

## ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ДИАПАЗОНА 1–4 мГц (Pc5/Pi3) В МАГНИТОСФЕРНОМ ХВОСТЕ ПРИ РАЗНОМ УРОВНЕ ВОЗМУЩЕННОСТИ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

### GEOMAGNETIC PULSATIONS IN 1–4 mHz FREQUENCY RANGE (Pc5/Pi3) IN THE MAGNETOTAIL AT DIFFERENT LEVELS OF DISTURBANCES IN THE INTERPLANETARY MEDIUM

**Н.В. Ягова** 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, nyagova@ifz.ru*

**О.В. Козырева** 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, kozyreva@ifz.ru*

**Н.С. Носикова** 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, natanosik@yandex.ru*

*Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»,  
Москва, Россия*

**N.V. Yagova**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,  
Moscow, Russia, nyagova@ifz.ru*

**O.V. Kozyreva**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,  
Moscow, Russia, kozyreva@ifz.ru*

**N.S. Nosikova**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,  
Moscow, Russia, natanosik@yandex.ru  
National Research Nuclear University “MEPhI”,  
Moscow, Russia*

**Аннотация.** В работе исследуются параметры геомагнитных пульсаций диапазона 1–4 мГц (Pc5/Pi3) в хвосте магнитосферы при разных уровнях флуктуаций межпланетного магнитного поля и динамического давления солнечного ветра по данным измерений на спутниках Cluster в 2016 г. Особое внимание уделяется условиям «нулевой» возмущенности, когда амплитуды флуктуаций в межпланетной среде значительно меньше их средних значений. Как при возмущенных, так и при спокойных условиях наблюдаются волны различных пространственных масштабов, при этом частота появления крупномасштабных волн возрастает при невозмущенных внешних условиях. Амплитуда крупномасштабных волн, развивающихся в хвосте при низком уровне флуктуаций вне магнитосферы, составляет от долей до единиц нанотесла, а мощность приблизительно равно распределена между продольной и поперечными компонентами. Предположительно, эти волны являются собственными модами магнитосферного хвоста.

**Ключевые слова:** магнитосфера, геомагнитные пульсации, магнитосферный хвост.

**Abstract.** In this paper, we study parameters of geomagnetic pulsations in the 1–4 mHz frequency range (Pc5/Pi3) in the magnetotail, utilizing data obtained by Cluster satellites at different levels of fluctuations in the interplanetary magnetic field (IMF) and the solar wind dynamic pressure in 2016. Particular attention is given to the conditions of “zero” disturbance when amplitudes of fluctuations in the interplanetary medium are smaller compared to their typical values. Both under quiet and disturbed conditions, waves of different spatial scales are recorded, with the occurrence rate of large-scale waves increasing under undisturbed conditions. Amplitudes of the large-scale waves occurring in the magnetotail under low intensity of fluctuations outside the magnetosphere are from few tenths to a few nanoteslas (nT), and their power is approximately equal in longitudinal and transverse components. Presumably, these waves are magnetotail eigen-modes.

**Keywords:** magnetosphere, geomagnetic pulsations, magnetotail.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о соотношении индуцированного ответа магнитосферы на внешнее воздействие и активной генерации волновых и импульсных возмущений внутри магнитосферы относится к наиболее важным в магнитосферной физике.

Область долей хвоста магнитосферы и их ионосферных проекций — полярных шапок — характеризуется малыми (по сравнению с более активными областями полярного каспа и аврорального овала) амплитудами электромагнитных колебаний в диапа-

зоне единиц миллигерц. При этом из-за огромного объема магнитосферного хвоста, суммарная энергия этих колебаний не является малой. Размеры геомагнитного хвоста составляют десятки радиусов Земли ( $R_E=6370$  км) в поперечном и сотни — в продольном направлении. Значения альвеновской скорости в магнитосфере варьируют от нескольких сотен километров в секунду в плазменном слое и пограничных областях, таких как низкоширотный (LLBL) и высокоширотный (HLBL) пограничные слои, до нескольких тысяч километров в секунду в долях хвоста. Такие характерные размеры хвоста и альве-

