

УДК 550.385

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ *Pc1* КАК КОСВЕННЫЙ ИНДИКАТОР ПОЛОЖЕНИЯ ИХ ИСТОЧНИКА

© 2022 г. Ф. З. Фейгин^{1, *}, Н. Г. Клейменова^{1, 2, **}, Л. М. Малышева¹, Ю. Г. Хабазин¹, Л. И. Громова³, Т. Райта⁴

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

²Институт космических исследований (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

⁴Геофизическая обсерватория Соданкюля, г. Соданкюля, FIN-99600 Финляндия

*e-mail: feygin@ifz.ru

**e-mail: ngk1935@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.05.2021 г.

После доработки 20.05.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Рассмотрен сценарий распространения геомагнитных пульсаций *Pc1* от области их генерации в магнитосфере до наземного приемника, включая ионосферный волновод (в слое *F2*), в котором магнитосферные альвеновские, т.е. лево-поляризованные, волны трансформируются в быстрые магнитозвуковые, т.е. право-поляризованные, волны. На земной поверхности вблизи проекции источника *Pc1* будет наблюдаться левая поляризация волн, а на значительном удалении — правая. На большом массиве данных наблюдений (более 200 событий *Pc1*) исследованы особенности широтного распределения поляризации *Pc1*-пульсаций на финском меридиональном профиле индукционных магнитометров на широтах 57° – 66° MLAT. Получено, что в подавляющем большинстве случаев на исследуемых станциях наблюдалась смешанная поляризация, что, вероятно, может быть результатом расположения данного профиля на значительном удалении от проекции источника пульсаций *Pc1*. Анализ событий с четкой левой или правой поляризацией показал, что, как правило, в окрестностях возможной проекции плазмопаузы (наиболее вероятной области генерации геомагнитных пульсаций *Pc1*) наблюдались лево-поляризованные волны, которые с увеличением расстояния заменялись право-поляризованными волнами в том же диапазоне частот. Это позволило высказать предположение, что левая поляризация *Pc1*-волн на земной поверхности может быть индикатором положения проекции их источника.

DOI: 10.31857/S0016794021060055

1. ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны являются существенной частью волнового спектра в околоземном космическом пространстве. Наиболее ярким типом таких волн, наблюдаемых на земной поверхности, являются геомагнитные пульсации *Pc1* в диапазоне 0.2–5 Гц, известные как “жемчужины”, названные так, поскольку периодическое повторение отдельных каплевидных всплесков пульсаций на магнитграмме напоминает жемчужное ожерелье. Геомагнитные пульсации *Pc1* были предметом интенсивных исследований в течение многих лет, например, [Фейгин и Якименко, 1969; Gendrin et al., 1971; Гульельми и Троицкая, 1973; Erlandson et al., 1992; Kangas et al., 1998; Фейгин и др., 2003; Demekhov A.G., 2007; Трахтенгерц и Райкрофт, 2011; Гульельми и Потапов, 2021].

Пульсации *Pc1* генерируются в результате развития циклотронной неустойчивости протонов радиационного пояса в экваториальной плоскости магнитосферы в виде альвеновских, т.е. лево-поляризованных волн. Это нашло подтверждение в наблюдениях на спутниках GEOS 1, GEOS 2 [Perraut et al., 1984] и Viking [Erlandson et al., 1990, 1992]. Взаимодействие этих пульсаций с протонами радиационного пояса приводит к высыпанию энергичных протонов в ионосферу, которое неоднократно регистрировалось при сопоставлении наземных и спутниковых наблюдений, например, [Яхнин и др. 2018; Попова и др., 2018; Yahnina et al., 2000]. Картина высыпания энергичных заряженных частиц напрямую связана с ионосферной проекцией геомагнитных силовых трубок, в которых развиваются плазменные неустойчивости протонного циклотронного лазера

[Трахтенгерц и Райкрофт, 2011]. Такие трубки должны содержать достаточно плотную холодную плазму, например, плазмосферы или оторвавшихся плазменных облаков вне ее. Модель протонного циклотронного мазера значительно обогатила теорию генерации и распространения *Pc1*-пульсаций. Строгое рассмотрение свойств высыпания протонов основывается на решении системы самосогласованных уравнений для функции распределения энергичных заряженных частиц и плотности потока волновой энергии [Трахтенгерц и Райкрофт, 2011].

Поскольку циклотронная неустойчивость наиболее эффективно развивается в областях с достаточно плотной холодной плазмой, то не удивительно, что наиболее благоприятная область для генерации пульсаций *Pc1* расположена вблизи или на плазмопаузе, что было показано еще в ранних работах, например, [Heacock, 1971; Kikuchi and Taylor, 1972; Vagansky et al., 1981]. В последние годы появилось ряд работ по наблюдениям *Pc1* на низко апогейных спутниках, подтверждающих связь геомагнитных пульсаций *Pc1* с положением плазмопаузы, например, [Park et al., 2013; Kim et al., 2018; Gou et al., 2020].

Наблюдения на земной поверхности показали, что в сопряженных точках волновые пакеты *Pc1* наблюдаются с фазовым сдвигом в 180 градусов, т.е. попеременно [например, Gendrin and Troitskaya, 1965, Campbell, 1967; Фейгин и др., 2003]. Период повторения отдельных “жемчужин” согласуется со временем распространения альвеновских волн между геомагнитно сопряженными областями в противоположных полушариях. Эти волновые пакеты, отражаясь от сопряженных ионосфер, теряют часть своей энергии на ионосферных концах, которые можно рассматривать как ионосферные зеркала для альвеновских волн. Модель такого альвеновского свип-мазера и его динамические режимы детально рассмотрены в монографии [Трахтенгерц и Райкрофт, 2011].

