

УДК 550.385

## НЕОБЫЧНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ $Pc1$ В СЕНТЯБРЕ 2017 ГОДА

© 2019 г. Ф. З. Фейгин<sup>1</sup>, \*, Н. Г. Клейменова<sup>1</sup>, Ю. Г. Хабазин<sup>1</sup>, Л. М. Мальшева<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

\*e-mail: feygin@ifz.ru

Поступила в редакцию 13.01.2019 г.

После доработки 14.01.2019 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Представлены результаты анализа необычного события в частотном диапазоне геомагнитных пульсаций  $Pc1$ , обнаруженного в конце 24-го цикла солнечной активности. Это событие зарегистрировано 11 сентября 2017 года на поздней фазе восстановления сильной магнитной бури, которая произошла 07–08 сентября 2017. Динамический спектр пульсаций представлял собой каскад коротких “скачущих” серий “жемчужин” с уменьшающейся центральной частотой. На земной поверхности  $Pc1$  пульсации наблюдались в раннем утреннем секторе с подобными сложными динамическими спектрами одновременно в большом интервале широт, от средних до авроральных. На скандинавском профиле индукционных магнитометров наибольшая амплитуда  $Pc1$  пульсаций отмечалась на самой низкоширотной обсерватории профиля в NUR ( $L = 3.3$ ). Представлены аналитические выражения, позволяющие объяснять изменения центральной частоты и ширины спектра  $Pc1$  пульсаций. Показано, что понижение центральной частоты спектра  $Pc1$  пульсаций от 2.5 Гц до 1.1 Гц может быть результатом перемещения плазмопаузы от  $L \sim 3.3$  до  $L \sim 4.2$ . Предложена интерпретация, основанная на нелинейном процессе распада ЭМИЦ волны на ЭМИЦ волну меньшей частоты и ионный звук.

DOI: 10.1134/S0016794019030155

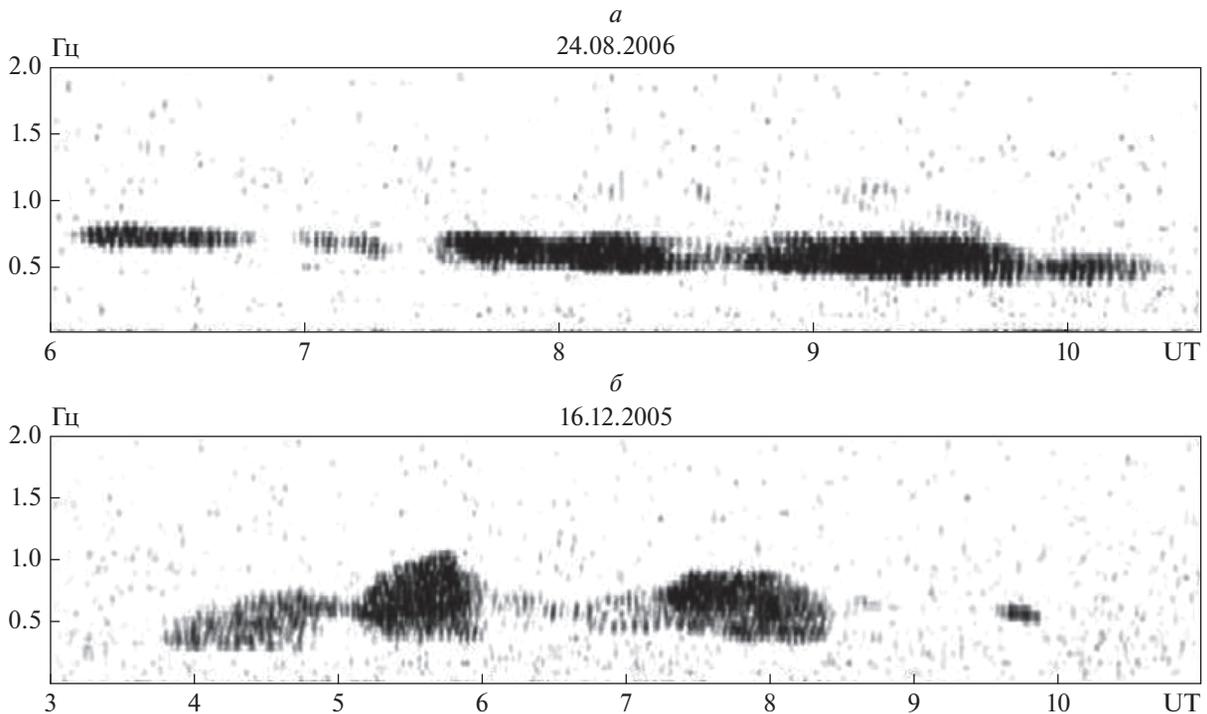
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем физики магнитосферной плазмы является изучение взаимодействия протонов кольцевого тока, или внешнего радиационного пояса Земли с альвеновскими волнами, которые наблюдаются также в форме  $Pc1$  геомагнитных пульсаций. Геомагнитные пульсации  $Pc1$  (“жемчужины”) представляют собой наиболее яркий тип электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в полосе частот 0.5–2.0 Гц. Серии пульсаций  $Pc1$  (“жемчужины”) представляют собой набор волновых пакетов альвеновских волн, распространяющихся вдоль силовой линии между сопряженными точками [Gendrin and Troitskaya, 1965; Троицкая, Гульельми, 1969; Фейгин и Якименко, 1969].

Результаты исследований этих пульсаций представлены в ряде обзоров, например, [Gulielmi and Pokhotelov, 1994; Kangas et al., 1998; Demekhov, 2007]. Статистические результаты анализа морфологических характеристик геомагнитных пульсаций  $Pc1$  по многолетним данным наблюдений на спутниках (THEMIS, CHAMP, Cluster) приведены в нескольких недавних работах, например, [Min et al., 2012; Park et al., 2013; Lin et al., 2014].