новские скорости в нем делают возможным появление волноводных мод и резонансных колебаний в диапазоне единиц миллигерц (Pc5/Pi3), существование которых было предсказано в работах [Patel, 1968; Siscoe, 1969]. В геомагнитном хвосте могут существовать все основные ветви МГД-волн: альвеновские, быстрые (БМЗ) и медленные (ММЗ) магнитозвуковые. Особым типом является так называемая флэппинг (flapping) мода, вызванная колебаниями хвоста как целого [Tsutomu, Teruki, 1976]. Упрощенные модели [Walker et al., 1993] дают близкие к наблюдаемым частоты и скорости распространения волн, но оставляют открытым вопрос о возможном источнике крупномасштабных колебаний и механизмах трансформации мод. Создание более реалистичных моделей, как численных [Allan, Wright, 2000], так и аналитических [Леонович, Мазур, 2008; Мазур и др., 2010], позволило описать основные типы колебаний, исследовать их генерацию, распространение и трансформацию. Подробный обзор основных типов МГД-колебаний можно найти в работе [Леонович и др., 2015].

Непосредственная экспериментальная оценка пространственных масштабов волны и одновременные измерения параметров электромагнитного поля и плазмы стали возможны с появлением многоспутниковых миссий THEMIS и Cluster [Angelopoulos, 2008; Escoubet et al., 2001]. По данным наземных наблюдений на высоких широтах было показано наличие собственной волновой активности ультранизкочастотного (УНЧ) диапазона в полярных шапках [Ballatore et al., 1998; Yagova et al., 2004; Francia et al., 2005]. При этом даже интегральные параметры колебаний не могут быть полностью предсказаны по параметрам солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) перед ударной волной [Yagova et al., 2010; Ягова, 2015].

УНЧ-волны в геомагнитном хвосте и их связь с флуктуациями магнитного поля и плазмы перед ударной волной и в магнитослое при низкой геомагнитной активности исследовались для отдельных событий в работе [Saraforoulos, Sarris, 1994]. Авторами был сделан вывод о глобальном характере зарегистрированных колебаний. Схожие волновые формы и спектры фиксировались одновременно на нескольких спутниках, находящихся друг от друга на удалении в несколько десятков  $R_E$ . Глобальные пульсации наблюдались в плазменном пограничном слое (Plasma sheet boundary layer, PSBL), долях хвоста и в магнитослое. Спокойные условия определялись по геомагнитным индексам. В работе [Saraforoulos, 1995] было показано, что от события к событию поляризация в плоскости, перпендикулярной хвосту, меняется от почти линейной до круговой. Статистическое исследование амплитуды длиннопериодных УНЧ-волн вблизи экваториальной плоскости магнитосферы было выполнено в работе [Wang et al., 2015] по данным спутников THEMIS. Было показано, что в Pc5-диапазоне средняя амплитуда пульсаций в плазменном слое растет с уровнем флуктуаций динамического давления СВ. Статистическое исследование волн Pc5-диапазона в хвосте магнитосферы [Zhang et al., 2018] было основано на анализе волно-

вых возмущений, центральная частота которых сохранялась в течение хотя бы трех периодов. Исследование показало уменьшение частоты пульсаций при удалении от Земли, преобладание стоячих волн в ближнем хвосте и бегущих — в дальнем. Для исследованных пульсаций характерны утренне-вечерняя асимметрия в частоте появления и поляризации и рост частоты появления при высоких скоростях и амплитудах флуктуаций динамического давления СВ. При этом волновые возмущения наблюдались преимущественно при низкой и умеренной авроральной активности. Выбор невозмущенных условий по геомагнитным индексам уменьшает вклад интенсивных возмущений внутри магнитосферы, но не позволяет разделить собственные моды хвоста и вынужденные колебания, связанные с флуктуациями параметров ММП и динамического давления СВ. Анализ таких вынужденных колебаний можно найти, например, в работах [Kim et al., 2004]. По данным магнитометрических измерений на наземной низкоширотной станции и в геомагнитном хвосте авторы исследуют колебания, непосредственно связанные с импульсными и квазипериодическими флуктуациями динамического давления СВ. Видимые периоды этих колебаний составляют от 2 до 6 мин, во временной области они практически совпадают с флуктуациями в СВ, а максимальное совпадение между пульсациями на Земле и в хвосте наблюдается при сдвиге 120 с.

В работах [Yagova et al., 2017; Nosikova et al., 2022] было показано, что специфические высокочастотные колебания в долях хвоста наблюдаются при практически полном угасании флуктуаций того же частотного диапазона в межпланетной среде. На основании детального анализа пульсаций диапазона единиц миллигерц в обеих полярных шапках и магнитосферном хвосте перед бестриггерной изолированной суббурей было выдвинуто предположение, что эти пульсации могут играть роль «предвестника» слабой бестриггерной суббури.

