УЛК 550.338

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Рс1

© 2021 г. Т. А. Яхнина<sup>1, \*</sup>, А. Г. Яхнин<sup>1</sup>, Т. Райта<sup>2</sup>, Ю. Маннинен<sup>2</sup>, Дж. Голдстейн<sup>3, 4</sup>

 $^{1}\Phi$ едеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия <sup>2</sup>Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия

<sup>3</sup>Юго-западный исследовательский институт, Сан Антонио, США

<sup>4</sup>Университет Техаса, Факультет физики и астрономии, Сан Антонио, США

\*E-mail: tyahnina@gmail.com Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

По данным измерений потоков протонов на низкоорбитальных спутниках анализируется положение областей развития ионно-циклотронной неустойчивости относительно плазмосферы в период 00-08 UT 11 сентября 2017 г. Положение и динамика этих областей позволяет объяснить структуру и динамику спектра геомагнитных пульсаций в диапазоне 0.2-4 Гц, наблюдавшихся в это время на земной поверхности.

DOI: 10.31857/S0367676521030327

### введение

Считается, что геомагнитные пульсации диапазона Pc1 (от 0.2 до нескольких Гц) являются результатом развития ионно-циклотронной неустойчивости во внутренней магнитосфере [1]. Свободная энергия для развития неустойчивости обеспечивается поперечной анизотропией температуры протонов кольцевого тока. В результате неустойчивости происходит генерация электромагнитных ионноциклотронных (ЭМИЦ) волн (на земной поверхности это геомагнитные пульсации Pc1) и питчугловая диффузия протонов, которая ведет к заполнению конуса потерь и, следовательно, к высыпанию энергичных протонов. Таким образом, обнаружение протонных высыпаний в зоне поперечной анизотропии функции распределения является индикатором силовой линии, на которой находится источник ЭМИЦ волн (см., например, обзоры [2, 3]). Высыпания удобно изучать по данным низкоорбитальных спутников, поскольку конус потерь на низких высотах часто больше апертуры приборов, измеряющих частицы (вблизи экваториальной плоскости конус потерь существенно меньше углового разрешения датчиков частиц). На низкоорбитальных спутниках серии POES (Polar Orbiting Environmental Satellites), к которым относятся спутники NOAA и MetOp, установлены два детектора заряженных частиц. Один направлен в зенит и на достаточно высоких широтах (>50° геомагнитной широты) измеряет потоки частиц в конусе потерь, другой – направлен к первому под углом 90° и измеряет, в основном, потоки захваченных на высоте спутника частиц [4]. В высокоширотной части траектории низкоорбитального спутника наблюдается зона изотропных высыпаний, где потоки, измеряемые этими двумя датчиками, равны. К экватору от изотропных высыпаний, датчик, регистрирующий захваченные частицы, обычно измеряет поток на порядки больший, чем датчик, измеряющий высыпающиеся частицы (зона поперечной анизотропии потоков). Всплески высыпаний, связанные с ЭМИЦ волнами, локализованы внутри этой анизотропной зоны [2]. Во время таких всплесков потоки довольно часто становятся изотропными, что соответствует режиму сильной диффузии. В то же время, могут наблюдаться всплески только в захваченной компоненте [5]. Такие случаи, по-видимому, можно отнести к слабой диффузии, когда потоки частиц за конусом потерь изотропизуются, а конус потерь не заполняется.

В этой работе по данным низкоорбитальных спутников мы рассмотрим локализованные протонные высыпания во время наблюдения пульсаший Pc1. имевших довольно сложный динамический спектр. Событие имело место 11 сентября 2017 г. в интервале 00-08 UT, на поздней стадии фазы восстановления геомагнитной бури. Пульсации наблюдались на различных наземных станциях, в том числе и на финской меридиональной сети индукционных магнитометров, расположенной на широтах 57.1°-65.3° исправленной геомаг-



Рис. 1. Примеры всплесков потоков протонов с энергией 30–80 кэВ в анизотропной зоне, наблюдавшихся спутниками POES. Вариации потоков (*J*) показаны в зависимости от исправленной геомагнитной широты (CGMLat). Тонкая линия – поток захваченных на высоте спутника протонов, жирная линия – поток высыпающихся протонов. Треугольниками, крестиками и кружками отмечены разные группы всплесков (см. пояснения в тексте).