Известно, что возбуждение  $Pc1$  пульсаций во внутренней магнитосфере обусловлено гирорезонансным взаимодействием ЭМИЦ волн с энергичными протонами. В результате резонансного взаимодействия  $Pc1$  колебаний с анизотропными протонами происходит изотропизация частиц и их высыпание в ионосферу. Подтверждение этой идеи нашло отражение в работах [Yahnina et al., 2000; Yahnin et al., 2007], где по наблюдениям на спутниках IMAGE, NOAA был обнаружен новый тип протонных сияний (*proton spots*), связанных с протонными высыпаниями в области плазмопаузы. Авторы показали хорошее согласие между появлением/исчезновением высыпания частиц (*proton spots*) и началом/концом серий  $Pc1$ . Таким образом, было установлено, что *proton spots* являются отражением физических процессов в экваториальной области магнитосферы Земли (взаимодействие волн и частиц в результате развития циклотронной неустойчивости), приводящих к интенсивному рассеянию энергичных протонов в конус потерь.

Важную роль в генерации и распространении  $Pc1$  играет плазмопауза [Троицкая, Гульельми, 1969; Гульельми, 1979; Mazur and Potapov, 1983; Dmitrienko and Mazur, 1985], так как в области



**Рис. 1.** Динамические спектры  $Pc1$  пульсаций в спокойных (24.08.2006) – (а), и возмущенных (16.12.2005) – (б) в условиях обс. Соданкюля ( $L = 5.3$ ).

плазмопаузы существуют наиболее благоприятные условия для усиления ионно-циклотронных волн и их распространения вдоль силовых линий. Это подтверждено экспериментально, например, по данным спутниковых наблюдений [Park et al., 2013], где показано, что максимум появления  $Pc1$ , наблюдается на геомагнитных широтах  $55^\circ$ – $60^\circ$ , т.е. на широтах типичного расположения плазмопаузы.

Было установлено [Фейгин и др., 2015], что ширина динамического спектра  $Pc1$  пульсаций контролируется уровнем геомагнитной активности. Так, в магнитоспокойных условиях при  $Kp < 2$ , как правило, наблюдались низкочастотные  $Pc1$  пульсации с центральной частотой порядка  $0.5$ – $0.7$  Гц в узкой частотной полосе  $\sim 0.2$ – $0.4$  Гц. В более возмущенных условиях центральная частота  $Pc1$  пульсаций становится значительно выше ( $\sim 1.0$ – $1.2$  Гц), а ширина спектра составляет  $\sim 0.5$ – $0.7$  Гц. На рисунке 1 показаны примеры типичных динамических спектров  $Pc1$  пульсаций в спокойных (рис. 1а) и возмущенных (1б) условиях.

Спектрально-временные характеристики  $Pc1$  пульсаций очень многообразны, иногда встречаются весьма необычные случаи, обусловленные нелинейными эффектами в генерации ЭМИЦ волн. Так, в восстановительную фазу умеренных магнитных бурь нами были обнаруженные  $Pc1$  события со спектром, расширяющимся в сторону как низких, так и высоких частот [Фейгин и др.,

2009], спектрограммы отдельных событий иногда по форме напоминали летящих гусей.

Еще один необычный случай  $Pc1$  пульсаций со сложной спектрально-временной структурой наблюдался на скандинавском профиле индукционных магнитометров 11 сентября 2017 г. в позднюю восстановительную фазу магнитной бури 7–8 сентября 2017 г. [Фейгин и др., 2018]. Это была одна из наиболее сильных магнитных бурь в конце спада 24-го цикла солнечной активности [Клейменова и др., 2018]. В отличие от классической серии  $Pc1$  со слабым изменением центральной частоты в динамическом спектре волн, новое нетипичное  $Pc1$  событие имело необычный вид каскада коротких “скачущих” серий “жемчужин”.

Это  $Pc1$  событие недавно обсуждалось в работе [Сафаргалеев и Терещенко, 2019] по данным наблюдений в субавроральной обс. ИЗМИРАН Красное озеро ( $60.5^\circ$  N,  $29.7^\circ$  E,  $L \sim 3.5$ ) и авроральной обс. ПГИ Верхнетуломская ( $68.6^\circ$  N,  $31.7^\circ$  E,  $L \sim 5.5$ ). Сопоставление динамики пульсаций  $Pc1$  с параметрами межпланетной среды позволило авторам прийти к выводу, что изменение несущей частоты и интенсивности  $Pc1$  связано со скачком в плотности солнечного ветра.

Однако необычно сложная форма динамического спектра этого  $Pc1$  события пока не получила теоретической интерпретации. В данной работе обсуждаются возможные теоретические представ-

ления, объясняющие сложный динамический спектр  $Pc1$  пульсаций.