В настоящей работе для выявления собственных колебаний хвоста исследуются пульсации диапазона 1–4 мГц (Pc5/Pi3) при разном уровне флуктуаций ММП и динамического давления СВ перед ударной волной по данным измерений на спутниках Cluster. В разделе 1 описываются данные и методы обработки, в разделе 2 приводятся примеры пульсаций в геомагнитном хвосте и формулируются гипотезы для статистического анализа, результаты которого приведены в разделе 3.

## 1. ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

Методика основана на выделении интервалов для анализа по интенсивности флуктуаций ММП и динамического давления СВ перед ударной волной и сравнении параметров колебаний в геомагнитном хвосте для высокого и низкого уровня флуктуаций вне магнитосферы.

Флуктуации в межпланетной среде анализировались по данным измерений в точке либрации, пересчитанным к подсолнечной точке магнитопаузы. Данные доступны с минутным разрешением на сайте NASA [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>]. Для анализа ис-

пользовались вариации трех компонент ММП и динамического давления СВ  $P_{sw}$ . Выбирались интервалы с полным покрытием и отсутствием инструментальных выбросов, и для них методом Блэкмана—Тьюки выполнялась оценка спектральной плотности мощности (Power Spectral Density, PSD) [Дженкинс, Ваттс, 1972] скользящим окном длительностью 96 мин с шагом 10 мин.

Одновременно исследовались вариации магнитного поля в долях хвоста по данным спутников Cluster-1 и -4. Исходные данные были представлены в геоцентрической солнечно-эллиптической системе (GSE), в которой начало координат выбрано в центре Земли, ось X направлена от Земли к Солнцу, ось Z нормальна к плоскости эклиптики с положительным направлением на север, а ось Y лежит в плоскости эклиптики с положительным направлением на вечер, так что вектора XYZ образуют правую тройку. Для выбранных интервалов спутники находились на расстояниях от  $7R_E$  до  $14R_E$  от центра Земли, что соответствует области ближнего хвоста. Для дальнейшей обработки магнитное поле преобразовывалось из системы GSE в связанную с главным магнитным полем декартову систему координат, в которой компоненты  $B_z$  ориентирована вдоль главного магнитного поля,  $B_r$  перпендикулярна ей и лежит в плоскости, образованной касательной к линии поля и проходящей через центр Земли, а  $B_\phi$  образует с ними правую тройку векторов. В доле хвоста эти компоненты примерно параллельны компонентам  $B_x$ ,  $B_z$  и  $B_y$  системы GSE. Для компонент магнитного поля так же, как и для параметров межпланетной среды, выполнялось спектральное оценивание. Вычислялись PSD и кросс-спектры для пар, составленных из компонент магнитного поля, измеренных на одном или двух спутниках. Для исследования пространственного масштаба пульсаций в хвосте использовались данные двух спутников Cluster, а для анализа связи пульсаций в хвосте с параметрами вне магнитосферы оценивались кросс-спектры для пар  $B_{tail}/B_{IM}$  и  $B_{tail}/P_{sw}$ , где обозначения tail и IM относятся соответственно к геомагнитному хвосту и межпланетной среде. Для оценки степени сходства сигналов использовалась спектральная когерентность  $\gamma^2$ , определяемая как отношение квадрата PSD кросс-спектра к произведению PSD автоспектров [Дженкинс, Ваттс, 1972]. Для определения пространственного масштаба когерентных ( $\gamma^2 > 0.5$ ) сигналов в хвосте оценивалась разность фаз  $\Delta\phi$  и спектральное отношение  $R$ , равное отношению PSD одноименных компонент на Cluster-1 и -4.

