УДК 550.383

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ СПЕКТРОВ МНОГОПОЛОСНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Рс1 ПРИ НАЛИЧИИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МАГНИТОСФЕРЕ

Е. Н. Ермакова¹*, А. Г. Демехов^{2,3,4}, Т. А. Яхнина², А. Г. Яхнин², Д. С. Котик¹, *Т. Райта*⁵

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,

г. Нижний Новгород;

² Полярный геофизический институт, г. Апатиты;

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

⁴ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

 5 Геофизическая обсерватория «Соданкюля» Университета Оулу, Соданкюля, Финляндия

По данным наземных магнитных измерений на станциях, значительно разнесённых по широте и долготе, исследованы особенности динамики спектров многополосных спорадических пульсаций в диапазоне Pc1 (0,2÷5,0 Гц) во время события 05–06.03.2011. Событие характеризуется большой продолжительностью (около 16 ч), наличием нескольких полос с изменяющимися во времени частотами, расщеплением этих полос на более узкие полосы, значительными изменениями амплитуды и поляризации наземных сигналов и их наблюдением в широком интервале широт и долгот. На основе совместного анализа свойств пульсаций Рс1 и данных низкоорбитальных спутников, регистрирующих локализованные высыпания энергичных протонов в ионосферу, определены возможные области генерации этих волн в магнитосфере и сделан вывод о множественности этих областей. Результаты анализа позволили даже в отсутствие непосредственных наблюдений волн в магнитосфере определить причины уширения и расщепления частотных полос Рс1. Предложено объяснение нетипичного для наземной регистрации характера спектров двухполосных пульсаций Рс1, когда сигнал на частотах выше гирочастоты ионов гелия имеет большую амплитуду, чем на более низких частотах, ие неоднородной структуры поляризации в разных частотных полосах. Возможные изменения в параметрах магнитосферной плазмы, приводящие к наблюдаемой динамике амплитудных и поляризационных спектров пульсаций Рс1, были выявлены на основе расчётов циклотронного усиления волн энергичными ионами в магнитосфере.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, интенсивные сигналы в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций Pc1 (0,2÷5,0 Гц) связывают с развитием ионной циклотронной неустойчивости электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн, обусловленной анизотропным распределением энергичных (10÷100 кэВ) ионов кольцевого тока магнитосферы [1, 2]. Характеристики пульсаций Pc1, регистрируемых на Земле, зависят как от условий генерации электромагнитных ионно-циклотронных волн в экваториальной плоскости магнитосферы, так и от условий их распространения в магнитосферной плазме вдоль линий геомагнитного поля (например, при прохождении области гирорезонанса ионов гелия) и параметров ионосферной плазмы, определяющих особенности распространения магнитосферных излучений в магнитогидродинамическом волноводе. Помимо этого, типичной является ситуация, когда в магнитосфере существуют несколько источников (областей генерации) электромагнитных ионно-циклотронных волн. Всё это может привести к довольно сложной эволюции спектров пульсаций Pc1 на Земле. Для использования наземных данных

^{*} l.ermakova@nirfi.unn.ru

о пульсациях в целях диагностики магнитосферных условий в области кольцевого тока необходимы исследования различных событий с привлечением дополнительных данных и расчётов, позволяющих получить их непротиворечивую физическую картину. Данная работа посвящена анализу весьма своеобразного события, зарегистрированного 5–6 марта 2011 года, для которого, помимо наземных магнитных наблюдений долгоживущих интенсивных пульсаций Pc1, имеются данные низкоорбитальных спутников NOAA POES о высыпаниях энергичных протонов в ионосферу.

Характерными особенностями этого события, наряду с его большой продолжительностью (более 16 ч), являются наличие нескольких частотных полос пульсаций Pc1 с изменяющимися во времени частотами и расщеплением на более узкие полосы, довольно резкие изменения амплитуды и поляризации наземных сигналов и их наблюдение в широком интервале широт и долгот. Соотношение амплитуд пульсаций в полосах выше и ниже экваториальной гирочастоты ионов гелия было нетипичным для наземных данных (компонента с большей частотой преобладала по амплитуде) и довольно сильно изменялось в ходе наблюдений. Кроме того, в этом интервале времени на спутниках NOAA было обнаружено изменение числа высыпаний энергичных протонов от единичных до множественных, что дало возможность исследовать зависимость спектров Pc1 от количества и положения областей ионно-циклотронной неустойчивости даже в отсутствие магнитосферных наблюдений ЭМИЦ волн.

Подобное долгоживущее (около 8 ч) событие в диапазоне Pc1 исследовалось в работе [3] на основе данных спутников Van Allen Probes, GOES, и NOAA и наземных станций. Регистрация магнитосферных сигналов на наземных станциях в широком интервале геомагнитных широт и местного магнитного времени (MLT) объясняется в этой работе большой протяжённостью областей генерации ЭМИЦ волн по *L*-оболочкам и секторам MLT. В отличие от работы [3], в данной работе анализируется влияние разных областей ионно-циклотронной неустойчивости на параметры амплитудных и поляризационных спектров наземных пульсаций Pc1. Отметим, что возможная связь наличия нескольких полос в амплитудном спектре Pc1 с существованием нескольких областей ионно-циклотронной неустойчивости на разных геомагнитных широтах продемонстрирована в работе [4].

В данной работе влияние большого количества источников ЭМИЦ волн на структуру спектров пульсаций Pc1 на земной поверхности изучается на основе сравнительного анализа спектральных параметров этих сигналов на наземных станциях, расположенных не только на разных широтах, но и в разных секторах MLT. Это позволило получить дополнительную информацию о положении магнитосферных источников и их влиянии на спектры многополосных пульсаций Pc1. Для анализа привлекались результаты численных расчётов циклотронного усиления электромагнитных ионно-циклотронных волн в областях с разными значениями параметров магнитосферной плазмы. С их помощью удалось выявить возможные вариации этих параметров, непротиворечиво объясняющие совокупность наблюдательных данных.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе используются данные низкочастотной регистрации горизонтальных компонент магнитного поля в диапазоне 0,1÷10,0 Гц на среднеширотных пунктах в Нижегородской области и на станции «Монды», высокоширотной станции «Ловозеро» и на станциях финской цепочки магнитометров. В табл. 1 приведены географические координаты этих станций, исправленные геомагнитные широта (CGMLat) и долгота (CGMLon), значение *L*-оболочки и мировое время (UT),

C ⁴					-	
Станция	Географическая	Географическая	CGMLat,	CGMLon,	L	UT
	северная	восточная	градусы	градусы		(MLT=0)
	широта,	долгота				
	градусы	градусы				
«Ловозеро» (LOZ)	68,01	$35,\!03$	$64,\!53$	114,18	5,41	$20,\!69$
«Соданкюля» (SOD)	$67,\!42$	$26,\!39$	64,19	$106,\!65$	5,23	$21,\!18$
«Рованиеми» (ROV)	66,78	$25,\!94$	$63,\!55$	105, 91	5,04	$21,\!23$
«Оулу» (OUL)	65,08	$25,\!90$	61,80	$104,\!97$	4,48	$21,\!29$
«Нурмиярви» (NUR)	60,51	$24,\!65$	57,06	$101,\!95$	3,38	$21,\!49$
«Новая Жизнь» (NL)	56,00	45,74	52,25	119,76	$2,\!67$	$20,\!35$
«Монды» (MON)	$51,\!37$	100,55	46,98	174,13	2,15	$17,\!34$

Таблица 1

соответствующее местной магнитной полуночи¹. Из таблицы видно, что станции образуют три группы по геомагнитной долготе: западнее всех финские станции, далее станции «Ловозеро» и «Новая Жизнь», а восточнее всех находится станция «Монды».

Кроме наземных магнитометрических данных, использовались данные шести низкоорбитальных (высота орбиты примерно 800 км) спутников NOAA-15÷NOAA-19 и MetOp-02. Они оснащены идентичными наборами детекторов заряженных частиц, в частности протонов. Потоки энергичных (с энергиями более 30 кэВ) частиц измеряются в двух взаимно перпендикулярных направлениях: один датчик направлен в зенит, а второй — вдоль траектории спутника. Апертура датчиков составляет 15°, поэтому на субавроральных и авроральных широтах первый датчик измеряет потоки частиц в конусе, а второй — вне конуса потерь (т. е. потоки высыпающихся и захваченных частиц соответственно). На высоких широтах потоки энергичных протонов изотропны, что проявляется в равенстве потоков высыпающихся и захваченных частиц. Изотропия потоков здесь объясняется нарушением адиабатичности движения протонов в той области магнитосферы, где гирорадиус протона становится сравним с радиусом кривизны силовой линии магнитного поля. Вследствие этого происходит рассеяние по питч-углам, в том числе и в конус потерь [5]. В субавроральной зоне потоки захваченных частиц обычно значительно выше потоков высыпающихся частиц. Это так называемая зона анизотропных потоков. Данные спутников NOAA и MetOp использовались в этой работе для определения координат локализованных высыпаний энергичных протонов именно в зоне анизотропных потоков. Такие высыпания, подробно исследованные в работах [6, 7], связывают с питч-угловой диффузией протонов на ЭМИЦ волнах. Поскольку высыпающиеся заряженные частицы движутся вдоль силовых линий геомагнитного поля, регистрация подобных высыпаний позволяет использовать их для диагностики положения источника ЭМИЦ волн. Для удобства дальнейшего изложения приведём классификацию локализованных высыпаний энергичных протонов, предложенную в работах [6, 7]. Высыпания первого типа представляют собой локализованные по широте (около 1°) изолированные всплески высыпаний энергичных протонов на широтах плазмопаузы в утреннем и дневном секторах, связанные с квазимонохроматическими пульсациями Рс1 [6]. Локализованные высыпания в вечернем секторе (высыпания второго типа) часто связаны с так называемыми колебаниями убывающего периода — пульсациями в диапазоне Pc1, которые также считаются индикатором ЭМИЦ волн [6]. Высыпания в относительно высоких широтах (высыпания третьего типа [7]) имеют значитель-

¹ Исправленные геомагнитные координаты, в соответствии с определением, рассчитывались с помощью трассирования положения станции на дипольный экватор по модели магнитного поля IGRF и обратного трассирования до высоты 100 км по дипольному полю. Местное магнитное время (MLT, в часах) определялось как α/15, где α угол в градусах между плоскостью, содержащей дипольный магнитный полюс и подсолнечную точку, и плоскостью, содержащей дипольный полюс и заданную точку (положение станции).