Длина волны альвеновских *Pc1*-пульсаций сравнима с характерным размером ионосферной *F* области (сотни км), поэтому падающие на ионосферу лево-поляризованные волны могут захватываться в горизонтальный ионосферный волновод (в области минимума альвеновской скорости, *F2*-слой) и при распространении в нем трансформироваться в право-поляризованные магнитозвуковые волны. Соответствующие пространственные изменения поляризации *Pc1*-пульсаций должны наблюдаться и на земной поверхности. Однако серьезные исследования поляризации наземных *Pc1*-колебаний не проводилось. Единичные сопоставления поляризации *Pc1* на отдельных значительно разнесенных станциях в средних и высоких широтах давали неоднозначные результаты [Баранский, 1970; Fraser, 1975].

В авроральных широтах по данным [Pope, 1964; McPherron and Ward, 1965; Heacock and Hessler, 1967] поляризация *Pc1*-волн также была неустойчивой и часто беспорядочной. Авторы объясняли это наложением волн, приходящих одновременно с различных направлений и в разных частотных диапазонах.

Целью данной работы является исследование особенностей широтного пространственно-временного распределения поляризации *Pc1*-пульсаций на меридиональном профиле станций в субавроральных и авроральных широтах.

2. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ *Pc1*-ПУЛЬСАЦИЙ ОТ ИСТОЧНИКА К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Геомагнитные пульсации *Pc1* (ЭМИЦ-волны), зарождаясь в вершине магнитной силовой линии в виде альвеновских, т.е. лево-поляризованных, волн, распространяются по магнитной силовой линии вниз к ионосфере. При большом коэффициенте прохождения часть энергии волн, падающих на ионосферу, может непосредственно проникать на земную поверхность [Фейгин и др., 2003], а часть захватываться в ионосферный волновод, расположенный в области с минимумом альвеновской скорости в слое *F2* ионосферы.

Ионосфера действует как огромная “приемная антенна”, собирающая магнитосферные ЭМИЦ-волны с большой площади вокруг наземного наблюдателя. Канализируемая в волноводе волна должна быть быстрой магнитозвуковой волной (БМЗ) [Terpley and Landshoff, 1966], которая может переносить энергию поперек силовых линий геомагнитного поля. Однако в силу неоднородности среды быстрая волна взаимодействует с альвеновской, что способствует выходу захваченной энергии из волновода, так как альвеновская волна переносит энергию вдоль силовых линий геомагнитного поля, т.е. из области захвата [Нишида, 1980]. Таким образом, при прохождении из магнитосферы на Землю (через ионосферу) электромагнитное поле альвеновских волн существенно трансформируется [Hughes and Southwood, 1976; Newton et al., 1978]. Трансформация альвеновских волн в быстрые магнитозвуковые (БМЗ) волны с правой поляризацией происходит за счет возбуждения альвеновскими волнами токов в проводящем слое ионосферы [Леонович и Мазур, 2016]. Эти волны распространяются поперек силовых линий в ионосферном волноводе горизонтально на большие расстояния по широте и долготе с очень маленьким затуханием, а лево-поляризованная волна быстро затухает вблизи проекции области источника. Однако, часть энергии волны, попавшей в волновод, теряется за счет диссипативных процессов в ионосфере.

Наземные наблюдения [Hayashi et al., 1981] показали, что лево-поляризованные волны $Pc1$, распространяющиеся в волноводе из области инъекции, характеризуются очень быстрым затуханием (~ 10 дБ/100 км) в центре инъекции, которое уменьшается до ~ 2.5 дБ/100 км за пределами порядка 500 км от центра. В работе [Kim et al., 2010] было установлено, что по мере распространения в ионосферном волноводе, поляризации волн изменяется от лево-поляризованных к право-поляризованным, а коэффициенты затухания составляют от ~ 8 до 20 дБ/1000 км. Близкие результаты были получены и ранее, например, в работе [Althouse and Davis, 1978], при этом было установлено, что горизонтальное волноводное распространение наиболее эффективно вдоль магнитного меридиана [Greifinger and Greifinger, 1973].

Согласно теоретическим исследованиям [Manchester, 1970; Greifinger and Greifinger, 1968, 1973; Сорокин и Федорович, 1982; Rudenko et al., 1985; Fujita and Tamao, 1988; Fujita, 1988], волноводное затухание в дневные часы больше, чем в ночные. Кроме того, авторы указанных выше работ заключили, что волноводное затухание увеличивается с уменьшением частоты колебаний, в результате это приводит к частотной отсечке волн на частоте около 0.5 Гц, ниже которой волны не могут распространяться по ионосферному волноводу. Теоретическое обоснование величины частоты отсечки дано в работе [Greifinger and Greifinger, 1968], в которой приведены результаты численных расчетов фазовой скорости волн, распространяющихся вдоль ионосферного волновода. За единицу фазовой скорости взято минимальное значение альвеновской скорости (V_m), которое приходится на максимум слоя $F2$ ионосферы. В качестве единицы круговой частоты авторы взяли отношение V_m/D , где D – толщина слоя с минимумом скорости. Из численных расчетов следует, что когда частота достаточно велика, то и фазовая и групповая скорости имеют значения близкие к V_m . Но при меньших ω фазовая скорость убывает и при $f_{\text{cutoff}} \sim 0.5$ Гц происходит отсечение волн более низкого порядка, которые могли бы быть захвачены в волновод. Канализация ограничена волнами, у которых длина волны в вертикальном направлении в области с минимумом альвеновской скорости меньше толщины этой области. На частоте отсечения групповая скорость стремится к нулю по закону (Greifinger and Greifinger, 1968)

$$V_g = \frac{\omega/k}{1 - kd(\omega/k)/d\omega} \rightarrow 0,$$

так как

$$\frac{d(\omega/k)}{d\omega} \rightarrow -\infty,$$

где k – волновое число.