## 2. ПРИМЕРЫ ПУЛЬСАЦИЙ В МАГНИТОСФЕРНОМ ХВОСТЕ ПРИ РАЗНОМ УРОВНЕ ФЛУКТУАЦИЙ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

### 2.1. Событие 1: 19 сентября 2016 г.

Пример колебаний, наблюдавшихся в магнитосферном хвосте 19 сентября 2016 г. (день 263) при высокой интенсивности флуктуаций в межпланетной среде, представлен на рис. 1. На рис. 1, а показаны флуктуации вертикальной компоненты ММП,

а вариации двух других компонент аналогичны: флуктуации не регулярны, имеют размах 5–8 нТл, а их видимые квазипериоды меняются от 5 до 15 мин, что проявляется в практически плоском спектре PSD (рис. 1, б). Пульсации в доле хвоста более регулярны, их видимый период составляет около 15 мин, а размах — около 1 нТл (на рис. 1, а они показаны с увеличением). В спектре PSD основная мощность сосредоточена на частотах ниже 2 мГц. Спектральная когерентность между колебаниями в межпланетной среде и хвосте низкая (рис. 1, в). В это время спутники находились в северной доле магнитосферного хвоста на расстоянии от центра Земли  $7.9R_E$  (Cluster-4) и  $8.8R_E$  (Cluster-1). Волновые формы пульсаций (рис. 1, з) и их спектры (рис. 1, д) сходны, но не идентичны. В низкочастотной части спектра ( $f < 2$  мГц) спектральная когерентность пульсаций на двух спутниках составляет примерно 0.8 (рис. 1, е) и разность фаз  $\Delta\phi \approx 36^\circ$  (рис. 1, ж), что соответствует распространению в антисолнечном направлении с фазовой скоростью 330 км/с. Групповая скорость, определенная по возмущению, начавшемуся после отметки  $t = 30$  мин, составляет 320 км/с. Таким образом, групповая и фазовая скорости близки друг к другу и имеют тот же порядок величины, что и скорость СВ. Отметим, что скорость СВ, измеренная в точке либрации и пересчитанная к подсолнечной точке магнитопаузы, составляла для интервала, приведенного на рис. 1, около 400 км/с.

### 2.2. Событие 2: 18 июля 2016 г.

Пульсации в магнитосферном хвосте с амплитудами порядка 1 нТл могут возникать и при значительно меньшей, чем в событии 1, интенсивности флуктуаций ММП перед ударной волной. Пример пульсаций в хвосте, наблюдавшихся при низкой амплитуде флуктуаций ММП 18 июля 2016 г. (день 200), показан на рис. 2. На рис. 2, а видны схожие волновые формы возмущений  $B_y$ -компоненты ММП и продольной компоненты поля в хвосте, но они наблюдаются на коротком отрезке времени (после отметки 60 мин) и не сказываются на спектральной когерентности для всего интервала, которая остается низкой (рис. 2, в). Как и для события 1, PSD пульсаций в хвосте (рис. 2, б) быстро спадает с частотой после 2 мГц, а спектр флуктуаций ММП почти плоский. В отличие от события 1, волновые формы пульсаций, зарегистрированных на двух спутниках в магнитосферном хвосте, практически идентичны (рис. 2, з). Это отражается в одинаковых спектрах (рис. 2, д), близкой к единице спектральной когерентности (рис. 2, е) и близкой к нулю разности фаз (рис. 2, ж).

Полученный результат аналогичен описанному в работе [Nosikova et al., 2022] для события 8 августа 2007 г., когда крупномасштабные пульсации в магнитосферном хвосте также наблюдались на фоне практически полного замирания внешних возмущений. Чтобы понять, является ли такое совпадение случайным, распределения параметров пульсаций диапазона Pc5/Pi3 в магнитосферном хвосте будут проанализированы при разных интенсивностях флуктуаций перед ударной волной.