## 2. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрим морфологические особенности всплеска геомагнитных пульсаций  $Pc1$ , наблюдаемого в конце восстановительной фазы сильной магнитной 7–8 сентября 2017 г., в главную фазу которой  $Kp$ -индекс, характеризующий планетарную геомагнитную активность, был  $Kp = 9$  (рис. 2а), а  $\Sigma H$ -индекс, характеризующий интенсивность кольцевого тока, достигал значений  $\sim 150$  нТл (рис. 2б). Некоторые наиболее геоэффективные параметры межпланетного магнитного поля (ММП), а именно  $B_y$  и  $B_z$  ММП, а также скорость ( $V$ ) и динамическое давление ( $P_{sw}$ ) солнечного ветра приведены на рис. 2б по данным OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Перед бурей магнитная активность была повышенной ( $Kp \sim 2-3$ ), однако в восстановительную фазу бури (9 сентября)  $Kp$ -индекс упал до нуля. К сожалению, в этот интервал времени отсутствуют данные базы OMNI, поэтому не известно, что происходило в это время в межпланетной среде. Однако, вариации  $Kp$ -индекса, приведенные на рис. 2а, свидетельствуют о резком возрастании геомагнитной активности во второй половине 10 сентября, что привело к развитию суббуревой возмущенности в ночном секторе магнитосферы. Это четко видно на магнитограммах скандинавского профиля магнитометров IMAGE ([www.space.fmi.fi](http://www.space.fmi.fi)), находящегося в это время в ночном секторе. На рисунке 3 приведены магнитограммы некоторых станций профиля IMAGE. Видно, наиболее интенсивные суббури наблюдались в obs. SOD с 23 UT 10 сентября до 01 UT 11 сентября. Амплитуда суббури резко убывала с уменьшением широты, и в обсерватории NUR магнитных возмущений уже не отмечалось. Необычные геомагнитные  $Pc1$  пульсации в это время наблюдались и на среднеширотной obs. Борок ( $L \sim 3.1$ ) [<http://geo-data.borok.ru/database>]. Вполне вероятно, что именно в эту суббурю в магнитосфере и сложились условия для последующей генерации необычного всплеска  $Pc1$  геомагнитных пульсаций 11 сентября в 01–06 UT (рис. 4).

Геомагнитные пульсации  $Pc1$  исследовались по данным наблюдений на скандинавской сети индукционных магнитометров (<http://www.sgo.fi>), из которой в нашей работе использовались данные 3-х станций, международные коды, географические координаты и параметр Мас-Илвайна ( $L$ ) которые указаны в скобках: Соданкюля (SOD, 67.4°, 26.4° E,  $L = 5.3$ ), Оулу (OUL, 65.1°, 25.9° E,  $L = 4.5$ ) и Нурмиярви (NUR, 60.5°, 24.7° E,  $L = 3.3$ ). На рисунке 4 показаны динамические спектры (спектрограммы)  $Pc1$  пульсаций на этих станциях. Видно, что интенсивность пульсаций умень-

шалась с увеличением широты станции, и наиболее интенсивные  $Pc1$  наблюдались в NUR ( $L = 3.3$ ). Заметим, что на сайте (<http://www.sgo.fi>) спектрограммы пульсаций даются в цветном изображении, перевод которого в черно-белый вариант приводит к большой потере наглядности и информативности, некоторые мелкие детали спектра вообще становятся неразличимыми.

Динамический спектр этого  $Pc1$  события (рис. 4) выглядит как суперпозиция двух различных эмиссий. Первая из них напоминает классические  $Pc1$  пульсации, продолжающиеся около 4 ч с слегка увеличивающейся центральной частотой (от  $\sim 1.4$  до  $\sim 1.7$  Гц), и с относительно большой шириной частотного спектра (около 0.6 Гц). По нашим представлениям [Фейгин и др., 2015] геомагнитные пульсации  $Pc1$  с таким спектром обычно генерируются в районе плазмопаузы. Оценим возможное положение плазмопаузы ( $L_{pp}$ ) по эмпирической модели [Moldwin et al., 2002]:  $L_{pp} = 5.39 - 0.382 Kp(\max)$ , где  $Kp(\max)$  максимальное значение индекса  $Kp$  за предшествующие 12 ч. Тогда, в соответствии с рис. 2а, во время генерации  $Pc1$  волн, плазмопауза находилась, предположительно, на  $L \sim 4.2$ .

Однако, как видно на рис. 4, максимальная интенсивность  $Pc1$  колебаний наблюдалась на более низких широтах в NUR ( $L \sim 3.3$ ). Мы полагаем, что генерация этой более низкочастотной и узкополосной серии  $Pc1$  происходила не вблизи этой (“новой”) плазмопаузы, а связана с так называемой “старой” плазмопаузой, т.е. той, которая сформировалась в предшествующий спокойный период ( $Kp = 0$ ) и находилась, соответственно, на  $L \sim 5$ , а, возможно, и дальше.

Вторая, более высокочастотная серия  $Pc1$  эмиссий началась часом позднее (в  $\sim 01:30$  UT) с очень резким началом на довольно высокой центральной частоте, уменьшающейся в дальнейшем с  $\sim 2.5.0$  Гц до  $\sim 1.1$  Гц в виде каскада коротких серий “жемчужин” с широким спектром  $\sim 0.8$  Гц. Каждая такая серия начиналась на относительно высокой центральной частоте, затем скачком перемещалась на более низкую центральную частоту. Во время этих уменьшающиеся по частоте пакетов  $Pc1$  волн в солнечном ветре наблюдалось быстрое скачкообразное уменьшение динамического давления ( $P_{sw}$ ) с 6–2 нПа (рис. 5), что, вероятно, должно привести к удалению плазмопаузы к более высоким  $L$  оболочкам. Ночная суббуря (рис. 3), наблюдаемая перед рассматриваемым событием  $Pc1$ , обеспечила инжекцию дополнительных заряженных частиц из хвоста магнитосферы.

