на одних и тех же частотах на разных станциях определяется, по всей вероятности, особенностями распространения излучения в МГД-волноводе.

5. РАСЧЁТЫ ПАРАМЕТРОВ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ НИЗКОШИРОТНОЙ ПЛАЗМОПАУЗЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для подтверждения того, что наблюдаемое высокочастотное излучение в диапазоне частот 6÷15 Гц может быть связано с развитием ионно-циклотронной неустойчивости на необычно низкоширотной плазмопаузе, были выполнены численные расчёты однопроходового усиления для различных параметров магнитосферной плазмы при наличии ионов гелия. Коэффициент усиления вычислялся для продольно распространяющихся волн в разумном и часто используемом предположении, что дисперсионные свойства волн определяются холодной плазмой, а энергичные частицы дают вклад только в антиэрмитову часть тензора диэлектрической проницаемости. Исходные формулы приведены, например, в книге [27]. Распределение энергичных протонов по скоростям выбиралось в виде двухтемпературной максвелловской функции. Графики однопроходового усиления получены простым умножением коэффициента усиления в экваториальной плоскости на длину силовой трубки, соответствующей размеру области усиления в 20 ± 10 градусов по геомагнитной широте. Это с точностью около 10÷20 % соответствует результату численного интегрирования для «разрешённых» частотных интервалов в экваториальной плоскости. Таким образом, данные расчёты дают разумную приближённую оценку величины ионно-циклотронного усиления и позволяют судить о нём в разных частотных диапазонах.

Расчёты проводились для низких L-оболочек, значения которых выбирались по данным регистрации высыпаний энергичных протонов на спутниках NOAA. При моделировании варьировались следующие параметры: концентрация холодной плазмы $N_{\rm c}$, показатели анизотропии и энергия протонов кольцевого тока. Результаты расчётов приведены на рис. 11. Рисунок 11*а* соответствует расчётам для $L = 2{,}42$, что совпадает со значением L для протонных высыпаний, зарегистрированных в первом временно́м интервале наблюдения высокочастотных пульсаций Pc1; рис. 11*б* соответствует расчётам для более высоких геомагнитных широт ($L = 2{,}6$, CGlat $= 52°$). Высыпания на таких L-оболочках были зарегистрированы на спутниках NOAA во втором временно́м интервале наблюдения высокочастотных излучений.

Коэффициент усиления при наличии тяжёлых ионов гелия имеет двухполосный характер и неплохо соответствует наблюдаемой структуре спектра высокочастотных пульсаций Pc1: нижняя полоса имеет максимум на частотах ниже первого шумановского резонанса, а верхняя частотная полоса — между первым и вторым шумановскими резонансами. Ширина нижней полосы спектра коэффициента усиления в 2÷2,5 раза меньше ширины верхней полосы, что также соответствует экспериментальным данным. Коэффициент усиления имеет сопоставимую величину в двух разных частотных полосах. Наблюдаемое излучение в высокочастотной полосе имеет амплитуду в 2÷3,5 раза меньшую, чем в низкочастотной полосе.

Это может быть объяснено, в частности, более «комфортными» условиями распространения