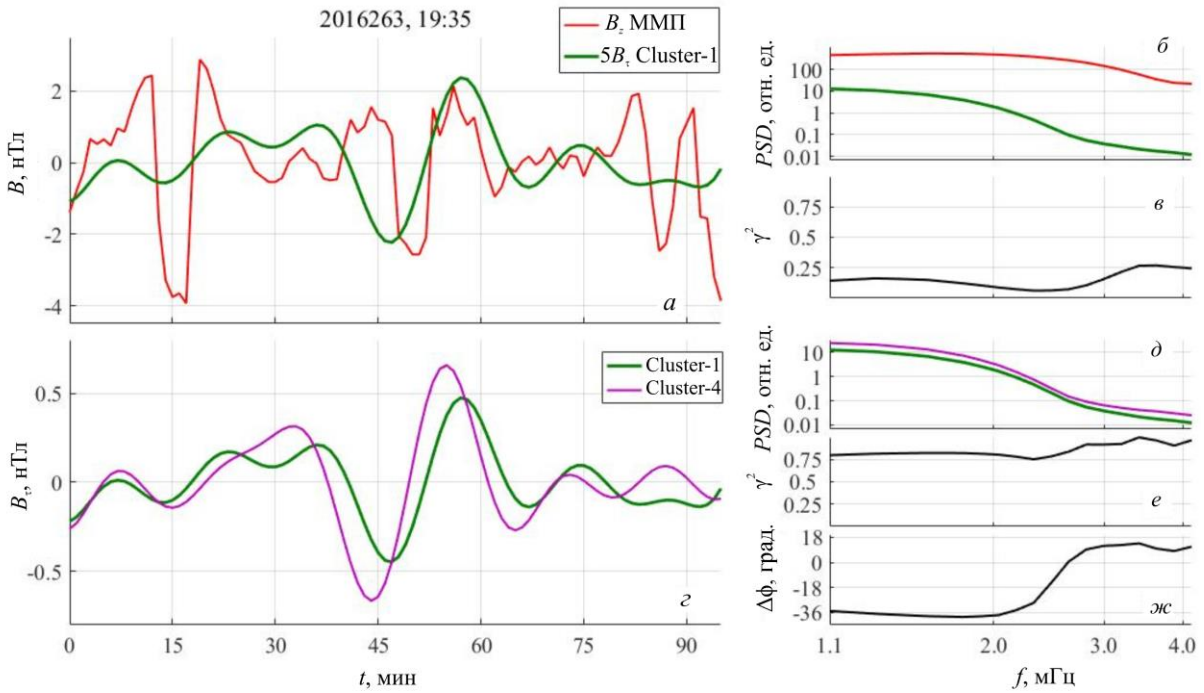


Рис. 1. Пульсации в геомагнитном хвосте (продольная компонента) и одновременно измеренные флуктуации вертикальной компоненты ММП, наблюдавшиеся 19 сентября 2016 г. (день 263),  $t=0$  соответствует 19:35 UT: сигнал во временной области (а); PSD (б); спектральная когерентность (в). Сигналы (z), PSD (д), спектральная когерентность (е) и разность фаз (ж) в доле магнитосферного хвоста по измерениям на спутниках Cluster-1 и -4

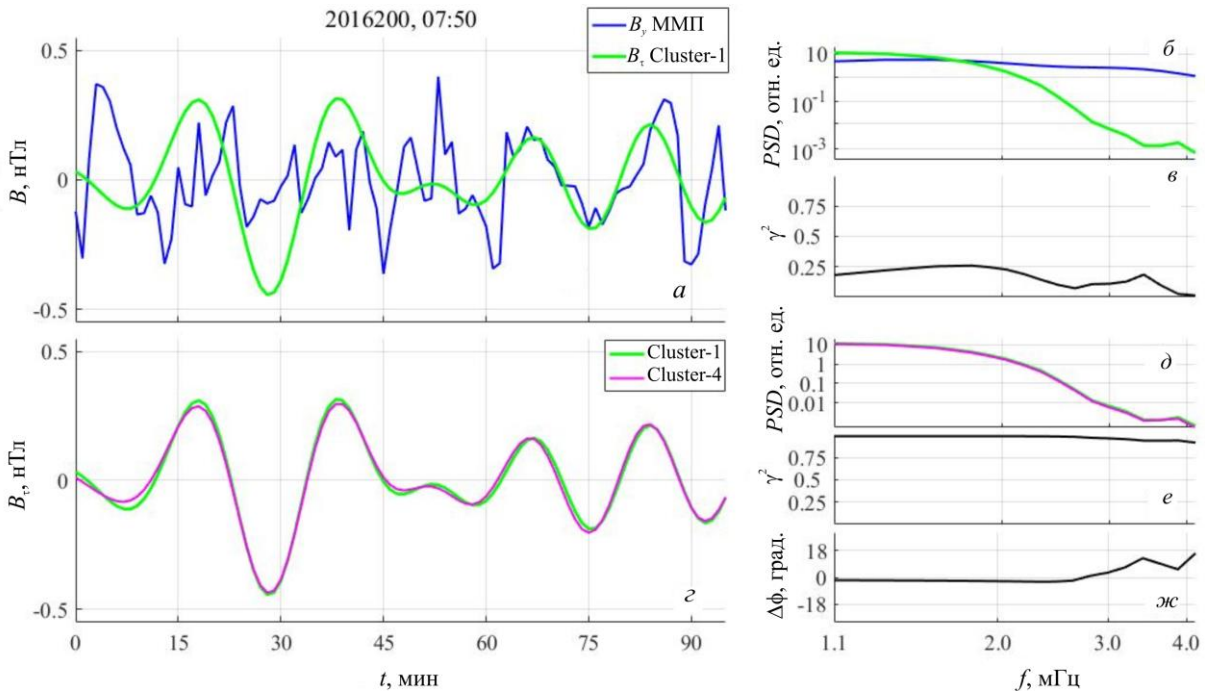


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для  $B_z$ -компоненты ММП. Событие 18 июля 2016 г. (день 200),  $t=0$  соответствует 07:50 UT