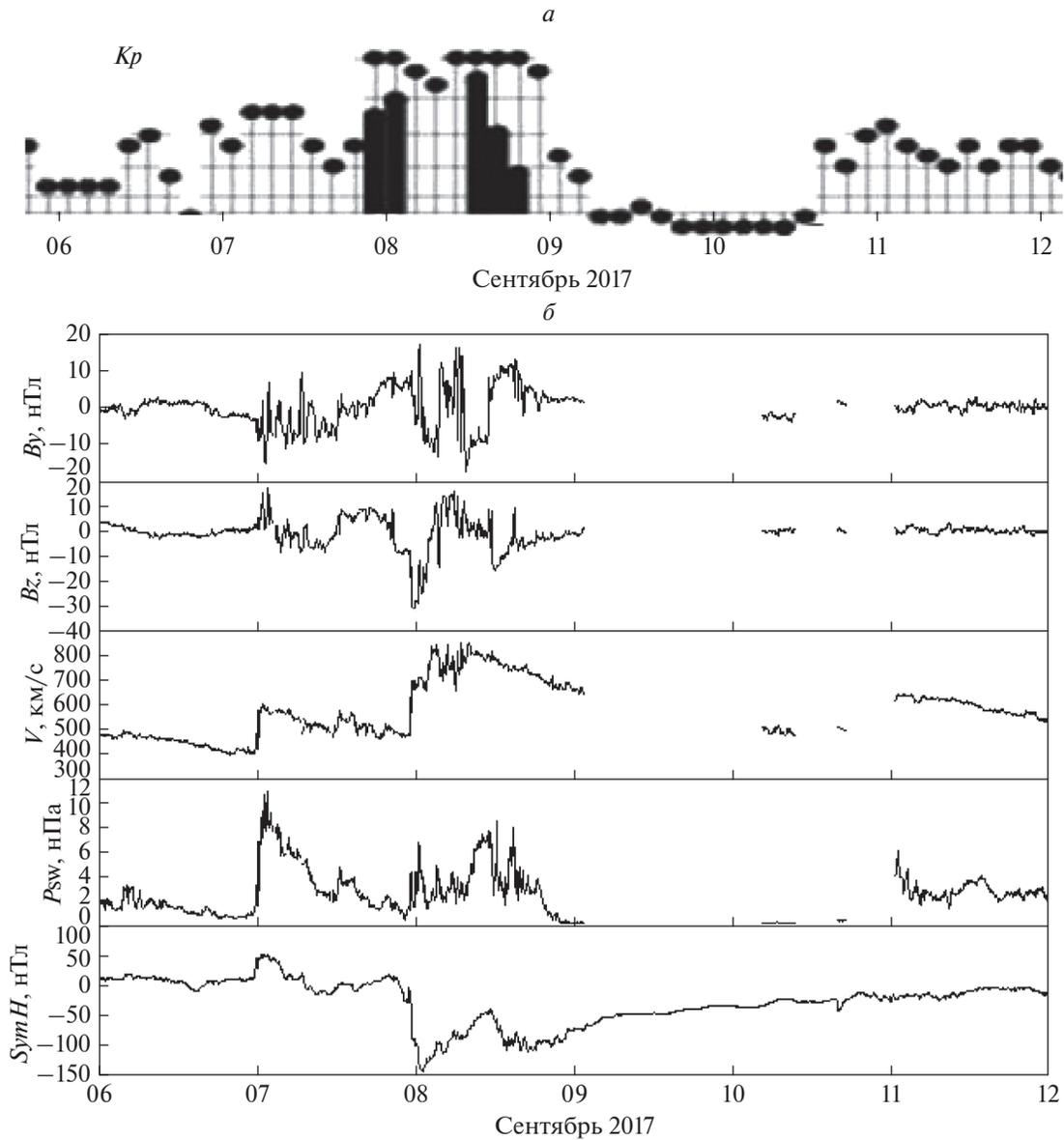


Рис. 2. (а) Kp-индекс 06–11.09.2017, (б) данные OMNI с 5-мин. разрешением 06–12.09.2017.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Серии пульсаций  $Pc1$  (жемчужины) представляют собой набор волновых пакетов ЭМИЦ волн, распространяющихся вдоль силовой линии между сопряженными точками. Линейный процесс взаимодействия ЭМИЦ волн с энергичными анизотропными протонами в процессе многократного пересечения источника генерации приводит к увеличению амплитуд волн. При достижении определенной амплитуды возможен распад ЭМИЦ волны, распространяющейся вдоль силовой линии, на ионный звук и ЭМИЦ волну меньшей частоты [Фейгин, 1987]. Такое нелинейное трехволновое взаимодействие было рассмотрено

в работе [Галеев и Ораевский, 1962]. При наличии затухания в системе и многократном распространении волн вдоль силовой линии между сопряженными ионосферами “материнский” сигнал постепенно затухает. В то же время “дочерний” волновой пакет усиливается во время пересечений области источника и при достижении определенной амплитуды вновь излучает ионный звук и ЭМИЦ волны более низкой частоты, обеспечивая генерацию очередной серии  $Pc1$  сигналов, но с меньшей частотой по отношению к предыдущим сериям.

Такой нелинейный процесс приводит к образованию каскада серий с уменьшающейся центральной частотой. Имевшаяся вначале процесса