ную протяжённость по широте (часто более 2°) и долготе. Они обусловлены развитием ионноциклотронной неустойчивости в области поперечной анизотропии горячих протонов, которая образуется на дневной стороне в результате так называемого расщепления дрейфовых оболочек. Высыпания первого и второго типа обычно связаны с развитием ионно-циклотронной неустойчивости на градиентах холодной плазмы (область плазмопаузы либо плазмосферного хвоста) [8–10], в то время как высыпания третьего типа наблюдаются на высоких широтах и с плазмопаузой не связаны [7]. В рассматриваемом событии высыпания второго типа не наблюдаютсь.

При анализе данных низкоорбитальных спутников нужно учитывать пространственные особенности протонных высыпаний. Так, высыпания первого типа локализованы не только по широте, но и по долготе [9], поэтому отсутствие всплеска высыпаний в данных спутника не исключает наличие источника (области генерации) ЭМИЦ волн на другой долготе. Высыпания третьего типа имеют не только большие широтные размеры, но и значительную долготную протяжённость, поэтому отсутствие регистрации высыпаний этого типа с большой вероятностью означает отсутствие источника и на другой долготе.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОБЫТИЯ

Рассматриваемый интервал времени характеризовался невысокой геомагнитной активностью и соответствовал поздней стадии восстановления средней магнитной бури с минимальным значением индекса $D_{\rm st} \approx -80$ нТл, достигнутым 01.03.2011. В течение 05.03.2011 имели место небольшие авроральные активации, причём начиная с 06:00 UT индекс AE не превышал 200 нТл. Поэтому наблюдаемые пульсации Pc1 можно считать типичным проявлением ионно-циклотронной неустойчивости в условиях контакта распадающегося кольцевого тока с восстанавливающейся плазмосферой на достаточно больши́х расстояниях от Земли. В 03:20÷04:00 UT 6 марта имело место усиление давления солнечного ветра от 1,4 до 3,4 нПа и соответствующее поджатие магнитосферы, характеризуемое увеличением индекса $D_{\rm st}$ на 10 нТл.

На рис. 1 приведены спектрограммы магнитных компонент, демонстрирующие наблюдаемое событие. Оно началось около 21:20 UT 05.03.2011 и продолжалось почти до 14:00 UT 06.03.2011.

В целом сигнал характеризуется наличием двух полос, отличающихся по частоте примерно вдвое. Они особенно хорошо проявляются на станциях «Новая Жизнь» и «Ловозеро» и несколько хуже на станциях финской сети и станции «Монды». Средние частоты этих полос вначале (примерно до 06:00 UT 06.03.2011) увеличивались от 0,8 до 1,0 Гц и от 1,4 до 2,0 Гц, а затем уменьшались до значений, близких к начальным. После 09:00 UT 06.03.2011 полоса с большей частотой практически не видна на фоне шумов. Эта картина осложняется сильными вариациями спектральной амплитуды в каждой полосе и появлением дополнительных полос (например, такую полосу на частотах 0,5÷0,7 Гц можно выделить с 05:00 до 08:50 UT). Более детально динамика спектров пульсаций описана в разделе 3.1.

Пример регистрации энергичных протонов спутниками NOAA приведён на рис. 2. Хорошо видна область изотропии потоков на высоких широтах, где потоки захваченных протонов (чёрная линия) и потоки высыпающихся протонов (синяя линия) примерно равны. Высыпания, связанные с питч-угловой диффузией на ЭМИЦ волнах, локализованы по широте и наблюдаются в области анизотропных потоков. В приведённых примерах высыпания первого типа видны на широтах $62^{\circ} \div 64^{\circ}$, а высыпания третьего типа — на широтах, превышающих 67° . На рис. 3 показаны все случаи таких высыпаний, зарегистрированных в интервале времени от 21:00 UT 05.03.2011 до 13:00 UT 06.03.2011. На рис. 3*a* они нанесены на плоскость (UT, MLT); сплошная линия соответствует меридиану станции «Новая Жизнь», штриховые линии ограничивают долготный сектор с центром на этом меридиане и шириной 5 ч MLT. Именно в таком секторе, согласно предыдущим



Рис. 1. Спектрограммы (в относительных единицах) магнитной компоненты восток—запад на станциях «Монды» (*a*) и «Ловозеро» (*b*) и компоненты север—юг на станции «Новая Жизнь» (*б*) и в обсерватории «Соданкюля» (*г*)

работам (например, [11]), обычно находятся источники пульсаций Pc1, регистрируемых наземной станцией.

На рис. 36 сопоставлены границы частотных полос Pc1 и гирочастоты ионов $\text{He}^+(f_{\text{He}+})$ в экваториальной плоскости на тех же геомагнитных широтах, где зарегистрирована каждая



Рис. 2. Примеры локализованных высыпаний энергичных протонов. Высыпания первого типа (обозначены серым фоном) зарегистрированы спутником NOAA-19 около 02:21 UT (*a*) и 07:13 UT (*e*), спутником NOAA-16 около 03:17 UT (*b*), спутником NOAA-17 около 03:54 UT (*d*) и 06:42 UT (*b*) и спутником MetOp-02 около 06:59 UT (*b*). Высыпания третьего типа (обозначены жёлтым фоном) зарегистрированы спутником NOAA-17 около 06:38 UT (*b*), спутником MetOp-02 около 06:57 UT (*b*) и спутником NOAA-19 вблизи 07:15 UT (*e*). Потоки высыпающихся протонов и протонов, захваченных на высоте спутника, показаны толстой синей и тонкой чёрной линиями соответственно

область высыпаний. Верхняя и нижняя полосы пульсаций находятся соответственно выше и ниже $f_{\text{He}+}$ для источников, зарегистрированных 05.03.2011. Поэтому будем называть появившуюся в 21:30 UT полосу Pc1 на частотах около 1,5 Гц протонной полосой (её частота выше $f_{\text{He}+}$, но ниже экваториальной гирочастоты протонов $f_{\text{H}+}$), а полосу с частотой ниже $f_{\text{He}+}$ — гелиевой.

3. ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИЙ Рс1

3.1. Особенности амплитудно-частотных спектров пульсаций Рс1

С 21:39 до 22:20 UT сигнал имел вид полосы в интервале частот 1,3÷1,5 Гц. До 21:50 UT эта полоса наблюдалась только на станции «Новая Жизнь», а затем она появилась в данных



Рис. 3. Панель *а*: положение областей высыпаний энергичных протонов на плоскости UT-MLT. Сплошная линия соответствует меридиану станции «Новая Жизнь», штриховые линии ограничивают долготный сектор с центром на этом меридиане и шириной 5 ч MLT. Панель *б*: экваториальные гирочастоты ионов He+ на геомагнитной широте, соответствующей каждой области высыпаний всех типов. Штриховыми линиями схематично обозначены границы частотных полос регистриуемых пульсаций Pc1, сплошными — центральные частоты полос. Синим цветом показаны высыпания первого типа, зелёным — высыпания первого типа с CGMLat > 63°, красным цветом — высыпания третьего типа



Рис. 4. Спектральные амплитуды S_H магнитных компонент на станциях «Ловозеро» (a) и «Новая Жизнь» (b) 05.03.2011

станций «Ловозеро» и «Монды». На станции «Монды» этот сигнал наблюдается до 24:00 UT, после чего теряется на фоне шумов (рис. 1*a*) и в дальнейшем не регистрируется. Около 22:20 UT появилась полоса пульсаций в диапазоне 0,65÷0,85 Гц, и затем вплоть до конца суток 05.03.2011 спектр Pc-1 на всех станциях имел вид двух полос (см. рис. 1). Протонная полоса была примерно в два раза шире, чем гелиевая. Спектрограммы на рис. 1 построены для отдельных компонент в относительных единицах. Для сравнения амплитуд пульсаций Pc1 в разных полосах на рис. 4 дополнительно приведены спектры амплитуды магнитного поля на двух станциях, построенные с учётом калибровки магнитных датчиков. Эти графики показывают, что интенсивность полосы с бо́льшими частотами в отдельные периоды была выше или сравнима с интенсивностью полосы с меньшими частотами.

Как видно из рис. 1, регистрации пульсаций Pc1 предшествовало наблюдение на станции «Ловозеро» и в обсерватории «Соданкюля» пульсаций PiB и PiC, характерных для суббуревой активности. На станции «Ловозеро» они могли маскировать сигнал Pc1 на частотах ниже 1,5 Гц, видимый на станции «Новая Жизнь» до 21:50 UT.