нитной широты (Corrected Geomagnetic Latitude, CGMLat). Разные аспекты этого события уже рассматривались в работах [6, 7], но они не касались расположения и динамики магнитосферных источников ЭМИЦ волн. Мы рассмотрим локализацию областей ионно-циклотронной неустойчивости в экваториальной плоскости магнитосферы и их связь с положением плазмосферных структур, полученных с помощью моделирования плазмопаузы [8, 9].

### НАБЛЮДЕНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ УСИЛЕНИЙ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ

На рис. 1 приведены примеры локализованных всплесков потока протонов, которые спутники POES зарегистрировали в окрестности меридиана финской сети станций, т.е., на удалении не более 2.5 ч магнитного локального времени (MLT). Серым цветом отмечены области наблюдения всплесков в потоках протонов в анизотропной зоне. Треугольниками обозначены всплески высыпаний протонов, которые наблюдались на широтах 55°-60° CGMLat (табл. 1). Всплески высыпаний на более высоких широтах 63°-70° CGMLat обозначены крестиками (табл. 2). Кружками отмечены наиболее экваториальные всплески потоков захваченных протонов. В рассматриваемом событии такие всплески наблюдались в диапазоне широт 55°-58° CGMLat. Подобные вариации потока соответствуют, по-видимому, процессу циклотронной неустойчивости в режиме слабой питчугловой диффузии, при которой конус потерь не заполняется. Слабая диффузия ассоциируется с малыми амплитудами волн. Поэтому, не стоит ожидать заметных пульсаций, связанных с этим видом усиления потока протонов. В то же время, на широтах усилений в потоках захваченных частиц могут наблюдаться и локализованные всплески высыпающихся протонов [2, 5], т.е. признаки интенсивного рассеяния в конус потерь. В рассматриваемом интервале такие признаки видны не только в данных POES, но и в данных спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). На спутниках DMSP имеется прибор SSUSI [10], который измеряет интенсивность авроральных эмиссий в нескольких диапазонах длин волн. Этот прибор на спутнике DMSP F-17 зафиксировал на двух последовательных пролетах "пятна" сияний, соответственно, в ~01:38 UT и в ~03:22 UT на широтах ~55.5° и ~57° CGMLat (табл. 1), т.е. на широтах всплесков в потоках захваченных протонов. Эти "пятна" сияний располагались существенно экваториальнее овала полярных сияний (данные не показаны). Как следует из работы [11], такие изолированные от аврорального овала сияния обусловлены высыпаниями энергичных протонов. Таким образом, они соответствуют локализованным высыпаниям протонов на спутниках POES.

### СВЯЗЬ ОБЛАСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСЫПАНИЙ И ПЛАЗМОСФЕРНЫХ СТРУКТУР

Как показывают результаты моделирования плазмопаузы методом пробных частиц [8] во время геомагнитной бури, которая началась 7 сентября 2017 г. ( $Dst_{min} = -142$  нТл), плазмопауза претерпевала значительные деформации, включающие уменьшение радиуса плазмосферы, образование плюмов в вечернем секторе и их закручивание вокруг Земли в результате процесса коротации. К моменту времени 04 UT 11 сентября (т.е. к середине рассматриваемого интервала) смоделированная плазмосфера приобрела вид, показанный на рис. 2 в координатах L-MLT (L – расстояние от Земли, выраженное в земных радиусах,  $R_E$ ). В утреннем секторе, вблизи меридиана финских станций. расстояние от Земли до плазмопаузы составляет около 3.1–3.3  $R_E$ . Дальше от Земли (L = 3.3-5.0) располагается так называемый "остаточный плюм", сформировавшийся в результате закручивания вокруг Земли нескольких плазмосферных плюмов, которые образовались на вечерней стороне в более ранние стадии геомагнитной бури. Предполагается [8], что в этой области пространственное распределение плотности холодной плазмы имеет мелкомасштабную структуру. На L > 5 плазмосферная плазма в утреннем секторе отсутствует.