10.09.2017–11.09.2017

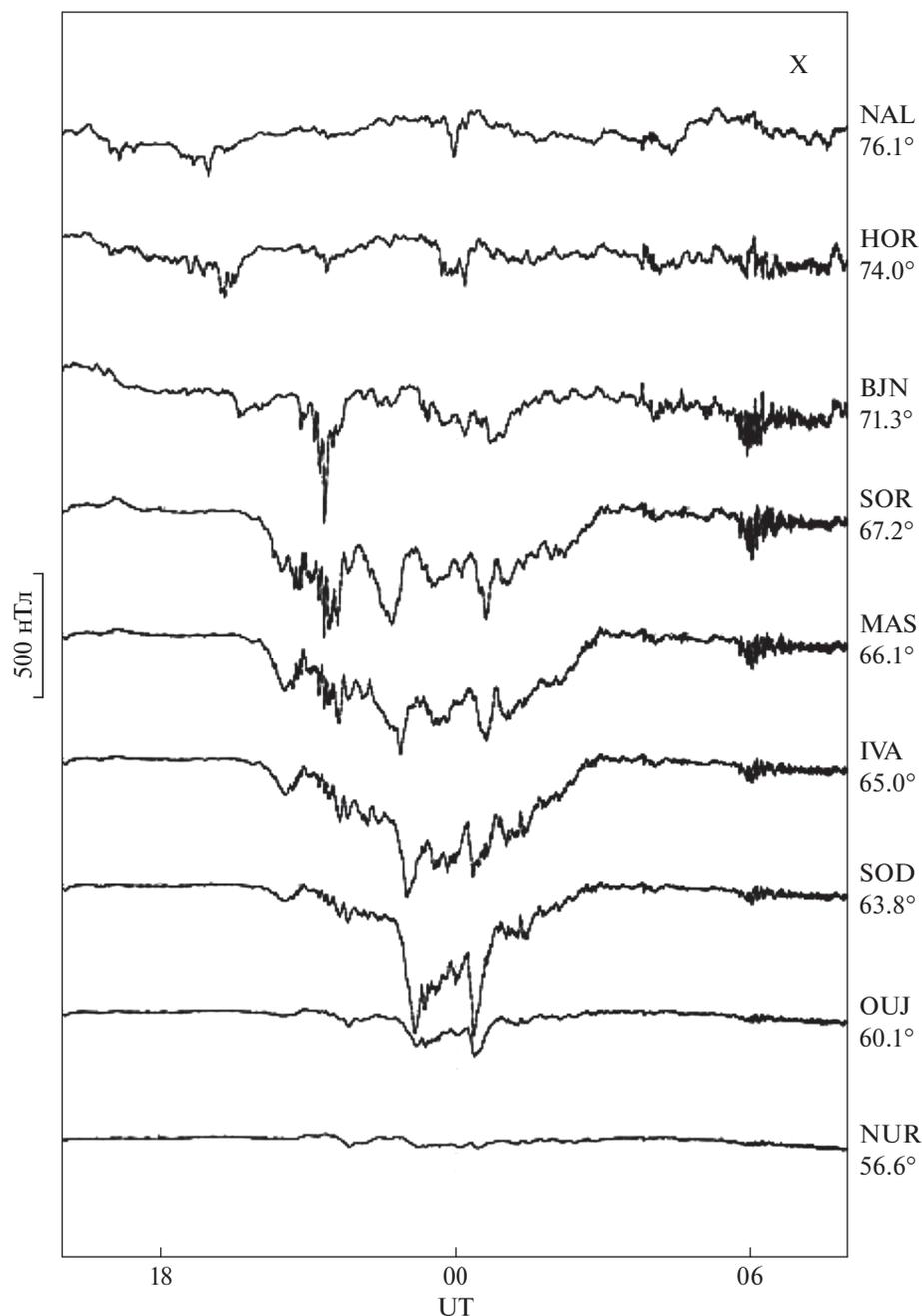


Рис. 3. Магнитограммы станций профиля IMAGE 10–11.09.2017.

анизотропия функции распределения с течением времени из-за квазилинейной релаксации также будет усиливать волны в более низкочастотной области спектра [Feugin and Kurchashov, 1975]. Численные оценки, проведенные в работе [Фейгин, 1987], подтверждают возможность существования описанного выше нелинейного процесса. Такая интерпретация позволяет объяснить наблюдаемую спектральную структуру  $Pc1$  колебаний 11 сентября 2017 г. На рисунке 4 можно видеть

каскадную серию  $Pc1$  пульсаций в частотном диапазоне  $\sim 1.5\text{--}3.0$  Гц.

Кроме того, общее “покраснение” (понижение центральной частоты) спектра  $Pc1$  пульсаций можно объяснить также линейной теорией резонансного взаимодействия ЭМИЦ волн с горячими анизотропными протонами в магнитосфере Земли, например, [Kangas et al., 1998]. Определим параметры, которые контролируют изменение