Рис. 5. Динамика спектральной амплитуды магнитного поля в гелиевой (красные линии) и протонной (синие линии) полосах по измерениям на станциях «Монды» (*a*) и «Ловозеро» (*б*), «Новая Жизнь» (*в*) и в обсерватории «Соданкюля» (*г*) за 05.03.2011. Чёрные линии указывают уровень шума

Таким образом, в первые $2,0\div2,5$ ч рассматриваемого события имела место следующая ситуация. При наземной регистрации существовала только одна полоса в спектре пульсаций Pc1 на частотах выше гирочастоты ионов гелия $f_{\rm He+}$ или пульсации в этой полосе имели бо́льшую амплитуду и сама полоса была более широкой, чем на частотах ниже $f_{\rm He+}$. Эта ситуация нетипична для наблюдений в ночном и утреннем секторах, где область генерации волн обычно связана с плазмопаузой. В частности, это отмечено в работе [12], в которой при одновреме́нных наблюдениях на спутниках и наземных станциях протонная полоса регистрировалась только на спутниках.

На рис. 5 показана динамика максимальной амплитуды пульсаций в обеих частотных полосах Pc1 для каждой станции с 21:50 до 24:00 UT 05.03.2011. Характерной особенностью полосы ниже частоты $f_{\rm He+}$ являлась сходная динамика амплитуды на всех станциях, что, с учётом большого разброса в геомагнитных долготах станций, позволяет предположить, что имелся один общий источник этих пульсаций.

Отметим резкий рост амплитуды пульсаций в гелиевой полосе в период с 22:15 до 22:40 UT на восточной станции «Монды»: в максимуме значение амплитуды пульсаций Pc1 в этой полосе почти в 10÷12 раз превышало амплитуду магнитного шума и в 7 раз амплитуду пульсаций Pc1 в протонной полосе (рис. 1). Для сравнения на другой среднеширотной станции «Новая Жизнь» отношение амплитуды пульсаций Pc1 к амплитуде шума в это время не превосходило 6÷7. После 23:00 UT на стстанции «Монды» наблюдается такое же резкое падение амплитуды сигнала Pc1 в низкочастотной полосе.



Рис. 6. Динамика спектральной амплитуды магнитного поля 06.03.2011 в гелиевой (красная линия) и протонной (синяя линия) полосах на станциях «Ловозеро» (*a*) и «Новая Жизнь» (*б*). Чёрные линии указывают уровень шума

С 00:00 до 01:00 UT 06.03.2011 происходило уширение гелиевой полосы, в то время как ширина протонной полосы не изменялась (рис. 1). После 01:00 UT наблюдались вариации ширины гелиевой полосы, в том числе ярко выраженное уширение после 03:00 UT. Динамика амплитудных спектров пульсаций Pc1 в гелиевой полосе имела в основном сходный характер на всех станциях. Но наблюдались и некоторые различия: на станции «Монды» менее выражено уширение этой полосы в течение 06.03.2011. Так, в интервале времени от 00:00 до 01:15 UT на всех станциях наблюдался рост ширины гелиевой полосы, а на станции «Монды» она существенно не менялась.

Начиная с 00:00 UT амплитуда пульсаций на частотах гелиевой полосы сильно возрастает на всех станциях, в то время как в протонной полосе наблюдаются незначительные уменьшения и увеличения амплитуды (см. рис. 6a, δ).

После 02:30 UT протонная полоса практически полностью исчезает и появляется опять после 03:00 UT на станции «Новая Жизнь». На финских станциях сигнал в этой полосе остаётся еле заметным, а на станции «Ловозеро» наблюдается незначительное увеличение его амплитуды около 04:00 UT (рис. 1). Исчезновение сигнала в протонной полосе коррелирует с уменьшением амплитуды пульсаций в гелиевой полосе и её кратковременным сужением на всех станциях.

Интервал времени после 05:10 UT характеризуется расщеплением гелиевой полосы на две: в диапазоне 0,8÷1,3 Гц (верхняя полоса), и в диапазоне 0,5÷0,9 Гц (нижняя полоса). После расщепления гелиевой полосы пульсаций Pc1 ширина каждой из новых полос составляла 0,2÷0,25 Гц, в то время как перед расщеплением ширина полосы была более 0,4 Гц. Как видно из рис. 1, динамика этих полос различна. Центральная частота верхней полосы незначительно растёт до 06:30÷07:00 UT, затем плавно уменьшается от 1,3 до 0,9 Гц. Частота нижней полосы уменьшается с 0,9 до 0,6 Гц, при этом увеличивается её ширина и происходит дальнейшее расщепление, что особенно заметно в интервале 07:15÷08:40 UT. После 08:40 UT эта полоса практически не видна. На станции «Монды» верхняя из двух новых полос практически не просматривается после 06:00 UT, но в нижней полосе можно увидеть небольшой всплеск около 09:00 UT.

В протонной полосе (1,5÷2,5 Гц) также можно заметить расщепление после 05:10 UT и образование двух вторичных полос с динамикой, напоминающей динамику аналогичных полос в гелиевом диапазоне. Однако вследствие малой амплитуды пульсаций эта динамика просматривается менее отчётливо. Верхняя вторичная полоса различима только до 06:30 UT, нижняя — вплоть до 09:00 UT. Наилучшим образом эти сигналы видны в данных станции «Новая Жизнь», что может

быть связано с более низким уровнем помех.

От 09:00 до 11:00 UT на всех станциях (кроме станции «Монды») наблюдается одна полоса пульсаций в диапазоне 0,8÷1,2 Гц (см. рис. 1), центральная частота которой медленно уменьшается от 1,0 до 0,8÷0,9 Гц. После 11:00 UT эта полоса продолжает наблюдаться, но её интенсивность становится заметно ниже, чем в предыдущем интервале времени, а частота незначительно уменьшается (до 0,8 Гц). Наряду с этим, прослеживается образование двух новых полос выше и ниже по частоте, в диапазоне от 0,5 до 1,3 Гц.

3.2. Характеристики поляризации пульсаций Рс1

В качестве характеристик поляризации пульсаций Pc1 используем параметр поляризации ε и угол ψ между направлением большой оси эллипса поляризации и линией восток—запад (далее азимутальный угол). Этот угол, очевидно, определён с точностью до 180° (в нашей работе в интервале от -90° до $+90^{\circ}$). Параметр ε вычислялся по формуле

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

где $H_{\rm R} = (H_{\rm CHO} - iH_{\rm B3})/\sqrt{2}, H_{\rm L} = (H_{\rm CHO} + iH_{\rm B3})/\sqrt{2}$ — право- и лево-поляризованные компоненты магнитного возмущения соответственно, *H*_{CЮ} и *H*_{B3} — горизонтальные компоненты поля, измеряемые магнитными датчиками, ориентированными соответственно вдоль линий север-юг и восток-запад. Поляризация пульсаций Рс1 может содержать информацию о положении их источников и о параметрах ионосферного магнитогидродинамического волновода, который является каналом распространения для этих волн наряду с промежутком Земля—ионосфера. Как показывают расчёты, поляризация магнитосферного излучения в приёмном пункте существенно зависит от направления на место выхода волн на Землю [13, 14] и от расстояния до него [15]. Согласно работе [15], на расстояниях, меньших или сравнимых с размерами источника, главная ось эллипса поляризации направлена перпендикулярно направлению на источник, а на больших расстояниях — вдоль этого направления. Результаты экспериментальной работы [16] подтвердили, что угол между направлением на источник и главной осью меняется от 90° до 0° с удалением от источника на расстояниях, в 2:4 раза превышающих его горизонтальный размер. В работе [17] обнаружена разница в величинах поляризационного параметра и азимутального угла на различных расстояниях от места инжекции волн в ионосферу. В предыдущих работах было показано также, что на поляризацию пульсаций Рс1 при наземной регистрации влияют как параметры магнитосферной плазмы вдоль магнитной силовой трубки источника ионно-циклотронной неустойчивости [12], так и состояние ионосферной плазмы в области инжекции волн в ионосферу и вдоль трассы их распространения в ионосферном магнитогидродинамическом волноводе [18].

На рис. 76-е приведены спектрограммы величин ε и ψ для 05.03.2011, на рис. 8 и 9 — для 06.03.2011. Для повышения цветового контраста на спектрограммах построены абсолютные значения углов, поскольку в большинстве случаев они имеют один и тот же знак.

Для удобства на рис. 7*a* приведён график динамики амплитуды Pc1 на станции «Монды» (рис. 5*a*). В отдельные интервалы, когда падала интенсивность сигнала, спектры параметров ε и ψ могли быть искажены маскирующим влиянием шумовой компоненты. Это, в частности, могло привести к неоднородному частотному распределению параметров поляризации ε и ψ для станции «Новая Жизнь» в верхней части протонной полосы в интервале 22:45÷23:20 UT и в гелиевой полосе в 23:10÷23:20 UT (рис. 7*6*, ∂). В целом спектры ε и ψ имеют довольно сложную динамику. Ниже выделены их основные особенности, которые далее обсуждаются в связи с эволюцией областей высыпаний энергичных протонов.





Рис. 8. Спектры параметра ε на станциях «Монды» (a), «Новая Жизнь» (б), «Ловозеро» (b), «Рованиеми» (c) и «Оулу» (d) 06.03.2011

Е. Н. Ермакова, А. Г. Демехов, Т. А. Яхнина и др.

12



Рис. 9. Спектры азимутального угла на станциях «Монды» (*a*), «Новая Жизнь» (*б*), «Ловозеро» (*в*), «Рованиеми» (*г*) и «Оулу» (*д*) 06.03.2011

Е. Н. Ермакова, А. Г. Демехов, Т. А. Яхнина и др.