Для волн, частота которых ниже 0.5 Гц, волноводное распространение неэффективно [Нишида, 1980], что подтверждено наблюдениями, например, [Троицкая и др., 1975, Varansky et al., 1981].

Достаточно давно было установлено, что геомагнитные $Pc1$ -пульсации могут регистрироваться одновременно на станциях, удаленных друг от друга на тысячи км, например, [обзор Troitskaya, 1967 и ссылки в нем; Баранский, 1970; Althouse and Davis, 1978]. В последние годы появился ряд публикаций, подтверждающих одновременное появление $Pc1$ -пульсаций на станциях, расположенных далеко друг от друга. Так, в работе [Potarov et al., 2002] рассмотрено одновременное появление $Pc1$ -пульсаций на среднеширотных станциях Борок (58.0° N, 38.3° E, $L = 2.9$) и Монды (51.6° N, 100.8° E, $L = 2.1$), разнесенных на расстояние порядка 4000 км. Колебания на этих станциях регистрировались почти в противофазе и характеризовались маленькой скоростью распространения, почти в 7 раз ниже найденной ранее для этой пары станций, что позволило авторам предположить, что источники генерации $Pc1$ волн находились в различных полушариях.

Итак, пульсации $Pc1$ (ЭМИЦ-волны), возбуждаясь в экваториальной плоскости магнитосферы в виде лево-поляризованных альвеновских волн, распространяются по магнитной силовой линии вниз к ионосфере, где захватываются в ионосферный волновод, расположенный в слое $F2$ ионосферы, и трансформируются в право-поляризованные быстрые магнитозвуковые волны, распространяющиеся на большие расстояния от проекции источника их генерации. На земной поверхности в окрестностях проекции источника $Pc1$ будут наблюдаться лево-поляризованные волны, а с удалением от проекции источника – право-поляризованные колебания. Рассмотрим, насколько это предположение выполняется в наблюдениях $Pc1$ -пульсаций на меридиональном профиле субавроральных и авроральных станций Скандинавии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования особенностей широтного распределения поляризации $Pc1$ -пульсаций были использованы данные магнитных наблюдений, проводимых геофизической обс. Соданкюля на финском меридиональном профиле индукционных магнитометров. В нашем исследовании использовались следующие станции регистрации, расположенные на геомагнитных широтах от 57° до 66° MLAT, и интервале магнитосферного параметра L от 3.3 до 6.1: Нурмиярви (Nurmijärvi, NUR, 57.1° MLAT, $L \sim 3.3$); Оулу (Oulu, OUL, 61.2° MLAT, $L \sim 4.4$); Рованиеми (Rovaniemi, ROV, 63.2° MLAT, $L \sim 5.1$), Соданкюля (Sodankylä,

SOD, 64.1° MLAT, $L \sim 5.4$) и Ивало (Ivalo, IVA, 65.4° MLAT, $L \sim 6.1$). На этих станциях с 1999 г. установлена идентичная приемная аппаратура с верхней граничной частотой 4 Гц и одинаковой чувствительностью. Ежесуточные динамические спектры трех компонент (X , Y , Z) пульсаций, вычисленные на каждой станции, находятся в открытом доступе на сайте обс. Соданкюля (<http://www.sod.fi>). Кроме того, до конца 2010 г. вычислялись также динамические спектры отдельно право- и лево-поляризованных волн (эти данные также находятся в свободном доступе на том же сайте). Все спектрограммы пульсаций представлены в цветном виде, интенсивность колебаний определяется в дБ по цветовой гамме от минимальных (синий цвет) до максимальных значений, показанных красным цветом. В данной работе мы не можем привести примеры спектрограмм, поскольку при конвертации в черно/белое представление синий и красный цвета становятся одинаково темными.

Анализ более 200 случаев *Pc1*-пульсаций в 2003–2006 гг. показал, что, как правило, всплески *Pc1* регистрируются одновременно на всех станциях профиля, при этом наибольшая интенсивность колебаний нередко наблюдается на самой низкоширотной станции NUR ($L = 3.3$). В подавляющем большинстве случаев *Pc1*-пульсаций в динамических спектрах поляризации волн на всех станциях наблюдается присутствие как левой, так и правой поляризации, соотношение интенсивностей которых может меняться со временем и от станции к станции. Мы предполагаем, что одновременное появление левой и правой поляризации является результатом того, что все станции данного широтного профиля в выбранное время находились не на меридиане источника, а на значительном удалении от него в азимутальном направлении.