№	UT чч:мм:сс	MLT, ч	CGMLat, град	J, $(см^2 \cdot c \cdot cp \cdot \kappa \Rightarrow B)^{-1}$	$f_{\mathrm{He^+}},$ Гц	Спутник
1	23:21:41	1.35	59.50	$8 \cdot 10^3$	1.9	NOAA-19
2	00:31:01	4.84	58.23	$2.2 \cdot 10^{2}$	2.4	NOAA-19
3	01:38:00	3.40	55.50	_	3.8	DMSP F-17
4	02:01:33	4.37	58.37	$4\cdot 10^1$	2.3	NOAA-15
5	02:02:09	4.20	59.73	$5\cdot 10^1$	1.9	NOAA-15
6	02:13:21	4.86	57.74	10 <sup>3</sup>	2.6	NOAA-19
7	02:29:05	5.26	58.76	$1.7 \cdot 10^{4}$	2.2	NOAA-18
8	03:22:00	4.00	57.00	_	3.0	DMSP F-17
9	04:11:37	5.20	56.34	$4.6 \cdot 10^{2}$	3.3	NOAA-18
10	04:46:32	7.66	58.00	10 <sup>2</sup>	2.5	MetOp-2
11	04:47:08	7.49	59.45	$1.2 \cdot 10^{2}$	1.9	MetOp-2
12	04:52:03	7.73	58.43	$5\cdot 10^1$	2.3	NOAA-15
13	05:38:51	5.17	56.60	$1.3 \cdot 10^{4}$	3.1	NOAA-19
14	06:28:30	7.64	55.90	$5 \cdot 10^1$	3.5	MetOp-2

Таблица 1. Характеристики всплесков высыпаний протонов, сопряженных с плазмосферными структурами

Таблица 2. Характеристики всплесков высыпаний протонов, сопряженных с областями за плазмосферой

№	UT чч:мм:сс	MLT, ч	CGMLat, град	J, (см <sup>2</sup> · с · ср · кэВ) <sup>-1</sup>	$f_{\rm He^+},$ Гц	Спутник
1	02:10:21	5.70	66.63	$1.2 \cdot 10^{2}$	0.5	NOAA-19
2	03:06:22	7.47	65.03	$1.7 \cdot 10^{2}$	0.6	MetOp-2
3	04:00:57	7.37	62.83	$1.6 \cdot 10^{2}$	1	MetOp-1
4	05:55:06	11.10	62.98	$7\cdot 10^1$	1	MetOp-2
5	06:30:23	8.84	67.62	$2.3 \cdot 10^{2}$	0.3	NOAA-15
6	07:00:29	9.82	68.08	$1.1 \cdot 10^{2}$	0.3	NOAA-18
7	07:34:20	12.03	69.36	$6.9 \cdot 10^{2}$	0.2	MetOp-2
8	07:35:32	11.55	66.16	$6 \cdot 10^1$	0.5	MetOp-2

Всплески потоков протонов были спроецированы в экваториальную плоскость в предположении дипольного магнитного поля. Проекции локализованных усилений потоков захваченных протонов (события, отмеченные на рис. 1 и 2 кружками) располагаются вблизи плазмопаузы, так же, как и проекции высыпаний, обнаруженных по данным спутника DMSP F-17 (отмечены звездочками на рис. 2). Проекции высыпаний, отмеченные треугольниками, частично располагаются в окрестности плазмопаузы, но, в основном, в области остаточного плюма, а проекции высыпаний, отмеченные крестиками, находятся на более высоких *L*-оболочках, где, согласно результатам моделирования, холодная плазмосферная плазма не наблюдается.