Имеет смысл рассматривать только интервалы с достаточно большой амплитудой пульсаций. Для них видно, что во всей протонной полосе на станциях «Новая Жизнь» и «Ловозеро» угол ψ существенно не зависел от частоты и времени и составлял $50^{\circ} \div 70^{\circ}$ и $20^{\circ} \div 40^{\circ}$ соответственно, а поляризация была левой ($\varepsilon < 0$) на обеих станциях. На станции «Монды» угол ψ в протонной полосе составлял $50^{\circ} \div 80^{\circ}$ и также мало изменялся, но интенсивность пульсаций в этой полосе сравнима с шумом после 22:40 UT. В этом случае анализ параметров поляризации невозможен. Спектр угла ψ в протонной полосе на станциях «Ловозеро» и «Новая Жизнь» был однороден и 06.03.2011 во время её регистрации до 01:00 UT и после 07:30 UT на станции «Ловозеро» (рис. 96, 6), при этом на станции «Ловозеро» $\psi \approx 40^{\circ}$ и на станции «Новая Жизнь» $\psi \approx 60^{\circ} \div 65^{\circ}$. После 01:00 UT спектр ψ на станции «Ловозеро» в этой полосе неоднороден по частоте, а поляризация становится преимущественно правой, в отличие от сохранения левой поляризации на станции «Новая Жизнь». Это может быть частично связано с маскирующим влиянием шумовой компоненты при малой интенсивности сигнала.

В гелиевой полосе наблюдались изменения параметров поляризации как во времени, так и по частоте. Знак ε не изменялся с частотой, но в интервале от 22:20 до 23:10 UT он различался на станциях «Ловозеро» ($\varepsilon < 0$) и «Новая Жизнь» ($\varepsilon > 0$) (рис. 7 ∂ , e). На рис. 7 δ –e можно видеть довольно резкие изменения угла ψ . Около 22:40 UT на станции «Монды» он увеличивается на $25 \div 30^{\circ}$ (от $55 \div 60^{\circ}$ до $83 \div 85^{\circ}$) и остаётся в этом диапазоне до 23:10 UT, что коррелирует с интервалом сильного увеличения амплитуды пульсаций Pc1 на этой станции. В это же время на станции «Ловозеро» в спектре угла ψ , в дополнение к полосе с $\psi \approx 20 \div 30^{\circ}$, появляется низкочастотная область с $\psi \approx 50 \div 60^{\circ}$, которая к 23:00 UT заполняет всю полосу (при этом ψ возрастает до $70 \div 75^{\circ}$). На станции Новая Жизнь в это время (от 22:40 UT до 23:10 UT) угол ψ уменьшается примерно от 50° до 20 $\div 30^{\circ}$ и можно увидеть появление двух частотных областей с разными углами ψ . После 23:10 UT наблюдается уменьшение азимутального угла на станции «Монды», и к 23:30 UT значения ψ снова составляют около 50°. То же можно сказать о станции «Новая Жизнь». На станции «Ловозеро» после 23:20 UT наблюдались несколько изменений угла ψ в пределах $50 \div 75^{\circ}$.

В интервале времени 00:20÷01:45 UT 06.03.2011 в спектре угла ψ в гелиевой полосе явно выделяются две области, в которых углы отличаются на 60°÷90°, за исключением станции «Ловозеро», где в обеих областях $\psi \approx 70^{\circ}$. В протонной полосе на станции «Новая Жизнь» ψ близок к значениям, которые наблюдаются в части гелиевой полосы с бо́льшими частотами до 01:40 UT (см. рис. 96). В то же время на станции Ловозеро значения ψ в протонной полосе в среднем на $30\div40^{\circ}$ меньше, чем в гелиевой полосе (рис. 96). Такая же разница наблюдается в интервале 07:40÷08:50 UT.

С 01:45 UT до 03:20 UT регистрируется более однородное распределение величин азимутального угла на среднеширотных станциях «Новая Жизнь», «Монды» и «Оулу», т. е. значения угла ψ в пределах полосы изменяются не более, чем на 5°÷10°. На субавроральных станциях «Ловозеро» и «Рованиеми» видны области с $\psi \approx 50^{\circ}\div70^{\circ}$ и $\psi \approx 10^{\circ}\div30^{\circ}$. После 03:00 UT частотная неоднородность параметров поляризации наблюдается на всех станциях. В частности, на станции. «Новая Жизнь» в нижней части гелиевой полосы $\psi \approx 70^{\circ}\div90^{\circ}$, а в верхней — $\psi \approx 10^{\circ}\div40^{\circ}$.

После расщепления гелиевой полосы пульсаций Pc1 на две (в 05:10 UT) параметры поляризации в новых полосах имеют разные значения практически на всех станциях.

В полосе $0,8\div1,3$ Гц на среднеширотной станции «Новая Жизнь» распределения ε и ψ однородны по частоте (рис. 8δ , 9ε), но испытывают значительные временные вариации (рис. 9ε). На станциях финской цепочки и станции «Ловозеро» в этой полосе также наблюдается частотная зависимость величин ψ и ε . Наиболее отчётливо это видно в данных станции «Оулу» (рис. 8d, 9d). После 10:20 UT наблюдается усиление неоднородности частотного распределения поляриза-

ции на финских станциях и станции «Ловозеро». На станции «Новая Жизнь» этот эффект не наблюдается (рис. 86, 96).

Для полосы $0,5\div0,9$ Гц в данных станций «Ловозеро», «Новая Жизнь» и «Монды» начиная с 06:00 UT видна частотная зависимость азимутального угла ψ . Для станций финской цепочки неоднородность распределения величины ψ в нижней полосе снижалась по мере уменьшения геомагнитной широты, и на станции «Оулу» наблюдалось практически полное отсутствие частотной зависимости величины ψ (рис. 9 ∂).

4. ДИНАМИКА ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ И ЕЁ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ ПУЛЬСАЦИЙ Рс1

Динамика протонных высыпаний для нескольких последовательных интервалов времени с 21:00 UT 5 марта до 14:00 UT 6 марта показана на рис. 10, 11 в исправленных геомагнитных координатах. На графиках звёздочками отмечены положения проекций протонных высыпаний первого и третьего типа с высоты спутника на высоту 100 км. Рядом с проекцией высыпания протонов указано время наблюдения. Цветом показана величина потока протонных высыпаний $J_{\rm p}$: бледно синий соответствует $J_{\rm p} < 10^3 \, ({\rm cm}^2 \cdot {\rm cp} \cdot {\rm c})^{-1}$, синий — $J_{\rm p} = 10^3 \div 10^4 \, ({\rm cm}^2 \cdot {\rm cp} \cdot {\rm c})^{-1}$, фиолетовый — $J_{\rm p} > 10^4 \, ({\rm cm}^2 \cdot {\rm cp} \cdot {\rm c})^{-1}$. Чёрными точками изображена сеть наземных магнитных обсерваторий (см. табл. 1). Зелёный и жёлтый прямоугольники отмечают две зоны шириной по 75° долготы. Это соответствует $\Delta {\rm MLT} = 5$ ч или по 2,5 ч МLT к западу и к востоку от станций «Ловозеро» (зелёный цвет) и «Монды» (жёлтый). Область пересечения зон справа ограничена штриховой линией. Покрытие этих зон спутниковыми наблюдениями демонстрируют рис. 10*a*, δ , на которых изображены проекции орбит спутников для интервалов времени 21:00÷24:00 UT и 00:00÷02:30 UT. Подобная картина покрытия спутниковыми наблюдениями имеет место и для других интервалов (на остальных панелях рис. 10, 11 проекции орбит спутников не приведены из-за загруженности этих панелей данными о высыпаниях).

Как следует из рис. 10а, в интервале от 21:00 до 24:00 UT 05.03.2011 были обнаружены только две области локализованных высыпаний энергичных протонов: одна в 21:59 UT с координатами CGMLat = 62,36°, CGMLon = 149,11°, и вторая в 23:32 UT с координатами CGMLat = $= 61,93^{\circ}, CGMLon = 134,62^{\circ}.$ В это время распределение параметров поляризации ψ и ε в частотных полосах пульсаций Рс1 было однородным (см. разд. 3.2). Исключением является интервал $22:30 \div 23:00$ UT, когда спектральное распределение угла ψ в гелиевой полосе на станциях «Новая Жизнь» и «Ловозеро» стало неоднородным, а на станции «Монды» сильно возросла амплитуда пульсаций и увеличились значения ψ . Возможно, это связано с появлением дополнительного источника в интервале 22:40÷23:10 UT в секторе MLT станции «Монды». К сожалению, такой источник не мог быть зафиксирован низкоорбитальными спутниками, т. к. в интервале от 22:00 до 23:00 UT отсутствовали их пролёты на широтах CGLat $\approx 62^{\circ}$ в секторах MLT между станциями «Новая Жизнь» и «Монды» (рис. 10a). В период регистрации одиночных высыпаний 05.03.2011 спектры угла ψ в протонной и гелиевой полосах на станции «Новая Жизнь» имели в основном сходную динамику (рис. 7*в*). На станции «Ловозеро» значения ψ в этих полосах существенно различались (рис. 7*г*). Это различие стало особенно заметным после 23:00 UT, когда высыпания энергичных протонов были обнаружены в секторе MLT данной станции (рис. 10a). Такое поведение эллипса поляризации согласуется с результатами работы [18] о том, что частотный спектр ψ может быть неоднородным на относительно небольших расстояниях от источника. В то же время, разница в поляризации пульсаций Рс1 может быть связана с разными условиями распространения ЭМИЦ волн вдоль геомагнитной силовой линии на частотах выше и ниже экваториальных значений гирочастоты ионов гелия [19].