Из исследуемого массива данных были выбраны 16 событий *Pc1*, в которых отмечалось значительное преобладание какой-либо одной, левой (L) или правой (R), поляризации. Мы предположили, что в такой ситуации, меридиональная цепочка финских станций располагалась вблизи меридиана источника *Pc1*, т.е. не далее 500 км от него в азимутальном направлении. В таком случае различная поляризация колебаний на разных станциях может отражать удаленность данной станции от широтной проекции источника. Напомним, что согласно [Hayashi et al., 1981] на расстоянии до ~500 км от проекции источника преобладают лево-поляризованные волны, затем с увеличением расстояния левая поляризация сменяется правой.

Распределение левой и правой поляризации на разных станциях показано в табл. 1 для выделенных 16 событий *Pc1*. Поскольку плазмопауза является наиболее эффективной областью гене-

рации *Pc1*-пульсаций, для всех событий было вычислено вероятное положение плазмопаузы во время регистрации всплесков *Pc1*-пульсаций, перечисленных в табл. 1. Вычисления проводились по модели [Liu et al., 2015], представляющей развитие хорошо известной популярной модели [Moldwin et al., 2002], и построенной по наблюдениям на спутнике THEMIS-D в 2010–2011 гг. с использованием максимальных значений геомагнитных индексов Kp и $SymH$ за предшествующие 36 ч.

Из таблицы 1 видно, что наиболее часто (в 14 из 16 событий) левая поляризация наблюдалась в OUL ($L = 4.4$), т.е. в окрестности наиболее типичного положения плазмопаузы. На более высокоширотных станциях SOD ($L = 5.4$) и IVA ($L = 6.1$) левая поляризация наблюдалась значительно реже. Прежде всего, следует заметить, что имелись случаи, когда при одинаковом вычисленном положении плазмопаузы наблюдалось различное широтное распределение поляризации, а также случаи одинакового широтного распределения поляризации при разном положении плазмопаузы.

При сопоставлении данных наблюдений на разных станциях важно учитывать расстояние между станциями, поскольку на расстоянии до ~500 км от проекции источника можно ожидать преобладания левой поляризации. Расстояния между станциями составляют: IVA–SOD = 150 км, SOD–ROV = 110 км, ROV–OUL = 220 км, OUL–NUR ~ 500 км. Поэтому не удивительно, что наиболее часто левая поляризация наблюдалась на более низкоширотных станциях OUL и NUR, т.е. когда плазмопауза могла находиться в окрестностях OUL или южнее. В таких условиях пульсации *Pc1*, возбуждающиеся вблизи плазмопаузы, могут наблюдаться на земной поверхности с левой поляризацией одновременно в OUL и NUR, а также в ROV. Из таблицы 1 видно, что одновременное появление левой поляризации на указанных станциях наблюдалось в половине исследуемых случаев.

Рассмотрим широтное распределение поляризации в отдельных событиях.

В событии № 1 плазмопауза находилась несколько южнее OUL. В NUR, на расстоянии ~500 км от OUL, поляризация волн была смешанной с преобладанием интенсивности левой ($L \gg R$). Левая поляризация наблюдалась и к северу от OUL, в ROV и SOD (330 км от OUL), а в IVA (480 км от OUL) поляризация была смешанной ($L + R$). Следовательно, наблюдалась ожидаемая ситуация. Во время события № 2 ситуация была относительно схожей с той разницей, что правая поляризация к северу от OUL появилась несколько ближе, в SOD.

Событие № 3 было значительно сложнее. Согласно модельным представлениям плазмопауза

Таблица 1. Широтное распределение поляризации пульсаций $Pc1$ по данным индукционных магнитометров на профиле IVA-NUR

№	Дата	UT	Поляризация $Pc1$					Lpp
			IVA $L = 6.1$	SOD $L = 5.4$	ROV $L = 5.1$	OUL $L = 4.4$	NUR $L = 3.3$	
1	11 апреля 2003	00-04	R + L	L	L	L	$L \gg R$	4.2
2	08 ноября 2003	00-04	R	R	L	L	L	4.3
3	20 ноября 2003	00-03	R	L	R	R	L	4.3
4	20 ноября 2003	03-06	L	R	L	L	L	4.3
5	27 ноября 2003	03-10	L	R	L	L	$L = R$	4.4
6	30 ноября 2003	06-08	L	R	L	L	$L = R$	4.6
7	17 декабря 2003	00-02	L	R	L	L	R	4.3
8	18 декабря 2003	06-10	R	L	R	L	L	5.3
9	07 января 2005	02-08	R	L	R	R	R	5.0
10	25 января 2005	06-09	L	R	L	L + R	L + R	4.1
11	12 апреля 2006	03-06	$R > L$	$R > L$	$R > L$	L	L	4.3
12	19 апреля 2006	02-06	$L > R$	$L = R$	$L = R$	$L = R$	$L = R$	5.3
13	14 ноября 2006	03-06	R	R	R	L	R	4.5
14	17 декабря 2006	04-09	R	R	R	L	$R > L$	4.0
15	18 декабря 2006	02-04	R	R	R	L	L	4.2
16	19 декабря 2006	03-09	R	R	R	L	R	4.1

Примечание: L – левая поляризация волн, R – правая поляризация волн, Lpp – расчетное положение плазмопаузы.