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СПЕКТРА ПУЛЬСАЦИЙ Рс1

На рис. 3 приведена спектрограмма геомагнитных пульсаций, наблюдавшихся на самой экваториальной станции финской сети Нурмиярви ( $L \sim 3.3$ ), на которой интенсивность пульсаций была максимальна. Слабый сигнал был виден уже с 23 UT 10 сентября [6]. С 00 UT спектр пульсаций представлял собой полосу на частотах 1–1.5 Гц. Около 01 UT появилась полоса на 2–3 Гц. Частота этой полосы после 02 UT уменьшилась до 1.5 Гц. Появление этой полосы связано с резким повышением давления солнечного ветра (см. данные в работах [6, 7]). С ~02:30 до ~05 UT сигнал представлял собой широкую (в начале интервала 1–2 Гц, а в конце 1.5–2 Гц), неоднородную по интенсивно-



**Рис. 2.** Результаты расчета положения плазмосферных структур методом пробных частиц для момента 04 UT 11 сентября 2017 г. и проекции в экваториальную плоскость магнитосферы локализованных всплесков в потоках протонов, наблюдавшихся в интервале 23 UT 10 сентября по 08 UT 11 сентября 2017 г. В правой части рисунка показан увеличенный фрагмент, относящийся к утреннему сектору. Проекции разных групп всплесков потока протонов отмечены такими же символами как на рис. 1. Звездочками показаны экваториальные проекции высыпаний по данным спутника DMSP F-17.



**Рис. 3.** Спектрограмма геомагнитных пульсаций в диапазоне 0–4 Гц, наблюдавшихся на станции Нурмиярви в интервале 00–08 UT. Значения гирочастоты иона He<sup>+</sup> в экваториальной плоскости, соответствующие широтам всплесков потока протонов, отмечены такими же символами как на рис. 1 и 2.

сти полосу с растущей средней частотой. После ~05 UT эта полоса разделилась на две слабые по интенсивности полосы с разнонаправленным смещением частоты (спектрограммы других станций, показывающие сходное поведение сигнала, приведены в работах [6, 7]).

Широта локализованного усиления потока протонов (или *L*-оболочка источника высыпаний и ЭМИЦ волн в магнитосфере) определяет величину магнитного поля в экваториальной плоскости и соответствующие гирочастоты заряженных частиц. Кружками на рис. 3 показаны значения гирочастоты иона гелия ( $f_{\text{He+}}$ ), которые соответствуют широтам всплесков в потоке захваченных частиц. Звездочками обозначены значения  $f_{\text{He+}}$ , для широты сияний по данным спутника DMSP. Треугольники и крестики показывают значения  $f_{\text{He+}}$  для широт всплесков высыпаний протонов. Белая горизонтальная линия на частоте 2.75 Гц отделяет гирочастоты, соответствующие источникам в окрестности плазмопаузы (L = 3.0-3.3), от гирочастот источников, связанных с остаточным плюмом. Черная линия на частоте 1.5 Гц разделяет гирочастоты, соответствующие источникам в плюме, и гирочастоты, соответствующие источникам в плюме, и гирочастоты, соответствующие источни-

В интервале 00-01 UT был зарегистрирован только один всплеск высыпаний из области остаточного плюма. Гирочастота иона гелия  $f_{\text{He}+}$ , соответствующая этому источнику равна 2.4 Гц. В это время наблюдалась одна полоса пульсаций на частотах 1-1.5 Гц. Это указывает на то, что наблюдаемый сигнал представляет собой излучение в гелиевой полосе ЭМИЦ волн ( $f \leq f_{\text{He}+}$ ). В интервале 01-02 UT спутник DMSP F-17 зарегистрировал локализованную область свечения (высыпаний заряженных частиц) на широте, которой соответствует  $f_{\text{He}+} = 3.8$  Гц. С этим источником, вероятно, ассоциируются интенсивные пульсации на частотах 2-3 Гц, которые регистрировались в интервале 01:10-02:45 UT. Эти пульсации также можно отнести к гелиевой полосе. С 02 до 03 UT было несколько пролетов POES, на которых были зарегистрированы высыпания из области остаточного плюма. Соответствующие гирочастоты  $f_{\text{He}^+}$  лежат в диапазоне 1.9–2.6 Гц, и пульсации на частотах 1-1.5 Гц соответствуют гелиевой полосе излучения от этих источников. В интервале 03-04 UT высыпания были зарегистрированы только спутником DMSP F-17 (соответствующая гирочастота иона гелия  $f_{\rm He^+} \sim 3$  Гц). Этот источник может отвечать за часть спектра излучения в полосе 1-2 Гц (эта полоса очень неоднородная по интенсивности, что указывает на действие нескольких источников). С 04 до 05 UT зарегистрированы высыпания как из окрестности плазмопаузы ( $f_{\text{He}^+} = 3.3 \, \Gamma_{\text{H}}$ ), так и из области остаточного плюма ( $f_{\text{He}^+} = 1.9-2.5$ ). Источники, связанные с этими высыпаниями, могут быть ответственны за излучения в гелиевой полосе, формирующие отдельные части спектра наблюдавшихся в это время пульсаций. С 05 до 06 UT и с 06 до 07 UT наблюдалось по одному случаю высыпаний протонов из окрестности плазмопаузы ( $f_{\text{He}+} = 3.1$  и 3.5 Гц, соответственно). Можно полагать, что гелиевая полоса излучения этих источников соответствует наблюдавшейся с 05 до 07 UT полосе пульсаций с растущей частотой.