Рис. 10. Проекции зарегистрированных на спутниках высыпаний протонов (отмечены звёздочками) относительно наземных станций (чёрные точки) в исправленных геомагнитных координатах для последовательных интервалов времени с 21:00 UT 05.03.2011 до 07:30 UT 06.03.2011. Цвет символа обозначает тип высыпаний и диапазон значений потока протонов (см. подписи вверху рисунка). На панелях *a* и *б* показаны также проекции орбит спутников. Зелёный и жёлтый прямоугольники отмечают две зоны шириной по 75° долготы или по 2,5 ч МLT к западу и к востоку от станций «Ловозеро» (зелёный цвет) и «Монды» (жёлтый цвет)

В начале суток 06.03.2011 число зарегистрированных событий высыпания протонов растёт по сравнению с предыдущим интервалом. В интервале 00:00÷02:30 UT зарегистрировано уже 5 высыпаний первого типа (рис. 106), а в интервале 02:30÷05:00 UT их число увеличилось до 7 (рис. 106). Интенсивность высыпаний также возросла на 1÷3 порядка до 10⁵ (см²·ср·с)⁻¹, что коррелирует с увеличением интенсивности пульсаций на всех станциях. Бо́льшая часть самых интенсивных источников в интервале 00:00÷05:00 UT была зарегистрирована западнее станций «Новая Жизнь» и «Ловозеро», а в отдельные отрезки времени даже западнее станций финской цепочки.

Е. Н. Ермакова, А. Г. Демехов, Т. А. Яхнина и др.

16



Как видно из рис. 10*б*, *в*, в интервале $00:00\div05:00$ UT все источники первого типа регистрируются в ограниченном диапазоне широт CGMLat = $61^{\circ}\div63^{\circ}$. При этом диапазон долгот CGMLon регистрируемых высыпаний существенно увеличивается от примерно 60° в интервале $00:00\div02:30$ UT (зелёная зона на рис. 10*б*) до 110° в интервале $02:30\div05:00$ UT (рис. 10*в*).

Периоды уширения гелиевой полосы на всех станциях (рис. 1) коррелируют с увеличением числа зарегистрированных высыпаний (рис. 106, e). Уширение спектральной полосы пульсаций Pc1 на станции «Монды» менее заметно. Это можно объяснить сильным затуханием сигнала от наиболее удалённых источников (самых западных источников в зоне станции «Ловозеро») и соответственно уменьшением числа источников, вносящих заметный вклад в формирование гелиевой полосы на этой станции (рис. 1a, 106, e). В интервале $02:00\div03:00$ UT на станции «Монды» наблюдается резкое падение интенсивности пульсаций практически до полного их исчезновения. В этом интервале высыпания регистрировались в узком диапазоне долгот западнее финской цепочки (85°). После 03:00 UT на всех станциях наблюдается самое заметное уширение частотной полосы пульсаций Pc1. Оно коррелирует с увеличением числа зарегистрированных высыпаний и диапазона их долгот (рис. 1, 10e).

С увеличением числа источников 06.03.2011, расположенных в разных долготных секторах и/или на разных широтах, коррелирует и появление частотной зависимости параметров поляризации ε и ψ в гелиевой полосе (рис. 8, 9). Так, в период 00:20÷01:40 UT, когда источники первого типа регистрируются в интервале MLT порядка 2 ч, чётко выделяются две области значений ψ . Область с меньшей частотой, очевидно, соответствует области высыпаний на более высоких широтах, зарегистрированной на западе (CGMLon $\approx 80^{\circ}$, см. рис. 106 и рис. 36). Связь сигнала в нижней части гелиевой полосы в этот период именно с западным источником подтверждается и тем, что в этой части спектра сигнал на станции «Монды» сильно ослаблен (рис. 1*a*) из-за большого расстояния до этой станции.

На станции «Новая Жизнь» более однородное распределение поляризации ($\psi \approx 55^{\circ} \div 65^{\circ}, \varepsilon \approx$ $\approx -(0,1\div 0,2))$ наблюдается и в протонной полосе (рис. 86, 96). Этот факт, а также отсутствие в этой полосе в начале суток 06.03.2011 уширения (рис. 16, 6) и резкого роста амплитуды пульсаций (рис. 6a, δ) подтверждает неравноценный вклад источников в разных секторах MLT в формирование этой полосы. В период $00:20\div01:40$ UT угол ψ принимает близкие значения в протонной полосе и в верхней части гелиевой полосы. Исходя из сказанного выше, это может свидетельствовать об определяющем вкладе именно восточных источников в генерацию протонной полосы. Для этого интервала на высокоширотной станции «Ловозеро» значения ψ в протонной полосе не совпадали со значениями ψ во всей ширине гелиевой полосы, которая генерировалась как западными, так и восточными источниками (рис. 96). При наличии множественных источников это может быть связано с их разным вкладом в генерацию верхней полосы (как и для станции «Новая Жизнь»). При наличии источников, вносящих вклад в генерацию обеих полос, эта разница может быть вызвана различной поляризацией магнитного поля в области инжекции волн в ионосферу, обусловленной разными условиями распространения ЭМИЦ волн на частотах гелиевой и протонной полос вдоль магнитных силовых линий [19, 20]. Эта разница может наиболее ярко проявиться на ближних к месту выхода волн в ионосферу станциях. Для дальних станций распространение в магнитогидродинамическом волноводе, для которого основной является ТЕ-мода, может существенно нивелировать эту разницу.

В интервале $01:30\div02:15$ UT также зарегистрированы источники на разных долготах и широтах, но восточнее станции «Новая Жизнь» область высыпаний смещается к северу, а западнее к югу (рис. 3, 10б). При этом на среднеширотных станциях наблюдается более однородное распределение в спектре ψ (рис. 9 *a*, *б*), на станции «Новая Жизнь» преобладают синий и голубой цвета, соответствующие направлению на западные источники. Отсутствие в это время красного цвета, соответствующего восточному источнику, можно объяснить смещением его частоты вниз и соответственно перекрытием полос западного и восточного источника, а также меньшей амплитудой пульсаций от последнего из-за более сильного затухания сигнала на трассе до станции «Новая Жизнь».

В интервале 02:20÷03:20 UT, когда высыпания регистрируются в узком секторе MLT западнее финской цепочки (диапазон долготы CGMLon около 10°, см. рис. 10*б*, *в*, 3*a*), на среднеширотных станциях наблюдается однородное частотное распределение ψ (рис. 9*a*, *б*). В то же время на авроральных станциях параметры поляризации зависят от частоты (рис. 9*b*, *c*). В согласии с результатами работы [17], это можно связать с близким расположением авроральных станций к проекции высыпаний на Землю (рис. 10*б*, *b*).

После 03:20 UT, когда источники первого типа регистрируются в широком интервале геомагнитных долгот в зонах станций «Ловозеро» и «Монды» (см. рис. 10 ϵ), снова имеет место ярко выраженная частотная зависимость параметров поляризации на среднеширотных станциях. При этом наблюдается уже более двух частотных областей с разными значениями ψ . Небольшие различия в геомагнитных широтах зарегистрированных высыпаний позволяют связать частотные

области пульсаций Pc1 с определёнными источниками. Например, на станции «Новая Жизнь» после 03:20 U в гелиевой полосе пульсаций Pc1 чётко видны две области значений ψ : в этом случае источникам западнее финской цепочки, которые регистрировались на более низких геомагнитных широтах, соответствует область с большими частотами и меньшими значениями ψ , а за область с меньшими частотами и бо́льшими ψ ответственны источники в зоне станции «Монды» (рис. 3, 96, 106).

В интервале $05:00\div07:30$ UT долготный диапазон протонных высыпаний составил около 90° (CGMLon), а в следующем интервале $07:30\div09:00$ UT — 50° . При этом широтный диапазон высыпаний увеличился. В интервале $05:00\div07:30$ UT высыпания наблюдались на широтах CGMLat = $61,5^{\circ}\div64,0^{\circ}$, а в интервале $07:30\div09:00$ UT — на широтах CGMLat = $61,0^{\circ}\div66,5^{\circ}$. В интервале $09:00\div11:30$ UT высыпания протонов вновь наблюдались в узком диапазоне широт CGMLat = $62^{\circ}\div63^{\circ}$.

Увеличение разброса в геомагнитных широтах высыпаний до $2.5^{\circ} \div 3.0^{\circ}$ и появление более высокоширотных высыпаний с CGLat $\approx 63.5^{\circ}$ после 05:00 UT привело к расщеплению гелиевой полосы и появлению пульсаций Рс1 на более низкой частоте (рис. 1). Как видно из рис. 11, высыпания первого типа на более высоких широтах наблюдаются как в зоне станции «Ловозеро», так и в зоне станции «Монды», а источники на низких широтах зарегистрированы только западнее финской сети. С этим согласуется тот факт, что полоса пульсаций Pc1 0,4÷0,9 Гц наблюдается на всех станциях, в то время как полоса с бо́льшими частотами не регистрируется на станции «Монды». В интервале 06:10 UT ÷07:10 UT пульсации в верхней полосе 1,2 Гц отсутствуют на всех станциях. Высыпания на низких широтах не регистрировались с 05:53 до 08:24 UT, т. е. более длительное время, чем отсутствует регистрация пульсаций в верхней полосе. По-видимому, это означает, что не все высыпания первого типа на низких широтах были зарегистрированы спутниками в этом интервале времени. Геомагнитные широты полярных высыпаний увеличились после 07:00 UT (рис. 10г, 11а). Эти источники наблюдаются в довольно широком диапазоне широт (CGMLat $\approx 61,22^{\circ} \div 66,55^{\circ}$) и поэтому также могли образовать несколько частотных полос в пульсациях. Это особенно отчётливо видно на спектрограммах станций «Ловозеро» и «Новая Жизнь» в 07:20÷08:30 UT в нижней полосе (рис. 1).