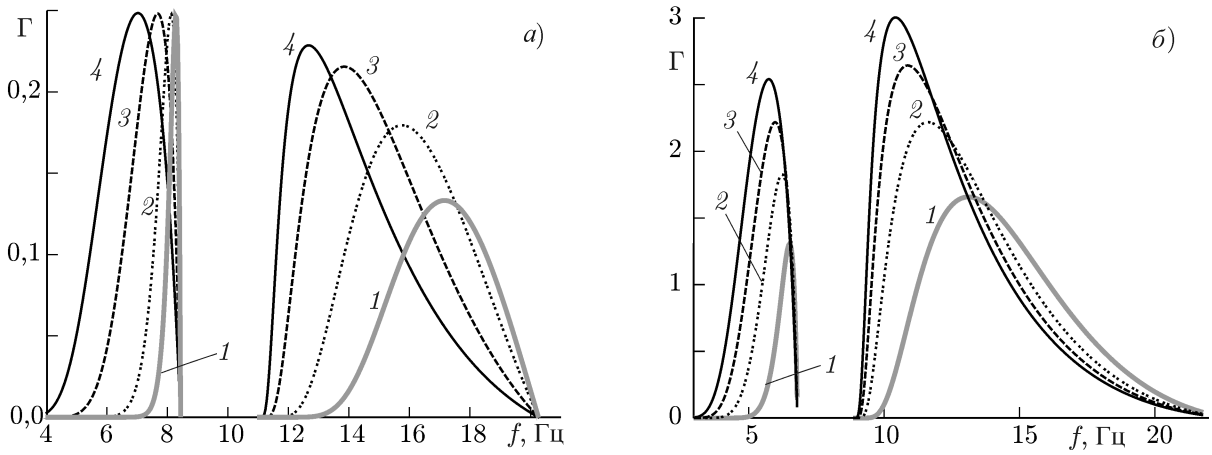

Рис. 11. Однопроходовый коэффициент усиления ионно-циклотронных волн на низких геомагнитных широтах для различных параметров холодной плазмы и энергичных протонов. Относительное содержание ионов H^+, He^+ и O^+ в холодной плазме 0,9; 0,1 и 0 соответственно. На панели (*а*) $L = 2{,}42$, параметр анизотропии для энергичных протонов $A = 1{,}5$; их энергия и поток составляют $W_p = 50$ кэВ и $I_p = 10^8$ см$^{-2}$ с$^{-1}$ соответственно. Концентрация холодной плазмы $N_c = 10^2$ см$^{-3}$ (кривые *1*); $2 \cdot 10^2$ см$^{-3}$ (*2*); $5 \cdot 10^2$ см$^{-3}$ (*3*); 10^3 см$^{-3}$ (*4*). На панели (*б*) $L = 2{,}6$; $N_c = 10^3$ см$^{-3}$; $A = 5$; $I_p = 10^8$ см$^{-2}$ с$^{-1}$; $W_p = 50$ кэВ (кривые *1*); 100 кэВ (кривые *2*); 150 кэВ (кривые *3*); 200 кэВ (кривые *4*)

ионно-циклотронных волн на частотах ниже экваториальной гирочастоты ионов гелия f_{cHe^+}. На такие условия указывают результаты работы [28], где приведены данные синхронных измерений на спутнике «Polar» и на наземных станциях финской цепочки магнитометров. Они показывают, что при регистрации многополосного излучения на спутнике на наземной станции интенсивное излучение в частотной полосе выше гирочастоты ионов гелия отсутствовало. Наличие ионов гелия может приводить к существенному поглощению ионно-циклотронных волн на частотах выше экваториальной гирочастоты ионов гелия при распространении их вдоль силовых линий к земной поверхности [20]. Кроме того, с ростом частоты увеличивается поглощение низкочастотных волн при распространении вдоль земной поверхности в ионосферном волноводе [29].

Отметим, что случай наблюдения пульсаций только на частотах выше f_{cHe^+} в первый период регистрации высокочастотных пульсаций Pc1 (см. рис. 2) является нетипичным для ионно-циклотронных волн, генерируемых в областях плазмопаузы. Возможно, это связано с бóльшими показателями анизотропии в распределении энергичных протонов по скоростям. Как видно из рис. 11*б*, увеличение показателя анизотропии приводит к резкому уменьшению полосы спектра на частотах ниже f_{cHe^+}, что может сделать затруднительным регистрацию сигналов на этих частотах. Также надо отметить малые значения коэффициента усиления, полученные при расчётах, что может быть компенсировано при генерации ионно-циклотронных волн многократным возвращением их в область неустойчивости. Как следует из работ [20, 22, 23, 27], малая добавка тяжёлых ионов может сильно влиять на распространение и поляризацию ионно-циклотронных волн или играть роль только поглощающего фильтра. Это определяется не только концентрацией тяжёлых ионов, но и их тепловой скоростью. В работе [23] было показано, что в результате сильного взаимодействия лево- и правополяризованных циклотронных волн возможно их проникновение через область гирорезонанса тяжёлых ионов и дальнейшее распространение до ионосферных высот. В этом случае поляризация волн, имеющих первоначально частоту выше экваториальной гирочастоты ионов гелия, может существенно меняться в области гирорезонанса. Если же тяжёлые ионы играют только роль поглощающего фильтра, то поляризация в более высокочастотной полосе не меняется существенно по сравнению с поляризацией в низкочастотной полосе при рас-

пространении волн к земной поверхности, что мы и наблюдаем в эксперименте, по крайней мере, для двух периодов регистрации высокочастотных пульсаций Pc1.