находилась вблизи OUL, однако там, как и в ROV, наблюдалась правая поляризация, левая поляризация отмечалась к югу от OUL (в NUR), и к северу от OUL (в SOD). Это был относительно спокойный период с $Kp = 1$ после незначительных возмущений с $Kp = 3$ и перед началом большой магнитной бури. Пока не ясно, как адекватно объяснить такое широтное распределение поляризации. Вполне возможно, что истинное положение плазмопаузы отличалось от рассчитанного по модели. Кроме того, строение плазмопаузы поперек L -оболочек в это время могло быть неоднородным и представлять собой остаточные “островки” отошедшей плазмосферной плазмы или “плюма”, например, как это рассматривалось в работе [Яхнина и др., 2021]. В таком случае можно предположить наличие нескольких источников $Pc1$, действующих одновременно.

В событии № 4 на всех станциях, кроме SOD, наблюдалась левая поляризация волн, а интенсивность $Pc1$ -пульсаций в NUR была значительно больше, чем на остальных станциях. Можно предположить, что основной источник этих пульсаций находился вблизи NUR. Вероятно, что, как и в предыдущем событии, имело место одновременное наличие нескольких источников волн, расположенных на различных L -оболочках, и плазмопауза представляла собой не резкую “ступеньку” плотности, а совокупность остатков под-

жатой “старой” плазмопаузы и отдельных “островов” отошедшей плазмы (“плюма”).

В событиях № 5–7 широтное распределение поляризации было относительно одинаковым: в OUL, ROV и IVA наблюдалась левая поляризация, к северу от OUL, на расстоянии ~330 км в SOD, правая, хотя одновременно на более высоких широтах, в IVA, вновь появилась четкая левая поляризация. К югу от OUL, на расстоянии ~500 (NUR) регистрировалась смешанная или, как в событии № 7, правая. По оценочным модельным расчетам плазмопауза могла находиться в области от $L = 4.3$ до $L = 4.6$, т.е. в окрестности OUL. Эти события, как и события № 3 и № 4, наблюдались в относительно спокойный период с $Kp = 1$ после незначительных возмущений с $Kp = 3$. Можно предположить, что в таких условиях развитие ионно-циклотронной неустойчивости может происходить одновременно в двух областях – в окрестности удаленного остаточного “плюма” (облака отошедшей плазмосферной плазмы) и в узкой области старой плазмопаузы, поджатой во время предшествующих магнитных возмущений, как это показано в работе [Яхнина и др., 2021]. Следствием этого может быть появление левой поляризации в IVA и в OUL-ROV.

Событие № 8, наблюдалось в магнито-спокойных условиях, когда модельные представления предсказывали наиболее вероятное положение