Источники за плазмопаузой ассоциируются с гирочастотами  $f_{\text{He}^+} < 1$  Гц (обозначены крестика-

ми). Поскольку сигнал ниже этих гирочастот не наблюдается, то излучение от этих источников, возможно, генерируется в водородной полосе, т.е.,  $f_{\text{He}^+} < f < f_{\text{H}^+}$ , где  $f_{\text{H}^+} = 4f_{\text{He}^+} -$  гирочастота протона. С 02 до 04 UT такие источники могут дать вклад в пульсации, которые наблюдаются на частотах 1-2 Гц. В интервале 06-08 UT значения  $f_{\rm H+}$ , рассчитанные по модели дипольного магнитного поля Земли, не превышают значений частот наблюдавшихся в это время пульсаций. Заметим. однако, что источники "внеплазмосферных" высыпаний в этом временном интервале находятся на дневной стороне на относительно больших *L*-оболочках (табл. 2), где магнитное поле может существенно отличаться от дипольного за счет сжатия магнитосферы солнечным ветром. Соответственно, гирочастоты в реальном магнитном поле должны быть больше тех, что рассчитаны по дипольному полю.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Из приведенного рассмотрения ясно, что сложный вид спектра пульсаций Pc1 в этом событии связан с наличием множественных источников на разных широтах и долготах (рис. 3, табл. 1 и 2). Сходный вывод был сделан в работе [12], где также рассматривался случай наблюдения Pc1 со сложной динамикой спектра.

Вариации гирочастоты  $f_{\text{He}+}$  для всплесков в потоках захваченных протонов в окрестности плазмопаузы (кружки на рис. 3) согласуются с вариациями гирочастоты, определенной по наблюдениям всплесков высыпаний (звездочки и треугольники), и дополняют их. Временная вариация значений  $f_{\text{He}+}$  для всех всплесков потоков (захваченных и высыпающихся) протонов в районе плазмопаузы согласуется с вариацией верхней огибающей спектра пульсаций Рс1. Это подтверждает предположение, что всплески в потоках захваченных протонов можно отнести к признакам ионно-циклотронной неустойчивости.

На рис. 3 показаны только самые низкоширотные всплески потоков захваченных частиц. Подобные всплески наблюдаются в этом событии и на более высоких широтах (рис. 1), где, в то же самое время, наблюдаются и всплески высыпаний. Таким образом, перемежение слабой и сильной диффузии характерно не только для плазмопаузы, но, например, и для области остаточного плюма.

Из сопоставления частоты пульсаций Pc1 с гирочастотой  $f_{\text{He}^+}$  для источников из области плазмопаузы и остаточного плюма следует, что пульсации генерируются в области гелиевой полосы циклотронной неустойчивости. Для источников, находящихся вне плазмосферы, излучение в гелиевой полосе не наблюдается, но возможно в водородной полосе. Это согласуется с выводами работы [13], в которой показано, что гелиевая полоса ЭМИЦ волн наблюдается в областях, где концентрация холодной плазмы существенно больше, чем в областях наблюдения водородной полосы.