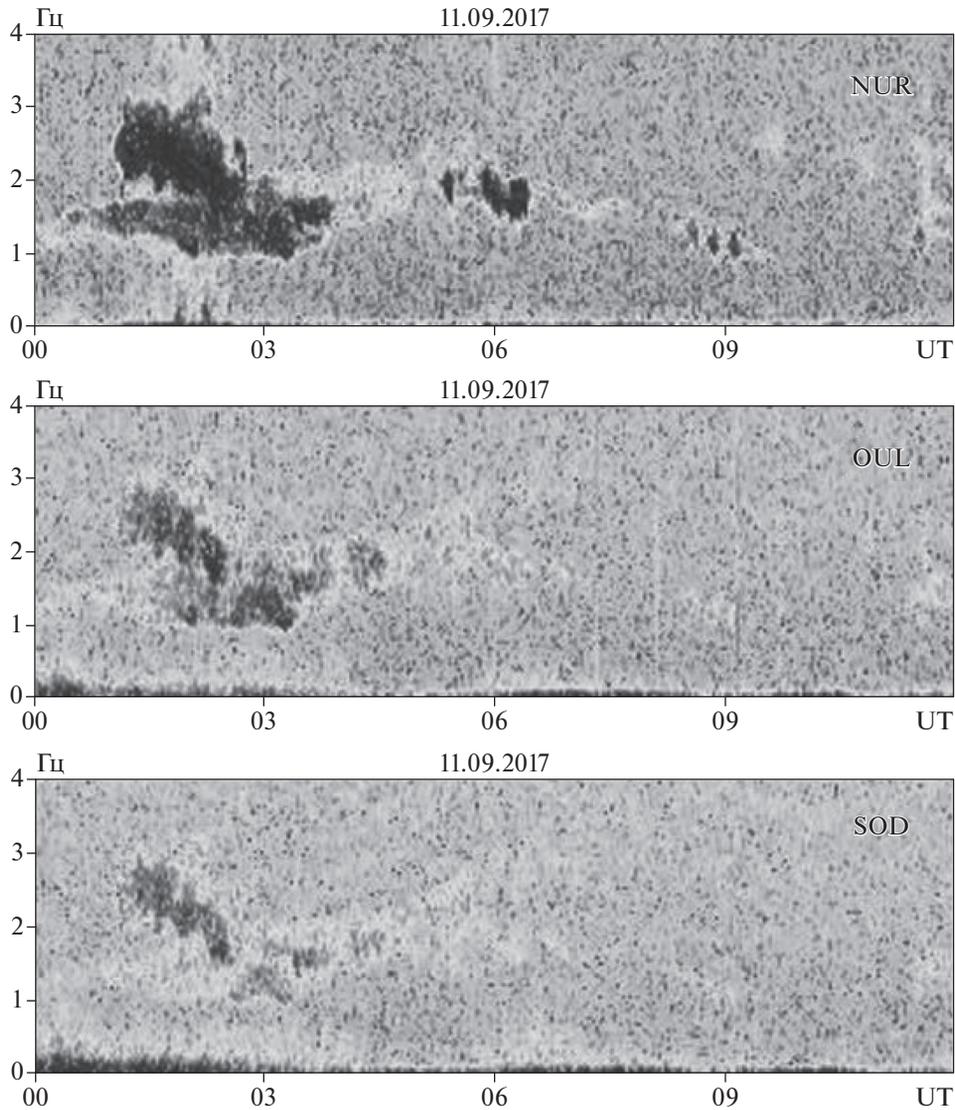


Рис. 4. Спектрограммы  $Pc1$  геомагнитных пульсаций в SOD–OUL–NUR 11.09.2017.

центральной частоты  $Pc1$  пульсаций. Максимальное усиление ЭМИЦ волн происходит на частоте [Feugin and Yakimenko, 1971; Gendrin et al., 1971]:

$$f_0 \approx f_p c_A / v_T, \quad (1)$$

где  $f_p$  – экваториальная гирочастота протонов,  $c_A$  – альвеновская скорость и  $v_T$  – тепловая скорость протонов. В соответствии с уравнением (1) центральная частота  $Pc1$  пульсаций зависит от значения  $L$ -параметра. Отметим, что  $f_p \propto B$ ,  $c_A \propto B/\sqrt{n}$ , где  $n$  – эффективная концентрация ионов. Для адиабатических движений тепловая скорость протонов  $v_T \propto \sqrt{B}$ . С другой стороны, эффективная концентрация ионов в дневной магнитосфере в области плазмосферы меняется как  $n \propto L^{-2}$  [Carpenter and Anderson, 1992]. Осно-

ываясь на дипольной геометрии, интенсивность магнитного поля изменяется как  $B \propto L^{-3}$ . Таким образом, мы получаем следующее выражение для оценки центральной частоты  $Pc1$  пульсаций:

$$f_0 \propto L^{-3.5}. \quad (2)$$

Известно, что наиболее благоприятная область генерации  $Pc1$  локализована в окрестности плазмопаузы. В течение рассматриваемого временного интервала из-за сильного снижения давления солнечного ветра (рис. 5) с 6 nPa–2 nPa, плазмопауза могла переместиться на более высокие  $L$ -оболочки. В соответствии с этим, мы предполагаем, что источник пульсаций  $Pc1$  в обсуждаемом событии также сдвигается на более высокие  $L$ -оболочки, т.е. в область с уменьшенными магнитным полем и плотностью фоновой плазмы,

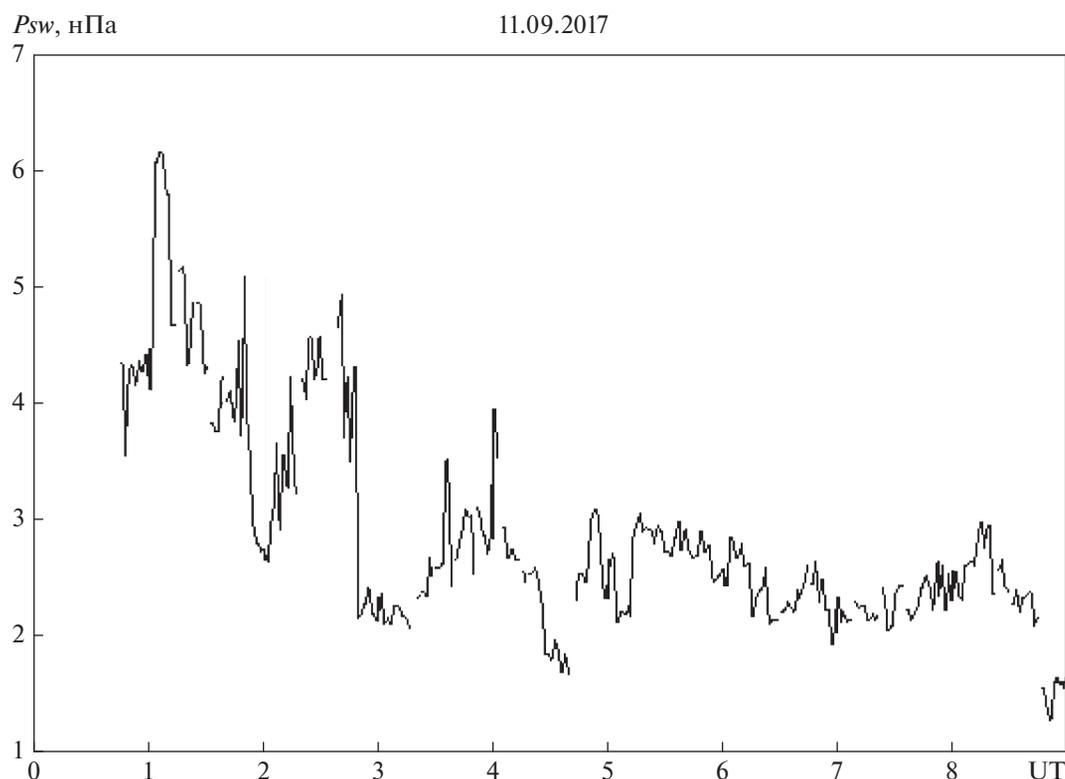


Рис. 5. Динамическое давление солнечного ветра 11.09.2017.