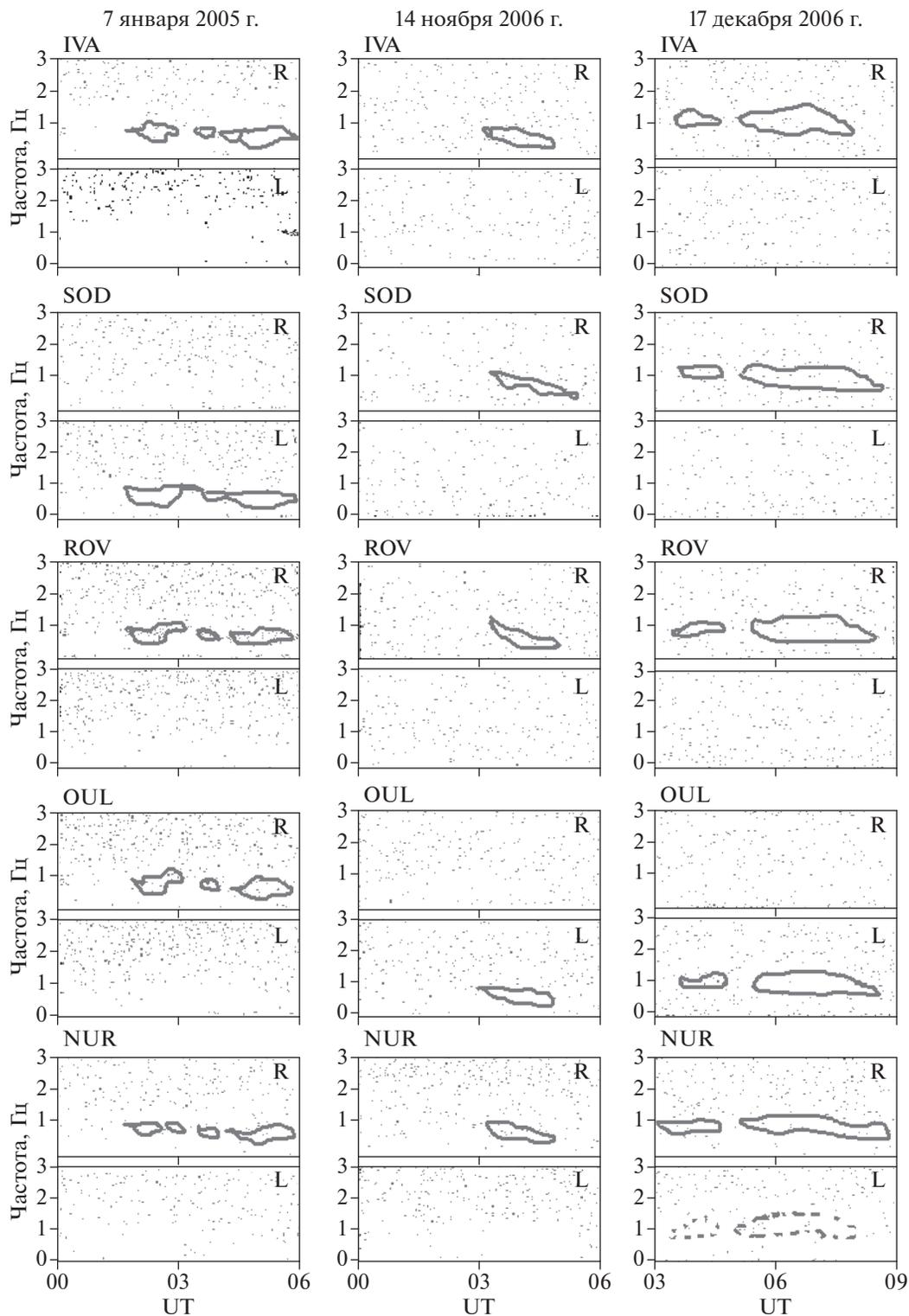


Рис. 1. Схематическое распределение поляризации геомагнитных пульсаций *Pc1* на профиле финских станций IVA-NUR, L – левая поляризация волн, R – правая поляризация.

плазмопаузы вблизи SOD, где, действительно, наблюдалась левая поляризация, а на соседних станциях (IVA и ROV) правая. Различная поляризация в SOD и ROV, расстояние между которыми

меньше 150 км, по-видимому, свидетельствует о том, что затухание лево-поляризованных волн в волноводе в некоторых случаях может быть значительно больше, чем предполагалось в ранних

работах, например, [Hayashi et al., 1981]. Во время этого события левая поляризация наблюдалась также и на наиболее низкоширотных станциях профиля – в OUL и NUR. Такая сложная картина широтного распределения поляризации наводит на мысль о наличии множественных источников генерации волн, действующих одновременно, как и в событиях № 4–7.

Событие № 9 наблюдалось в очень спокойных условиях при $Kp \sim 0$, предшествующий период времени был также очень спокойным, за исключением одного очень короткого выброса до $Kp = 3$. Осредненные оценки положения плазмопаузы, основанные на наличии этого выброса, дают положение плазмопаузы на $L \sim 4.6$. Однако в широтном распределении поляризации левые волны наблюдались только в SOD, а на остальных станциях поляризация $Pc1$ -колебаний была правой. Поэтому логично предположить, что в таких спокойных условиях плазмопауза могла быть достаточно пологой на значительном расстоянии, а потоки резонансных протонов пересекали радиационный пояс в узкой по широте области на L -оболочке, соответствующей SOD.

Событие 10 похоже на события № 5–7.

В *событиях № 11 и № 13–16* наблюдалось одинаковое широтное распределение поляризации: правая поляризация на всех станциях, расположенных южнее OUL, и левая поляризация в OUL. Плазмопауза в этих событиях, судя по расчетам, находилась несколько южнее OUL. На более низкоширотной станции NUR поляризация могла быть как левой, так и правой.

В *событии № 12*, зарегистрированном, как и событие № 9, в очень спокойных условиях с $Kp \sim 0$, на всех станциях наблюдалась смешанная поляризация, однако интенсивность лево-поляризованных волн была выше право-поляризованных. Расчетное положение плазмопаузы отмечалось в районе SOD. Можно предположить, что в таких магнито-спокойных условиях плазмопауза могла быть достаточно пологой в значительном интервале L -оболочек. Кроме того, не исключено, что источник генерации волн находится не на меридиане NUR-IVA, а на некотором удалении от него по долготе.

В качестве иллюстрации к табл. 1 на рис. 1 схематически показано распределение поляризации пульсаций $Pc1$ на широтном профиле магнитометров NUR-IVA для трех событий, рассмотренных в табл. 1: событие № 9 (7 января 2005 г.), № 13 (14 ноября 2006 г.) и № 14 (17 декабря 2006 г.). Четко видно, что 7 января 2005 г. левая поляризация наблюдалась только в SOD, а 14 ноября 2006 г. и 17 декабря 2006 г. – только в OUL, на остальных станциях поляризация волн была правой. В первом случае расчетное положение плазмопаузы было ближе к SOD, а в двух других событиях, со-

гласно модельным представлениям, плазмопауза находилась ближе к OUL.

Таким образом, анализ наблюдений показал, что, как правило, в окрестностях возможной проекции плазмопаузы наблюдаются лево-поляризованные волны. Левая поляризация с широтой может замениться на правую на расстоянии, значительно меньшем предсказанном теорией [Hayashi et al., 1981], что свидетельствует о быстром затухании лево-поляризованных волн с широтой. Анализ данных наблюдений также показал, что в ряде случаев возможно наличие множественных источников генерации волн, действующих одновременно, что может быть связано со сложной структурой распределения плотности в окрестностях плазмопаузы, наличием остаточной “старой” плазмопаузы, а также облаков отошедшей плазмы (так называемый “плюм”).

4. ВЫВОДЫ

На большом массиве данных наблюдений геомагнитных пульсаций $Pc1$ в 2003–2006 гг. выполнено исследование особенностей широтного распределения поляризации $Pc1$ -пульсаций на финском профиле индукционных магнитометров на геомагнитных широтах 57° – 66° MLAT и их возможной связи с расчетным положением плазмопаузы как наиболее вероятной области генерации $Pc1$.

В подавляющем большинстве случаев на исследуемых наземных станциях наблюдалась смешанная поляризация ($L + R$), что может быть результатом расположения данного профиля станций не на меридиане источника $Pc1$ -пульсаций, а на некотором долготном расстоянии от него.