ВЫВОДЫ

Данные наземного мониторинга на среднеширотной станции «Новая Жизнь» ($L = 2{,}6$) позволили впервые зарегистрировать геомагнитные пульсации на частотах 6÷15 Гц, заметно превышающих классический диапазон пульсаций Pc1, но в основных свойствах подобных им. Комплексный анализ магнитных данных наземных станций и данных низкоорбитальных спутников NOAA по регистрации локализованных высыпаний энергичных протонов с использованием опубликованных ранее [13] данных со спутника IMAGE по регистрации протонных сияний позволил связать наблюдаемое наземное излучение с генерацией ионно-циклотронных волн в области необычно низкоширотной плазмопаузы в период магнитной бури 07–14.11.2004, т. е. с механизмом, типичным для «обычных» Pc1. Анализ данных спутников NOAA показал, что во время регистрации высокочастотных пульсаций Pc1 высыпания наблюдались на необычно низких широтах, близких к широте точки наблюдения геомагнитных пульсаций.

Оценка геомагнитного поля по геомагнитной широте области высыпаний указывает на то, что пульсации Pc1 наблюдались на частотах как выше, так и ниже экваториальной гирочастоты ионов гелия f_{cHe^+}.

В периоды наблюдения двух полос ширина частотной полосы для частот ниже f_{cHe^+} составляла 1÷1,5 Гц, а для частот выше f_{cHe^+} она равнялась 2,5÷3 Гц. Амплитуда излучений в полосе ниже f_{cHe^+} была в 2÷3,5 раза выше, чем в высокочастотной полосе.

Обнаружено, что при одновременной регистрации сигналов Pc1 на станциях «Ловозеро» и «Новая Жизнь» амплитуда высокочастотных Pc1 на среднеширотной станции на порядок превосходила амплитуду на высокоширотной. Это может быть связано с увеличением пути распространения излучений Pc1 до высокоширотной станции «Ловозеро» (CGLat $= 64°$) по сравнению с длиной трассы до низкоширотного пункта «Новая Жизнь» (CGLat $= 52°$) и с возрастанием затухания на больши́х частотах при распространении в ионосферном МГД-волноводе.

Обнаружено, что на обеих станциях преобладали высокочастотные пульсации Pc1 с линейной или левой квазициркулярной поляризацией. Обнаружено, что по крайней мере в двух случаях регистрации двухполосного спектра высокочастотных пульсаций Pc1 на среднеширотной станции «Новая Жизнь» поляризация в этих полосах имела одинаковый характер, что может быть связано со слабым влиянием области гирорезонанса тяжёлых ионов (He^+) на поляризацию излучения в более высокочастотной полосе.

Обнаружена структура спектров высокочастотных пульсаций Pc1 в виде почти вертикальных полос, которая наиболее заметна на частотах выше гирочастоты ионов гелия. Такая морфологическая особенность спектров наблюдается и в классическом диапазоне пульсаций Pc1, что указывает на сходный механизм генерации пульсаций в разных частотных диапазонах.

Численные расчёты усиления ионно-циклотронной неустойчивости для $L = 2{,}4 \div 2{,}6$ адекватно объяснили наблюдаемую структуру спектра высокочастотных пульсаций Pc1, но дали довольно низкие значения коэффициента однопроходового усиления $\Gamma = 0{,}25 \div 3$. Поэтому для генерации высокочастотных пульсаций Pc1 большое значение имеет наличие отражающих низкочастотные волны областей и выполнение условий канализированного распространения волн (последнее как раз имеет место в области плазмопаузы).

Работа Е. Н. Ермаковой и Д. С. Котика по анализу низкочастотных данных выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 15–42–02544-р_поволжье_а, 13–02–12074-офи_м), работа