входящими в уравнение (1). Оба этих параметра контролируют частоту возбуждающихся  $Pc1$  волн. Однако влияние магнитного поля более значимо, чем изменение плотности плазмы. Такое движение источника может привести к уменьшению центральной частоты  $Pc1$ , как это наблюдалось в интервале 01–03 UT (рис. 4).

Оценим возможное смещение источника генерации  $Pc1$  волн по сдвигу центральной частоты более высокочастотной серии геомагнитных пульсаций (рис. 4). Максимальная интенсивность этих  $Pc1$  колебаний на скандинавском профиле отмечалась на станции NUR ( $L \sim 3.3$ ). На рисунке 4 видно, что центральная частота  $Pc1$  уменьшалась со временем от 2.5 до 1.1 Гц. Исходя из предположения, что область генерации волн сначала была расположена вблизи  $L \sim 3.3$ , и затем переместилась на большие  $L$  оболочки, оценим такое возможное перемещение с использованием формулы (2). Оценочные расчеты по этой формуле показывают, что уменьшение центральной частоты волн с 2.5 до 1.1 Гц может быть результатом перемещения области генерации от  $L \sim 3.3$  до  $L \sim 4.2$ . Эта оценка хорошо совпадает с приведенной выше оценкой положения плазмопаузы ( $L_{pp}$ ) по эмпирической модели [Moldwin et al., 2002], показывающей, что плазмопауза, действительно, могла, находиться на  $L \sim 4.2$ .

Другой особенностью рассматриваемых событий являются довольно широкие динамические спектры пульсаций (рис. 4). Рассмотрим параметры, которые контролируют ширину динамического спектра эмиссий. В соответствии с результатами работ [Feugin and Yakimenko, 1971; Gendrin et al., 1971], частотная ширина спектра  $Pc1$  пульсаций контролируется магнитным полем и плотностью фоновой плазмы в вершине силовой линии и может быть оценена как

$$\Delta f \propto B^{1/2} n^{3/2} \quad (3)$$

или

$$\Delta f \propto L^{-4.5}. \quad (4)$$

Мы предполагаем, что в начале обсуждаемого события генерация волн на центральной частоте  $\sim 2.5$  Гц происходила в окрестности  $L \sim 3.3$ , т.е. в области относительно большого магнитного поля и плотности холодной плазмы. Следовательно, согласно формулам (3) и (4) полоса возбуждаемых частот в это время была относительно широкой, порядка 0.8 Гц (рис. 4).

Впоследствии, в результате уменьшения динамического давления солнечного ветра (рис. 5) и некоторого уменьшения геомагнитной активности (рис. 2a), плазмосфера расширилась, и плазмопауза передвинулась к более высоким  $L$ -обо-

лочкам ( $L \sim 4.2$ ), т.е. в область с пониженным магнитным полем и меньшей плотностью фоновой плазмы. Тогда, согласно выражениям (3, 4), спектральная ширина  $Pc1$  пульсаций должна уменьшиться, что и наблюдалось (рис. 4).

Таким образом, возможное теоретическое объяснение спектрально-временных особенностей геомагнитных пульсаций  $Pc1$ , зарегистрированных 11 сентября 2017 года в позднюю восстановительную фазу сильной магнитной бури может включать как эффект развития нелинейных процессов в магнитосфере, так и чисто линейную теорию резонансного взаимодействия ЭМИЦ волн с анизотропными протонами в магнитосфере Земли в условиях снижения давления солнечного ветра. Так, довольно широкие динамические спектры  $Pc1$  пульсаций могут быть результатом спектрального уширения в процессе квазилинейного взаимодействия ЭМИЦ волн с энергичными анизотропными протонами [Фейгин и Якименко, 1969; Gendrin et al., 1971; Feugin and Kurchashov, 1975].

Предложенная выше интерпретация обсуждаемых необычных геомагнитных пульсаций  $Pc1$ , по-видимому, не является исчерпывающей. Так, например, в ней не учтено, что высыпание энергичных протонов в ионосферу изменяет характеристики ионосферы, что может привести к изменению как коэффициента отражения волн от ионосферы, так и коэффициента прохождения волн к земной поверхности. Эти эффекты, безусловно, могут повлиять на динамику спектра волн [Mursula et al., 2000; Demekhov, 2007; Yahnin, Yahnina, 2007].

#### 4. ВЫВОДЫ

1. В конце поздней стадии фазы восстановления магнитной бури 7–8 сентября 2017 года было обнаружено (11 сентября 2017 г.) необычная серия геомагнитных пульсаций  $Pc1$  с динамическим спектром в виде каскада коротких “скачущих” серий “жемчужин” с уменьшающейся центральной частотой.

2. На земной поверхности  $Pc1$  пульсации с похожими сложными динамическими спектрами наблюдались в раннем утреннем секторе одновременно в большом интервале широт, от средних до авроральных. На скандинавском профиле индукционных магнитометров наибольшая амплитуда  $Pc1$  пульсаций отмечалась на самой низкоширотной обсерватории профиля в NUR ( $L = 3.3$ ).