После 09:00 UT геомагнитные широты регистрируемых высыпаний первого типа лежат в диапазоне широт CGMLat = $62^{\circ} \div 63^{\circ}$. В это время высыпания на высоких широтах (CGMLat > 63°) не зарегистрированы в зонах, примыкающих к наземным станциям, чем и объясняется исчезновение в этом интервале полосы с более низкими частотами (рис. 116).

После 11:30 UT широта высыпаний первого типа CGMLat варьируется в диапазоне 63°÷66°. Проекции высыпаний находятся западнее всех наземных станций (рис. 11*в*). Поэтому сигнал не доходит до самой восточной станции «Монды», и пульсации на частотах 0,6÷1,5 Гц там не наблюдаются. На всех остальных станциях регистрируются несколько полос в пульсациях. Повидимому, число полос связано с увеличением диапазона широт источников.

Разница в динамике спектров поляризации пульсаций Pc1 в разных полосах после расщепления гелиевой полосы пульсаций Pc1 на две (рис. 8, 9) связана с разным положением источников, ответственных за генерацию этих полос. Так, например, на станции «Новая Жизнь» сразу после расщепления в верхней полосе $(0,7\div1,2\ \Gamma \mu)$, за которую ответственны источники, расположенные западнее финской цепочки, $\psi \approx 15^{\circ} \div 20^{\circ}$, а для нижней полосы $\psi \approx 40^{\circ} \div 55^{\circ}$ (рис. 96). Это связано с тем, что за нижнюю полосу ответственны источники, расположенные в секторе MLT станции «Новая Жизнь», а за верхнюю — источники, находящиеся западнее финской цепочки (рис. 3*a*, 11*a*). Углы между направлением на эти источники для станции «Новая Жизнь» и направлением восток—запад различаются. Вследствие зависимости ориентации вектора магнитного поля на частотах пульсациё Pc1 от направления на источник [13] это может приводить к разнице в зна-

чениях угла ψ в расщеплённых полосах. Однородное распределение значений ψ в верхней полосе на станции «Новая Жизнь» связано с малым диапазоном геомагнитных долгот соответствующих источников (рис. 11*a*). На станциях финской цепочки неоднородное распределение наиболее ярко выражено в период 08:00÷09:00 UT и связано с близким расположением к месту выхода ЭМИЦ волн в ионосферу (рис. 9*г*, *д*, 11*a*). После 10:30 UT увеличился (до 25°) разброс в долготах высыпаний первого типа на более низких широтах (рис. 11*b*). Это привело к усилению неоднородного распределения поляризации по частоте на финских станциях и станции «Ловозеро» (рис. 9*6*–*д*). Для более удалённой от источников станции «Новая Жизнь» наблюдаемое увеличение разброса высыпаний по долготе не привело к частотной зависимости поляризации (рис. 9*b*). Надо учесть, что распространение пульсаций Pc1 в этом случае происходило в дневных условиях. Поэтому вклад более слабых источников (рис. 9*e*, 11*b*) мог быть мал из-за затухания в магнитогидродинамическом волноводе, что сузило долготный сектор источников, ответственных за генерацию верхней полосы на этой станции.

Источники, ответственные за генерацию нижней полосы $(0,5\div0,9\ \Gamma u)$, наблюдались в секторах MLT с протяжённостью более $2,5\div3,0$ ч (рис. 3a, 11a). Больша́я долготная протяжённость этих источников определила частотную зависимость ψ и ε на временно́м интервале $05:50\div08:40$ UT на станциях «Ловозеро» и «Новая Жизнь». Зависимость степени неоднородности распределения в спектре ψ от геомагнитной широты финских станций и станции «Ловозеро», по-видимому, объяснялась уменьшением числа источников, ответственных за генерацию низкочастотной полосы, с уменьшением широты CGMLat по мере удаления станций от места выхода волн в ионосферу.

Таким образом, степень частотной зависимости параметров поляризации в полосах пульсаций Pc1 зависела от протяжённости сектора MLT соответствующих источников и от удалённости станций от проекции области высыпаний на Землю.

В период 07:40÷08:50 UT наблюдалась разница в значениях ψ в протонной и гелиевой полосах на станции «Ловозеро». В это время станция находилась в непосредственной близости от места инжекции волн в ионосферу (рис. 11*a*), и, в соответствии со сказанным выше, разница в поляризациях магнитного поля на частотах разных полос могла быть существенной.

Таким образом, вариации спектра пульсаций Pc1 в диапазоне $0,5\div1,2$ Гц вполне объясняются динамикой источников на широтах CGMLat = $60^{\circ}\div67^{\circ}$.

Высыпания третьего типа зарегистрированы в интервале $03:30\div08:40$ UT и после 10:00 UT. В начале они наблюдались, в основном, в секторе станции «Монды», а после 10:00 UT — вблизи сектора MLT финских станций (рис. 3a, 11). Поскольку эти источники находятся на высоких широтах, они, скорее всего, не вносят вклад в описанные выше пульсации Pc1 на частотах $0,5\div1,2$ Гц. Действительно, максимальная частота ЭМИЦ волн в дневном секторе обычно меньше $0,5f_{H+}$ [21], при этом экваториальная протонная гирочастота на широтах больше 70° обычно не превышает 1 Гц. Возможно, эти источники ответственны за слабый сигнал на частоте около 0,5 Гц, который виден примерно с 04:00 UT до 08:00 UT и на частоте $0,3\div0,4$ Гц после 10:00 UT. Этот сигнал прерывается в интервале $08:00\div10:00$ UT, что соответствует исчезновению высыпаний третьего типа в то же время. Частота 0,5 Гц превышает экваториальную гирочастоту ионов гелия. Это согласуется с наличием на дневной стороне за плазмопаузой зоны повышенной поперечной анизотропии горячих протонов, обусловленной эффектом расщепления дрейфовых оболочек [22], при наличии которой можно ожидать генерацию ЭМИЦ волн в водородной полосе [23].

Следует подчеркнуть связь рассмотренных выше высыпаний протонов первого типа с плазмопаузой. На рис. 12 в координатах *L*-MLT такими же маркерами, как на рис. 10, 11, показаны проекции областей этих высыпаний на экваториальную плоскость магнитосферы для шести интервалов времени. Там же приведено положение плазмопаузы, рассчитанное с помощью динамической модели, основанной на механизме перестановочной неустойчивости [24], и проекции



Рис. 12. Положение проекций на экваториальную плоскость магнитосферы высыпаний протонов первого типа (звёздочки) для шести интервалов времени 05–06.03.2011 вместе с проекциями наземных станций «Ловозеро», «Новая жизнь» и «Монды» и положением модельной плазмопаузы. Интенсивность потока протонов обозначена цветом так же, как на рис. 10. Над каждой панелью рисунка указан интервал времени, для которого построены проекции высыпаний. Момент времени, для которого построена плазмопауза и проекции станций, указан на каждой панели слева вверху

Е. Н. Ермакова, А. Г. Демехов, Т. А. Яхнина и др.

21

наземных станций «Ловозеро», «Новая Жизнь» и «Монды» на экваториальную плоскость. Как и на рис. 10, 11, зелёным (жёлтым) цветом отмечен сектор ±2,5 ч МLТ относительно станции «Ловозеро» («Монды»). Момент времени, для которого построено положение плазмопаузы и проекций наземных станций, указан на каждой панели слева вверху. Видно, что источники высыпаний действительно располагаются в основном вдоль плазмопаузы, а область высыпаний смещается из утреннего сектора в дневной и послеполуденный сектор в среднем со скоростью вращения Земли, т. е. вместе с наземными станциями и неоднородностями в плазмопаузе. Совместное движение наземной станции и источников ЭМИЦ волн объясняет большую длительность наблюдения одних и тех же полос в пульсациях Pc1 на земной поверхности.

5. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из экспериментальных данных, амплитудные и поляризационные спектры пульсаций Pc1 претерпевали значительные изменения на протяжении изучаемого интервала времени. Вместе с тем, заметно изменялось число и положение областей высыпаний энергичных протонов, маркирующих области генерации ионно-циклотронных волн в магнитосфере.

5.1. Результаты расчётов циклотронного усиления ЭМИЦ волн в магнитосфере

Для объяснения описанных выше особенностей амплитудных спектров пульсаций Pc1 были выполнены численные расчёты однопроходового усиления Г для различных параметров магнитосферной плазмы при наличии ионов гелия. Аналогично работе [25], коэффициент усиления вычислялся для продольно распространяющихся волн в предположении, что их дисперсионные свойства определяются холодной плазмой, а энергичные частицы дают вклад только в антиэрмитову часть тензора диэлектрической проницаемости. Исходные формулы приведены, например, в работе [19]. Распределение энергичных протонов по скоростям выбиралось в виде двухтемпературной максвелловской функции с поперечной и продольной температурой T_{\perp} и T_{\parallel} соответственно. Величина усиления Г вычислялась интегрированием коэффициента усиления вдоль геомагнитного поля. Расчёты проводились для L = 5, что соответствует среднему положению областей высыпаний первого типа в рассматриваемом событии. Варьировались концентрация холодной плазмы N_c , показатель анизотропии $A = T_{\perp}/T_{\parallel} - 1$ и энергия протонов кольцевого тока $W_{\rm p} = T_{\perp} + T_{\parallel}/2$.