### выводы

Сложный вид спектра Pc1 в рассмотренном событии объясняется множественностью источников ЭМИЦ волн в магнитосфере. Эти источники располагаются в окрестности плазмопаузы (L = 3.0-3.3); в области остаточного плюма (L = 3.3-4.0); и за плазмосферой (L > 5), в области низкой плотности холодной плазмы. ЭМИЦ волны (пульсации Pc1), имеющие источники в областях с повышенной концентрацией холодной плазмы, относятся к излучениям в гелиевой полосе. Излучения от источников за плазмосферой, возможно, принимают участие в генерации пульсаций в водородной полосе.

Работа по анализу данных POES и наземных наблюдений выполнена в рамках темы государственного задания АААА А 18-118012490100-7 и поддержана Акалемией Финлянлии (проект № 330783). Авторы благодарят NOAA за данные спутников POES, полученные через систему CDAWeb (https:// cdaweb.gsfc.nasa.gov) и Лабораторию прикладной физики Университета Джона Хопкинса за предоставление данных DMSP/SSUSI (http://ssusi.jhuapl.edu). Работа по моделированию плазмопаузы поддержана NASA (проект RBSP-ECT миссии Van Allen Probes), программой гелиофизических исследований NASA (проект NNX07AG48G), и программой моделирования геокосмической окружающей среды Национального научного фонда США (проект АТМ0902591). Использованные при моделировании 5-минутные данные OMNI предоставлены Дж. Х. Кингом и Н. Папиташвили (AdnetSystems, NASA GSFC) через CDAWeb.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. // Space Sci. Rev. 1998. 83. P. 435.
- Yahnin A.G., Yahnina T.A. // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 1690.
- 3. Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Семенова Н.В. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 5. С. 599; Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V. et al. // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. No. 5. Р. 577.
- 4. *Evans D.S., Greer M.S.* Polar orbiting environmental satellite space environment monitor 2: instrument description and archive data documentation, NOAA Tech. Memo. OAR SEC-93, Boulder: NOAA, 2000.
- 5. Яхнина Т.А., Яхнин А.Г., Кангас Й., Маннинен Ю. // Косм. исслед. 2002. Т. 40. № 3. С. 230; Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J. // Cosm. Res. 2002. V.40. No. 3. P. 213.
- 6. *Сафаргалеев В.В., Терещенко П.Е.* // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 3. С. 301; *Safargaleev V.V., Tereshchenko P.E.* // Geomagn. Aeron. V. 59. Р. 281.
- Фейгин Ф.З., Клейменова Н.Г., Хабазин Ю.Г., Малышева Л.М. // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 3. С. 316; Feygin F.Z., Kleimenova N.G., Khabazin Y.G., Malysheva L.M. // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. P. 296.
- Goldstein J., Thomsen M.F., DeJong A. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 4706.
- Goldstein J., De Pascuale S., Kletzing C. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 7464.
- Paxton L. Morrison J., Zhang Y.D. et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4485. P. 338.
- Zhou S., Luan X., Pierrard V., Han D. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2019. V. 124. P. 8416.
- 12. Ермакова Е.Н., Демехов А.Г., Яхнина Т.А. и др. // Изв. вузов. Радиофиз. 2019. Т. 62. № 1. С. 1; Егтаkova E.N., Demekhov A.G., Yahnina T.A. et al. // Radiophys. Quant. Electron. 2019. V. 62. Р. 1.
- Kim G.-J., Kim K.-H., Lee D.-H. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 9443.

## Localization of sources of geomagnetic Pc1 pulsations

T. A. Yahnina<sup>a</sup>, A. G. Yahnin<sup>a</sup>, T. Raita<sup>b</sup>, J. Manninen<sup>b</sup>, J. Goldstein<sup>c, d</sup>

<sup>a</sup>Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

<sup>b</sup>Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, FIN-99600 Finland

<sup>c</sup>Southwest Research Institute, Space Science and Engineering Division, San Antonio, TX 78238 USA

<sup>d</sup>University of Texas at San Antonio, Department of Physics and Astronomy, San Antonio, TX 78238 USA \*e-mail: tyahnina@gmail.com

Using measurements of proton fluxes on board low-orbiting satellites during 00-08 UT on 11 September 2017, the location of the ion-cyclotron instability development regions relatively to the plasmasphere is analyzed. The position and dynamics of these regions allow us to explain the structure and dynamics of the geomagnetic pulsation spectrum in the range 0.2-4 Hz observed on the ground.