3. Предложена интерпретация сложного динамического спектра  $Pc1$  волн в виде каскада коротких серий “жемчужин” с уменьшающейся центральной частотой, основанная на нелинейном процессе распада ЭМИЦ волны на ЭМИЦ волну меньшей частоты и ионный звук. Показано, что

понижение центральной частоты спектра  $Pc1$  пульсаций с 2.5 Гц до 1.1 Гц может быть результатом перемещения плазмопаузы от  $L \sim 3.3$  до  $L \sim 4.2$ .

#### 5. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Программы № 12 Президиума РАН в рамках государственного задания института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

#### 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят доктора Торо Райта (обс. Соданкюля) за проведение и спектральный анализ наблюдений на скандинавской сети индукционных магнитометров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галеев А.А., Оравский В.Н. // О неустойчивости альфеновских волн. Докл. АН СССР, Т. 147. С. 71–73. 1962.
- Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука. 139 с. 1979.
- Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М. Большая магнитная буря 7–8 сентября 2017: Высокоширотные геомагнитные вариации и геомагнитные пульсации  $Pc5$  события // Геомагнетизм и аэрномия Т. 58. № 5. Р. 619–629. 2018. doi 10.1134/S0016794018050085
- Фейгин Ф.З., Якименко В.Л. Механизм генерации и развитие “жемчужин” при циклотронной неустойчивости внешней протонной зоны // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 9. С. 700–705. 1969.
- Фейгин Ф.З. О природе красно-фиолетовой асимметрии в рождении спутников “жемчужин” // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 27. № 6. С. 1037–1038. 1987.
- Фейгин Ф.З., Клейменова Н.Г., Хабазин Ю.Г., Прикнер К. Нелинейный характер ионно-циклотронных волн ( $Pc1$  пульсации) с расширяющимся динамическим спектром // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 3. С. 335–345. 2009.
- Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г., Клейменова Н.Г., Малышева Л.М., Райта Т. Ширина частотного спектра геомагнитных пульсаций  $Pc1$  в спокойных и возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55. № 2. С. 196–202. 2015.
- Фейгин Ф.З., Клейменова Н.Г., Малышева Л.М., Хабазин Ю.Г. Сложные эмиссии  $Pc1$  на поздней фазе восстановления сильной магнитной бури в сентябре 2017 // Proc. 41th Annual Seminar ‘Physics of auroral phenomena’, Apatity, 12–16 March 2018, с. 38–41. 2018.
- Сафаргалеев В.В., Терещенко П.Е. Пульсации герцового диапазона на фазе восстановления магнитной бури 7–8.09.2017 г. и связь их динамики с изменениями параметров межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 3. С. 301–315. 2019.
- Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физ. наук, Т. 97. С. 453–494. 1969.

- *Carpenter D.L., Anderson R.R.* An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.* V. 97. P. 1097–1108. 1992. doi 10.1029/91JA01548
- *Demekhov A.G.* Recent progress in understanding Pc1 pearl formation // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 69. P. 1609–1622. 2007.
- *Dmitrienko I.S., Mazur V.A.* On waveguide propagation of Alfvén waves at the plasmapause // *Planet. Space Sci.* V. 33. № 5. P. 471–477. 1985.
- *Feygin F.Z., Yakimenko V.L.* Appearance and development of geomagnetic Pc1 type micropulsations (“pearls”) due to cyclotron instability of proton belt // *Ann. Geophys.* V. 27. P. 49–55. 1971.
- *Feygin F.Z., Kurchashov Yu.P.* A quasilinear dynamics of Pc1 geomagnetic pulsations (Pearls) // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 26. P. 539–548. 1975.
- *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.
- *Guglielmi A., Pokhotelov O.* Nonlinear problems of physics of the geomagnetic pulsations // *Space Sci. Rev.* V. 65. P. 5–57. 1994.
- *Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O.* Morphology and physics of short period magnetic pulsations // *Space Sci. Rev.* V. 83. P. 435–512. 1998.
- *Lin R.L., Zhang J.C., Allen R.C. et al.* Testing linear theory of EMIC waves in the inner magnetosphere: Cluster observations // *J. Geophys. Res.* V. 119. P. 1004–1027. 2014. doi 10.1002/2013JA01954
- *Mazur V.A., Potapov A.S.* The evolution of pearls in the Earth’s magnetosphere // *Planet. Space Sci.* V. 31. P. 859–863. 1983.
- *Min K., Lee J., Keika K., Li W.* Global distribution of EMIC waves derived from THEMIS observations // *J. Geophys. Res.* V. 117. A05219, 2012. doi 10.1029/2012JA017515
- *Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., Amin R., Anderson R.R.* A new model of the location of the plasmapause: CRRES results // *J. Geophys. Res.* V. 107(A11). P. 1339, 2002. doi 10.1029/2001JA009211
- *Park J., Lühr H., Rauberg J.* Global characteristics of Pc1 magnetic pulsations during solar cycle 23 deduced from CHAMP data // *Ann. Geophys.* V. 31. P. 1507–1520. 2013.
- *Mursula K., Prikner K., Feygin F.Z., Braysy T., Kangas J., Kerttula R., Pollari P., Pikkarainen T., Pokhotelov O.A.* Non-stationary Alfvén resonator: New results on Pc1 pearls and IPDP events // *J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys.* V. 62. P. 299–309. 2000.
- *Perraut S., Gendrin R., Roux A., de Villedary C.* Ion cyclotron waves: direct comparison between groundbased measurements and observations in the source region // *J. Geophys. Res.* V. 89(A1). P. 195–202. 1984.
- *Yahnin A.G., Yahnina T.A.* Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 69. P. 1690–1706. 2007.
- *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U.* Subauroral proton spots visualize the Pc1 source // *J. Geophys. Res.* V. 112. A10223, 2007. doi 10.1029/2007JA012501
- *Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J.* Proton precipitation related to Pc1 pulsations // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. P. 3575–3578. 2000.