А. Г. Демехова по вычислению коэффициентов усиления ЭМИЦ волн выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-42-02544-р_поволжье_а), работа А. Г. Яхнина по анализу данных NOAA по высыпанию энергичных протонов выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 15–12–20005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троицкая В. А., Гульельми А. В. // Успехи физ. наук. 1969. Т. 97. С. 453.
2. Saito T. // Spase Sci. Rev. 1969. V. 10, No. 3. P. 319.
3. Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменова Н. Г. // Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Л.: ЛГУ, 1976. 270 с.
4. Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. // Space Sci. Rev. 1998. V. 83, No. 3–4. P. 435.
5. Яхнина Т. А., Яхнин А. Г., Кангас Й., Маннинен Ю. // Космические исследования. 2002. № 3. С. 230.
6. Yahnina T. A., Yahnin A. G., Kangas J., et al. // Ann. Geophys. 2003. V. 21, No. 12. P. 2 281.
7. Yahnin A. G., Yahnina T. A. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 1 690.
8. Sergeev V. A., Sazhina E. M., Tsyganenko N. A., et al. // Planet. Space Sci. 1983. V. 31. P. 1 147.
9. Ермакова Е. Н., Яхнин А. Г., Яхнина Т. А. и др. // Тр. XXIV Всероссийской научн. конф. “Распространение радиоволн”, 29 июня–5 июля 2014 г., г. Иркутск. С. 239.
10. Yahnin A. G., Yahnina T. A., Frey H. U. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. no. A10223.
11. Яхнин А. Г., Яхнина Т. А., Фрей Х. У. // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4. С. 344.
12. Yahnin A. G., Yahnina T. A., Frey H., Pierrard V. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2013. V. 99. P. 61.
13. Soraas F., Laundal K. M., Usanova M. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 1 112.
14. Evans D. S., Greer M. S. Polar orbiting environmental satellite space environment monitor. 2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Technical Memorandum OAR SEC_93. Boulder, 2000.
15. Fukunishi H., Toya T., Koike K., et al. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 9 029.
16. Safargaleev V., Kangas J., Kozlovsky A., Vasil’ev A. // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 1 751.
17. Yahnina T. A., Frey H. U., Bosinger T., Yahnin A. G. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. A07209.
18. Anderson B. J., Hamilton D. C. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, No. A7. P. 11 369.
19. Anderson B. J., Erlandson R. E., Engebretson M. J., et al. // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 769.
20. Трахтенгерц В. Ю., Райкрофт М. Дж. Свистовые и альвеновские циклотронные мазеры в космосе. М.: Физматлит, 2011. 344 с.
21. Bräysy T., Mursula K. Marklund G. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, No. A3. P. 4 145.
22. Rauch J. L., Roux A. // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 8 119.
23. Jay R., Johnson, Cheng C. Z. // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26, No. 6. P. 671.
24. Kim H., Lessard M. R., Engebretson M. J., Luhr H. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. no. A09310.
25. Fujita S., Tamao T. // J. Geophys. Res. 1988. V. 93, No. A12. P. 14 665.
26. Nomura R., Shiokawa K., Pilipenko V., Shevtsov B. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. no. A01204.
27. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альвеновские мазеры. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 190 с.
28. Mursula K., Bräysy T., Rasinkangas R., et al. // Adv. Space Res. 1999. V. 24. P. 81.
29. Fujita Sh. // Planet. Space Sci. 1987. V. 35. P. 91.

Поступила в редакцию 14 ноября 2014 г.; принята в печать 11 июля 2015 г.

SPORADIC GEOMAGNETIC PULSATIONS AT FREQUENCIES OF UP TO 15 Hz IN THE MAGNETIC STORM OF NOVEMBER 7–14, 2004: FEATURES OF THE AMPLITUDE AND POLARIZATION SPECTRA AND THEIR CONNECTION WITH ION–CYCLOTRON WAVES IN THE MAGNETOSPHERE

E. N. Ermakova, A. G. Yakhnin, T. A. Yakhnina, A. G. Demekhov, and D. S. Kotik

We study the dynamics of the geomagnetic-pulsation spectra at unusually high frequencies (including the frequencies exceeding the Schumann resonance frequency 8 Hz), which were detected for the first time at the Novaya Zhizn' midlatitude station (the McIlwain parameter $L = 2.6$) at the time of a strong magnetic storm on November 07–14, 2004. To interpret the observed pulsation frequencies, we used the data from the low-orbit NOAA satellites which recorded localized precipitations of energetic protons (with energies of 30 to 80 keV) and calculations of the single-pass cyclotron amplification of electromagnetic ion–cyclotron waves. Amplitude and polarization characteristics of the radiation spectra at frequencies of up to 15 Hz at the Novaya Zhizn' and Lovozero stations ($L = 5.2$) are compared. It is shown that the magnetic field oscillations in the frequency range 7–15 Hz correlate with proton precipitations and proton auroras at geomagnetic latitudes 50°–57° ($L = 2.42$–3.37). It is also shown that for a high anisotropy of the pitch-angle distribution of the ring-current protons at such low geomagnetic latitudes, the frequency spectrum of observed high-frequency radiation agrees well with the calculated position of the maximum of the single-pass cyclotron amplification of electromagnetic ion–cyclotron waves. Analysis of the data and calculation results has led to the conclusion that inherently the recorded signals are a high-frequency counterpart of the Pc1 pulsations and are due to the generation of ion–cyclotron waves in the magnetosphere at unusually low latitudes, which are probably stipulated by the shift of the plasmapause to these latitudes during a strong magnetic storm.