На рис. 13*а*, б приведены зависимости $\Gamma(f)$ для энергии горячих протонов $W_{\rm p} = 20$ кэВ, на рис. 13*в*, *s* – для $W_{\rm p} = 50$ кэВ. Они демонстрируют условия, при которых в спектре ЭМИЦ волн, генерируемых в магнитосфере, может преобладать протонная полоса. Только в таких условиях, очевидно, возможна ситуация, когда только эта полоса регистрируется на Земле или пульсации в этой полосе имеют бо́льшую амплитуду, чем на частотах ниже $f_{\rm He^+}$. Действительно, при распространении вдоль геомагнитных силовых линий циклотронные волны протонной полосы испытывают частичное поглощение и отражение в области гирорезонанса ионов He+, поэтому волны с меньшей частотой (волны гелиевой полосы) имеют более благоприятные условия распространения к земной поверхности. Как видно из рис. 13, при $N_{\rm c} = 100$ см⁻³ величины Γ для частот выше и ниже $f_{\rm He^+}$ отличаются незначительно (не более чем на 20%), но уменьшение концентрации плазмы приводит к сильному сужению гелиевой полосы и падению величины Γ . В то же время, выше частоты $f_{\rm He^+}$ максимум Γ меняется мало, но соответствующая ему частота увеличивается. Различие между полосами особенно велико при $N_{\rm c} = 5\div10$ см⁻³, но частота протонной полосы повышается до 2,5 Γ ц в случае $W_{\rm p} = 20$ кэВ, что заметно больше наблюдаемого значения 1,5÷1,7 Γ ц. Повышение частоты меньше при более высокой энергии протонов, но при этом эффект преобла-



Рис. 13. Однопроходовый коэффициент усиления ионно-циклотронных волн для различных параметров холодной плазмы и энергичных протонов. Состав холодной плазмы: 90 % протонов и 10 % ионов He+, интегральный поток энергичных протонов $S = 3 \cdot 10^7$ см⁻² с⁻¹, A = 2,5 (a, e); 4 (b, e), $W_{\rm p} = 20$ кэВ (a, b); 50 кэВ (e, e), значения концентраций холодной плазмы указаны на рисунке

дания протонной полосы наступает при меньших концентрациях плазмы. Суммируя результаты, представленные на рис. 13, наблюдаемое 05.03.2011 доминирование протонной полосы в спектре Pc1 на Земле можно объяснить достаточно низкой концентрацией плазмы ($N_c \approx 20 \div 30 \text{ см}^{-3}$), небольшими энергиями ($W_p \approx 20 \text{ кэB}$) и высокой анизотропией (A > 3) энергичных протонов. Аналогичная особенность в спектре многополосных геомагнитных пульсаций уже наблюдалась при исследовании высокочастотных пульсаций Pc1 [25]. Далее, около 22:00 UT 05.03.2011 в спектре пульсаций Pc1 появились две полосы, причём ширина гелиевой полосы была примерно в два раза меньше, чем ширина протонной. Поскольку интенсивность протонной полосы практически во всё время её регистрации 05.03.2011 оставалась сравнимой с интенсивностью гелиевой полосы, можно предполагать, что показатель анизотропии A оставался достаточно высоким. Появление и усиление гелиевой полосы могло быть связано с расширением плазмосферы на восстановительной стадии магнитной бури, т. е. с увеличением концентрации фоновой плазмы в области протонного кольцевого тока. В дальнейшем (начиная с 02:00 UT 06.03.2011) интенсивность протонной полосы уменьшалась. Можно предположить, что в это время снижался показатель анизотропии A.

Сильная зависимость положения максимума $\Gamma(f)$ от концентрации плазмы позволяет в принципе связать отмеченное в разделах 2.2, 2.4 уширение спектра пульсаций с увеличением долготно-

го разброса областей ионно-циклотронной неустойчивости при сохранении небольшого интервала их широт. Важным моментом здесь является близость наблюдаемых областей высыпаний к азимутально неоднородной плазмопаузе, за счёт чего значительный разброс значений концентрации, приводящий к уширению полос неустойчивости, возможен и в достаточно узком интервале широт.

5.2. Связь между параметрами поляризации и направлением на источник

Характер динамики поляризационных спектров пульсаций Pc1 в анализируемом событии 05-06.03.2011, когда число зарегистрированных локализованных высыпаний энергичных протонов менялось от одиночных до множественных, объясняется сильной зависимостью параметров поляризации пульсаций Pc1 при их наземной регистрации от направления на источник и от расстояния до него (см. ссылки в разд. 3.2 и результаты разд. 4). При наличии многих источников, расположенных в разных секторах MLT и на несколько различающихся широтах, волны, пришедшие в точку приёма по разным трассам, будут иметь различные значения параметров ε и ψ даже на больших расстояниях от источников, что может вызвать частотную зависимость этих параметров. Это наиболее отчётливо наблюдается 06.03.2011. Авторы статьи [26] зарегистрировали частотную зависимость поляризации в полосе Pc1 на низких широтах ($L = 1, 2 \div 2, 1$). По их мнению, причиной такой зависимости могли стать разные условия распространения волн в ионосферном волноводе для различных частот. Данная гипотеза требует проверки, основанной на одновременном анализе спектров поляризации на низких и высоких широтах. Что касается анализируемого в данной работе события, то связь наблюдаемой частотной зависимости параметров поляризации именно с множественными источниками в разных долготных секторах подтверждается тем фактом, что наиболее ярко частотная зависимость поляризации проявлялась при большом долготном разбросе источников. Также существенную роль могла играть близость положения наземных станций к месту выхода волн в ионосферу, когда наличие источников даже с небольшой разницей в геомагнитных координатах могло приводить к частотной зависимости параметров ε и ψ .

Проанализируем по нашим данным связь между направлением на источник пульсаций Pc1 и величиной ψ на разных наземных станциях. Для тех источников, для которых был найден азимутальный угол, определим угол ψ_S между направлением на магнитный полюс и направлением на источник и угол ψ_M между направлением на магнитный полюс и направлением главной оси эллипса поляризации в соответствующей источнику части спектра. Отсюда найдём угол ψ_{SM} между направлениями на источник и осью эллипса поляризации (рис. 14). Как видно из рис. 14, для среднеширотных станций наблюдается корреляция в изменениях величин ψ_S и ψ_M . Разница в этих углах в среднем составляет около 10° и не превышает 18°. Поэтому, на наш взгляд, можно связать изменение азимутального угла на станции «Монды» на 25°÷30° в период с 22:40 до 23:10 UT 05.03.2011 с появлением дополнительного источника в долготном секторе станции «Монды», который не мог быть зарегистрирован спутниками NOAA (разд. 4). Отличие долготы этого вероятного источника на 15°÷17° от источника, зарегистрированного спутниками на долготе CGMLon $\approx 150^\circ$, может привести к изменению направления на источник на $20^\circ\div25^\circ$.

Для высокоширотных станций отсутствовала корреляция в изменениях углов $\psi_{\rm S}$ и $\psi_{\rm M}$ (рис. 14*6*, *г*), а угол между направлением на источник и ориентацией эллипса поляризации колебался от 0° до 60°. Малые изменения направления на источник приводили к значительным изменениям ориентации вектора магнитного поля в частотной полосе пульсаций Pc1. Это связано с уменьшением в отдельные периоды расстояния от этих станций до места выхода волн в ионосферу (до значений 300÷400 км, сравнимых с размерами области источника в ионосфере), что согласуется с результатами работы [16]. Но и на больши́х расстояниях до источника на



Рис. 14. Углы, характеризующие направление на источники и ориентацию магнитного поля в гелиевой полосе пульсаций Рс1 на станциях «Новая Жизнь» (*a*), «Монды» (*б*), «Оулу» (*b*) и «Ловозеро» (*c*). По горизонтальной оси отложены условные номера временны́х интервалов, для которых были определены углы. Эти интервалы могли не совпадать для различных станций

высокоширотных станциях главная ось эллипса поляризации в анализируемом событии могла составлять большие углы с направлением на источник. Возможно, что это связано с особенностями распространения сигналов Pc1 под большими углами к магнитному меридиану. Данный вопрос требует отдельного исследования.

6. ВЫВОДЫ

В работе проанализированы особенности амплитудных и поляризационных спектров интенсивных пульсаций типа Pc1 на наземных станциях, разнесённых на больши́е расстояния, и данных низкоорбитальных спутников NOAA по регистрации высыпаний энергичных протонов во время события 05–06.03.2011. Данное событие отличалось большой продолжительностью (около 16 ч), наличием нескольких полос с изменяющимися во времени частотами, расщеплением этих полос на более узкие полосы, значительными изменениями амплитуды и поляризации наземных сигналов и их наблюдением в широком интервале широт и долгот. Проведённый анализ позволил сделать следующие основные выводы.

Зарегистрировано нетипичное соотношение амплитуд пульсаций Pc1 на частотах ниже и выше экваториального значения гирочастоты ионов He+ (в гелиевой и протонной полосах): амплитуда пульсаций в протонной полосе была существенно выше, а затем сравнима с амплитудой в гелиевой полосе. Насколько известно авторам, такая особенность спектра Pc1 в наземных данных в литературе не отмечалась. Сравнительный анализ результатов расчётов однопроходового уси-

ления ЭМИЦ волн и экспериментальных данных показал, что преобладание протонной полосы в пульсациях Pc1 может быть связано с высокой анизотропией питч-углового распределения энергичных протонов при низких значениях концентрации заряженных частиц холодной плазмы и энергии горячих протонов в области генерации волн.

Показано, что наблюдаемые вариации амплитудного спектра пульсаций Pc1 в диапазоне 0,5÷ ÷1,2 Гц объясняются динамикой положений зарегистрированных локализованных высыпаний энергичных протонов.

Вариации частоты пульсаций Pc1 связаны с изменениями широты высыпаний, а ширина гелиевой полосы Pc1 может определяться как различиями широт наблюдения множественных высыпаний, так и их локализацией по долготе. Последнее подтверждается результатами расчётов однопроходового усиления, согласно которым вклад источников на близких геомагнитных широтах, но в разных секторах MLT с различными значениями параметров магнитосферной плазмы (например, концентрации), может приводить к значительному уширению частотных полос в спектре Pc1.