Из порядка 200 случаев $Pc1$ -пульсаций удалось выделить только 16 событий, т.е. менее 10%, в которых отмечалось значительное преобладание какой-либо одной – левой (L) или правой (R) поляризации. Для этих событий было вычислено возможное положение плазмопаузы. Анализ наблюдений показал, что, как правило, в окрестностях возможной проекции плазмопаузы наблюдались лево-поляризованные волны. Левая поляризация с широтой изменялась на правую, при этом зачастую на расстоянии, значительно меньшем, чем предсказано теорией [Hayashi et al., 1981], что свидетельствует о быстром затухании лево-поляризованных волн с широтой. Анализ данных наблюдений также показал, что в ряде случаев, по-видимому, имело место наличие нескольких источников генерации волн, действующих одновременно.

Можно предположить, что левая поляризация геомагнитных пульсаций $Pc1$, наблюдаемых на земной поверхности, может быть косвенным индикатором того, что данная станция располагает-

ся вблизи проекции магнитосферного источника генерации волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранский Л.Н. Некоторые характеристики поляризации *Pc1* пульсаций, связанные с их волноводным распространением // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 10. С. 86–89. 1970.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // М.: Наука, 1973.
- Гульельми А.В., Потапов А.С. Частотно-модулированные ультранизкочастотные волны в околоземном космическом пространстве // УФН. Т. 191. № 5. С. 475–491. 2021
- Леонович А.С., Мазур В.А. Линейная теория МГД-колебаний магнитосферы // Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 478 с.
- Нишида. Геомагнитный диагноз магнитосферы. Издательство “Мир”. 1980. 297 с.
- Попова Т.А., Яхнин А.Г., Демехов А.Г., Черняева С.А. Генерация ЭМИЦ волн в магнитосфере и высыпания энергичных протонов: сопоставление данных высокоорбитальных спутников THEMIS и низкоорбитальных спутников POES // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 4. С. 484–97. 2018.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Распространение короткопериодных волн в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 25. С. 495–501. 1982.
- Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Дж. Свистовые и альвеновские мазеры в космосе // Москва: ФИЗМАТЛИТ. С. 278–295. 2011
- Троицкая В.А., Баранский Л.Н., Матвеева Э.Т., Фейгин Ф.З., Гланжо Ф., Виноградов П.А., Кошелевский В.К. О положении источников пульсаций *Pc1* в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 15. № 3. С. 525–531. 1975
- Фейгин Ф.З., Якименко В.Л. Механизм генерации и развитие “жемчужин” при циклотронной неустойчивости внешней протонной зоны // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 9. № 4. С.700–705. 1969.
- Фейгин Ф.З., Прикнер К., Некрасов А.К. Реальность модели баунс-движения волновых пакетов геомагнитных пульсаций *Pc1* в магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43(6). С. 752–759. 2003
- Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Семенова Н.В., Попова Т.А., Демехов А.Г. Протонные сияния к экватору от овала как проявление ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере Земли (краткий обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 5. С. 599–607. 2018.
- Яхнина Т.А., Яхнин А.Г., Райта Т., Маннинен Ю., Голдстейн Дж. Локализация источников геомагнитных пульсаций *Pc1* // Изв. РАН. Сер. физич. Т. 85. № 3. С. 451–456. 2021.
- Althouse E.L., Davis J.R. Five-station observations of *Pc1* micropulsation propagation // J. Geophys. Res. V. 83. P. 132–144. 1978.
- Baransky L., Golikov Yu., Feygin F., Harchenko I., Kangas T., Pikkarainen T. Role of the plasmapause and ionosphere in the generation of pearl pulsations // J. Atmos. Terr. Phys. V. 43(9). P. 875–881. 1981.
- Campbell W.H. Geomagnetic pulsations // Physics of Geomagnetic. Phenomena, New York: Academic Press. V. 2. P. 821–909. 1967.
- Demekhov A.G. Recent progress in understanding *Pc1* pearl formation // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 1599–1774. 2007.
- Erlandson R.E., Zanetti L.J., Potemra T.A., Block L.-P., Holmgren G. Viking magnetic and electric field observations of *Pc1* waves at high latitudes // J. Geophys. Res. V. 95. P. 5941–5955. 1990.
- Erlandson R.E., Anderson B.J., Zanetti L.J. Viking magnetic and electric field observations of periodic *Pc1* waves: Pearl pulsations // J. Geophys. Res. V. 97. P. 14823–14832. 1992.
- Fujita S., Tamao T. Duct propagation of hydromagnetic waves in the upper ionosphere: 1. Electromagnetic field distributions in high latitudes associated with localized incidence of a shear Alfvén wave // J. Geophys. Res. V. 93. P. 14.665–14.673. 1988
<https://doi.org/10.1029/JA093iA12p14665>
- Fujita S. Duct propagation of hydromagnetic waves in the upper ionosphere: 2. Dispersion characteristics and loss mechanism // J. Geophys. Res. V. 93. P. 14.674–14.682. 1988.
- Gendrin R., Troitskaya V.A. Preliminary results of a micropulsation experiment at conjugate points // Radio Sci. V. 69D. P. 1107–1116. 1965
- Gendrin R., Lacourly S., Roux A., Solomon J., Feygin F.Z., Gokhberg M.B., Troitskaya V.A., Yakimenko V.L., Wave packet propagation in an amplifying medium and its application to the dispersion characteristics and to the generation mechanism of *Pc1* events // Planet. Space Sci. V. 19. P. 165–194. 1971.
- Gou X., Li L., Zhang Y., Zhou B., Feng Y., Cheng B., Raita T., Liu J., Zhima Z., Shen X. Ionospheric *Pc1* waves during a storm recovery phase observed by the China Seismo-Electromagnetic Satellite // Ann. Geophys. V. 38. P. 775–787. 2020.
<https://doi.org/10.5194/angeo-38-775-2020>
- Greifinger C., Greifinger P. Theory of hydromagnetic propagation in the ionospheric waveguide // J. Geophys. Res. V. 73. P. 7473–7490. 1968.
- Greifinger C., Greifinger P. Wave guide propagation of the micropulsations out of the plane of the geomagnetic meridian // J. Geophys. Res. V. 78. P. 4611–4618. 1973
- Hayashi K., Kokubun S., Oguti T., Tsuruda K., Machida S., Kitamura T., Saka O., Watanabe T. The extent of *Pc1* source region in high latitudes // Can. J. Phys. V. 59. P. 1097–1105. 1981.
<https://doi.org/10.1139/p81-145>
- Heacock R.R., Hessler V.P. Polarization characteristics of *Pc1* micropulsations at College // Planet. Space Sci. V. 15. P. 1361–1374. 1967
- Heacock R.R. The relation of the *Pc1* micropulsation source region to the plasmasphere // J. Geophys. Res. V. 76. P. 100–109. 1971
- Hughes W.J., Southwood D.J. An illustration of modification of geomagnetic pulsation structure by the ionosphere // J. Geophys. Res. V. 81. P. 3241–3247. 1976.
- Johnson J.R., Cheng C.Z. Can ion cyclotron waves propagate to the ground? // Geophys. Res. Lett. V. 26. P. 671–