Наблюдаемое расщепление гелиевой полосы после 05:00 UT 06.03.2011 связано с увеличением диапазона геомагнитных широт высыпаний энергичных протонов до $2,5^{\circ} \div 3,0^{\circ}$. Разное соотношение амплитуд пульсаций в новых полосах на разных станциях согласуется с различными долготными положениями источников пульсаций в этих полосах: за полосу $0,4\div 0,9$ Гц ответственны источники как в зоне станции «Ловозеро», так и в зоне станции «Монды», за полосу $0,8\div 1,2$ Гц источники на более низких широтах западнее финской сети.

Положения областей высыпаний хорошо соответствуют модельному положению плазмопаузы, а сама область высыпаний смещается из утреннего сектора в дневной и послеполуденный сектор в среднем со скоростью вращения Земли, т.е. вместе с наземными станциями и неоднородностями на плазмопаузе. Совместное движение наземной станции и источников ЭМИЦ волн объясняет большую длительность наблюдения одних и тех же частотных полос Pc1 на земной поверхности.

Резкий рост амплитуды пульсаций Pc1 на станции «Монды», сопровождаемый изменением ориентации эллипса поляризации, позволил предположить существование дополнительного источника пульсаций Pc1 в долготном секторе этой станции, не зарегистрированного спутниками NOAA. Это предположение подтверждается появлением неоднородности в частотном спектре азимутального угла на станциях «Новая Жизнь» и «Ловозеро». Таким образом продемонстрирована важность сравнительного анализа динамики амплитудных и поляризационных спектров на нескольких станциях, разнесённых по широте и долготе.

На всех станциях частотное распределение поляризации пульсаций Pc1 становилось неоднородным при увеличении долготного диапазона зарегистрированных спутниками высыпаний. На станциях, расположенных близко к области выхода волн в ионосферу (на расстояниях меньше 300÷400 км), частотная зависимость поляризации наблюдалась и при незначительном разбросе в геомагнитных долготах высыпаний. Однородное распределение поляризации в протонной полосе как по частоте, так и по времени, а также отсутствие уширения этой полосы при увеличении диапазона долгот высыпаний может указывать на расположение источников, ответственных за генерацию этих пульсаций, в более узком долготном секторе.

Ориентация эллипса поляризации в протонной и гелиевой полосах пульсаций Pc1 может быть различной как при наличии множественных источников, так и при одиночных источниках. В первом случае разные значения угла ψ в разных полосах, возможно, связаны с различным вкладом источников в генерацию верхней полосы. Во втором случае несовпадение значений ψ в разных полосах может быть обусловлено различными условиями распространения ЭМИЦ волн вдоль магнитных силовых линий, что должно быть особенно заметно на ближних к месту выхода ЭМИЦ волн станциях.

Проанализирована возможность определения положения источника пульсаций Pc1 по ориентации эллипса поляризации в гелиевой полосе на разных наземных обсерваториях. Установлена корреляция между изменениями направления на вероятный источник, определённый по высыпаниям энергичных протонов, и ориентации эллипса поляризации магнитного поля пульсаций Pc1 для среднеширотных станций. Угол между направлением на вероятный источник и большой осью эллипса поляризации составлял в среднем около $10^{\circ} \div 12^{\circ}$. Для субавроральных станций «Ловозеро» и «Оулу» корреляция между этими направлениями отсутствовала: малые изменения направления на предполагаемый источник могли приводить к больши́м (до 60°) изменениям ориентации эллипса поляризации. Причиной этого могли быть как малые расстояния от станций до проекции высыпаний на Землю, так и особенности распространения волн под больши́ми углами к геомагнитному меридиану. Требуются дополнительные исследования данного вопроса с привлечением данных по регистрации различных событий Pc1 на станциях разных широт и спутниковых данных о высыпаниях энергичных протонов и об ЭМИЦ волнах в магнитосфере.

Авторы благодарят сотрудников обсерваторий «Ловозеро» (ПГИ), «Новая Жизнь» (НИР-ФИ ННГУ), «Монды» (ИСЗФ СО РАН) и геофизической обсерватории Соданкюля за предоставление данных индукционных магнитометров. Анализ данных финских обсерваторий частично поддержан Академией наук Финляндии (грант 315716 «Origin and ground-spacecraft correlations of unusual VLF emissions»). Данные обсерватории «Монды» получены с использованием оборудования магнитометрического комплекса ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН). Авторы благодарят NOAA за свободный доступ к данным спутников NOAA и MetOp на сайте https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/dataaccess.html и выражают признательность Вивиан Пьеррар (Viviane Pierrard) за возможность использования модели плазмопаузы на сайте http://www.spaceweather.eu. Работа Е. Н. Ермаковой по анализу пульсаций Рс1 поддержана РФФИ (гранты 18–42–520035-р_поволжье_а, 18–05–00108-а), работа Т. А. Яхниной выполнена в рамках госзадания АААА-А18-118012490100-7. Работа А. Г. Демехова по расчётам инкремента циклотронной неустойчивости и работа А. Г. Яхнина по анализу данных спутников NOAA поддержана Российским научным фондом (грант 15–12–20005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. // Space Sci. Rev. 1998. V. 83. P. 435.
- 2. Yahnin A. G., Yahnina T. A. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 1690.
- Engebretson M. J., Posch J. L., Wygant J. R., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120, No. 7. P. 5465.
- 4. Яхнин А. Г., Яхнина Т. А., Демехов А. Г. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 3. С. 315.
- 5. Sergeev V. A., Sazhina E. M., Tsyganenko N. A., et al. // Planetary Space Sci. 1983. V. 31. P. 1147.
- 6. Yahnina T. A., Yahnin A. G., Kangas J., et al. // Annales Geophysicae. 2003. V. 21, No. 12. P. 2 281.
- 7. Яхнина Т. А., Яхнин А. Г. // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 1. С. 82.
- 8. Yahnin A. G., Yahnina T. A., Frey H., Pierrard V. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2013. V. 99. P. 61.
- 9. Yahnin A. G., Yahnina T. A., Frey H. U. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, No. A10. Art. no. A10223.
- 10. Spasojevic M., Fuselier S. A. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. A12. Art. no. A12201.
- 11. Яхнин А. Г., Яхнина Т. А., Фрей Х. У. // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4. С. 344.
- Hansen H. J., Fraser B. J., Menk F. W., Erlandson R. E. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, No. A5. P. 7971.
- 13. Woodroffe J. R., Lysak R. L. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, No. A3. Art. no. A03223.

- 14. Greifinger C., Greifinger P. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, No. 22. P. 4611.
- 15. Fujita S., Tamao T. // J. Geophys. Res. 1988. V. 93, No. A12. P. 14665.
- Nomura R., Shiokawa K., Sakaguchi K., et al. // J. Geophys. Res. 2012. V.117, No. A2. Art. no. A02318.
- Kim H., Lessard M. R., Engebretson M. J., Young M. A. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, No. A7. Art. no. A07227.
- Kim H., Lessard M. R., Engebretson M. J., Lühr H. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, No. A9. Art. no. A09310.
- Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альфвеновские мазеры. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 190 с.
- 20. Johnson J. R., Cheng C. Z. // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26, No. 6. P. 671.
- 21. Min K., Lee J., Keika K., Li W. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, No. A5. Art. no. A05219.
- 22. Wang C. P., Zaharia S. G., Lyons L. R., Angelopoulos V. // J. Geophys. Res. 2012. V. 118. P. 244.
- 23. Chen L., Thorne R. M., Horne R. B. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. A7. Art. no. A07221.
- 24. Лемэр Ж. Ф., Пьеррар В. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 5. С. 579.
- 25. Ермакова Е. Н., Яхнин А. Г., Яхнина Т. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 8. С. 607.
- Nomura R., Shiokawa K., Pilipenko V., Shevtsov B. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, No. A1. Art. no. A01204.

Поступила в редакцию 8 октября 2018 г.; принята в печать 11 января 2019 г.

DYNAMICS OF THE SPECTRA OF MULTIBAND Pc1 PULSATIONS IN THE PRESENCE OF MULTIPLE REGIONS OF ION-CYCLOTRON INSTABILITY IN THE MAGNETOSPHERE

E. N. Ermakova, A. G. Demekhov, T. A. Yahnina, A. G. Yahnin, D. S. Kotik and T. Raita

We study the dynamics of the spectra of multiband sporadic magnetic pulsations in the Pc1 range (0.2–5.0 Hz) during the event of 5–6 March 2011 by using ground-based magnetic measurements at stations largely spaced from each other in latitude and longitude. The event is characterized by a long duration (about 16 h), the presence of several bands with varying frequencies, splitting of these bands into narrower subbands, significant variations in the amplitude and polarization of the signals on the ground, and their observation in a wide range of latitudes and longitudes. On the basis of a joint analysis of the Pc1 pulsation properties and the data of low-orbiting spacecraft detecting localized precipitations of energetic protons into the ionosphere, we infer the possible generation regions of these waves in the magnetosphere and conclude that they are multilpe. The results of analysis allowed us to determine the mechanisms of broadening and splitting of Pc1 frequency bands even in the absence of direct wave observations in the magnetosphere. We also propose an explanation of the atypical (for ground-based detection) type of two-band Pc1 spectra when the signal at frequencies above the helium ion gyrofrequency has a higher amplitude than at lower frequencies. We also explain the inhomogeneous frequency profile of polarization in different frequency bands. Possible variations in the magnetospheric plasma parameters that resulted in the observed dynamics of amplitude and polarization spectra of Pc1 pulsations are revealed by using calculations of the wave cyclotron amplification by energetic protons in the magnetosphere.