674. 1999.
<https://doi.org/10.1029/1999gl900074>
- *Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O.* Morphology and physics of short period magnetic pulsations // *Space Sci. Rev.* V. 83. P. 435–512. 1998.
- *Kikuchi H., Taylor H.A.Jr.* Irregular structure of thermal ion plasma near the plasmopause observed from Ogo 3 and Pc 1 measurements // *J. Geophys. Res.* V. 77. P. 131–142. 1972.
- *Kim H., Lessard M.R., Engebretson M.J., Lühr H.* Ducting characteristics of Pc1 waves at high latitudes on the ground and in space // *J. Geophys. Res.* V. 115. P. A09310. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015323>
- *Kim H., Hwang J., Park J., Miyashita Y., Shiokawa K., Mann I.R., Raita T., Lee J.* Large-scale ducting of Pc1 pulsations observed by Swarm satellites and multiple ground networks // *Geophys. Res. Lett.* V. 45. P. 12.703–12.712. 2018.
<https://doi.org/10.1029/2018GL080693>
- *Liu X., Liu W.L., Cao J.B., Fu H.S., Yu J., Li X.* Dynamic plasmopause model based on THEMIS measurements // *J. Geophys. Res: Space Physics.* V. 120. P. 10543–10556. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021801>
- *Manchester R.N.* Propagation of hydromagnetic emissions in the ionospheric duct // *Planet. Space Sci.* V. 18. P. 299–307. 1970.
- *McPherron R.L., Ward S.H.* Auroral zone pearl pulsations // *J. Geophys. Res.* V. 70. P. 5867–5882. 1965.
- *Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., Amin R., Anderson R.R.* A new model of the location of the plasmopause: CRRES results // *J. Geophys. Res.* V. 107 (A11). P. 1339. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001JA009211>
- *Newton R.S., Southwood D.J., Hughes W.J.* Damping of geomagnetic pulsations by the ionosphere // *Planet. Space Sci.* V. 26. P. 201–209. 1978.
- *Park J., Lüh H., Rauberg J.* Global characteristics of Pc1 magnetic pulsations during solar cycle 23 deduced from CHAMP data // *Ann. Geophys.* V. 31(9). P. 1507–1520. 2013.
<https://doi.org/10.5194/angeo-31-1507-2013>
- *Perraut S., Gendrin R., Roux A., de Villedary C.* Ion cyclotron waves: direct comparison between ground-based measurements and observations in the source region // *J. Geophys. Res.* V. 89 (A1). P. 195–202. 1984.
- *Pope J.H.* An explanation for the apparent polarization of some geomagnetic micropulsations (pearls) // *J. Geophys. Res.* V. 69. P. 399–405. 1964.
- *Potapov A.S., Polyushkina T.N., Afraimovich E.L., Lipko Y.V., Hayashi K.* Transequatorial propagation of the Pc1 emission on 23 October 1997 // *J. Geophys. Res.* V. 107 (A7). P. 1128. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001JA000225>
- *Rudenko G.V., Churilov S.M., Shukhman I.G.* Excitation of the ionospheric waveguide by a localized packet of Alfvén waves // *Planet Space Sci.* V. 33. P. 1103–1108. 1985.
- *Tepley L.R., Landshoff R.K.* Waveguide theory for ionospheric propagation of hydromagnetic emissions // *J. Geophys. Res.* V. 71. P. 1499–1504. 1966.
- *Troitskaya V.A.* Micropulsations and the state of the magnetosphere // *Sol. Terr. Phys.* V. 7. P. 213–274. 1967.
- *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J.* Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 122. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024249>
- *Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J.* Proton precipitation related to Pc1 pulsations // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 21. P. 3575–3578. 2000.