### 3. СТАТИСТИКА

Назовем синхронными на масштабе  $1R_E$  пульсации с высокой спектральной когерентностью  $\gamma^2 > 0.9$  и малой по абсолютной величине разностью фаз  $\Delta\phi$ , так что  $\mu = \cos(\Delta\phi) > 0.9$ . Эти параметры определяются по кросс-спектрам, рассчитанным для пар соответствующих компонент на двух спутниках Cluster. Рассмотрим, как появление таких пульсаций зависит от интенсивности флуктуаций ММП и дина-

мического давления СВ  $P_{SW}$  перед ударной волной. В качестве параметра, характеризующего интенсивность пульсаций, будем использовать интегральную по частоте мощность  $P_f$  для  $P_{SW}$  и ММП, причем для ММП берется суммарное по всем трем компонентам значение  $P_f$ .

$P_f$ -гистограммы для  $P_{SW}$  и ММП приведены на рис. 3. Использовались все интервалы, когда Cluster-1 и -4 находились в доле хвоста на расстоянии друг от друга от  $0.6R_E$  до  $1.5R_E$ , а качество данных

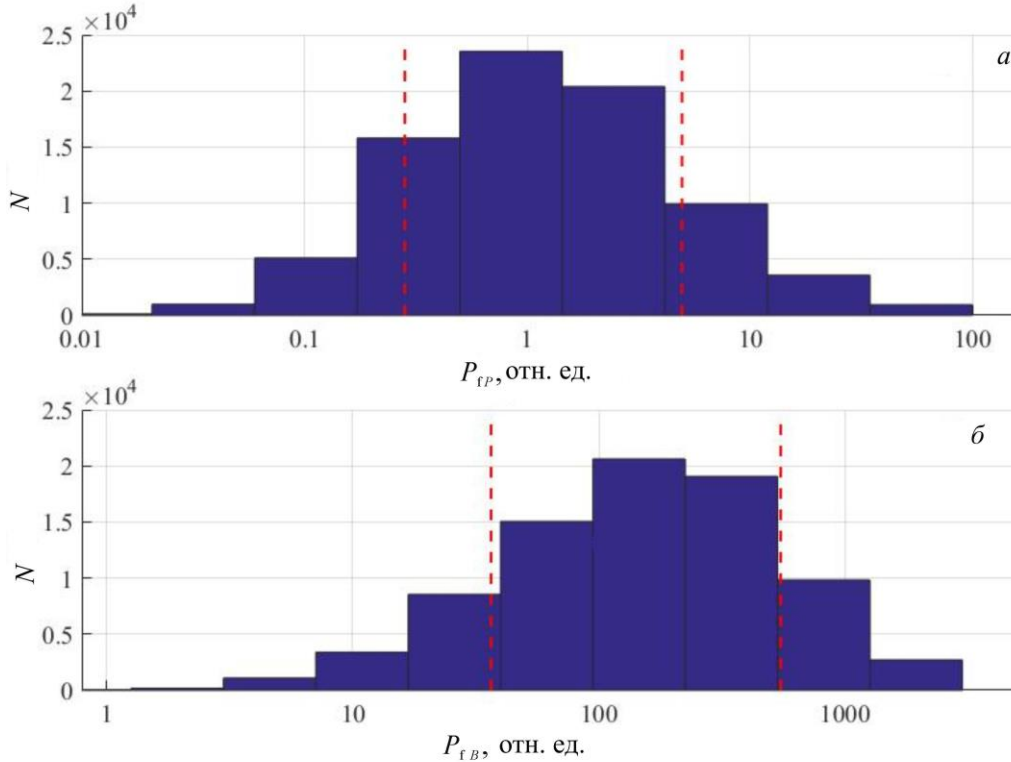


Рис. 3. Распределение числа событий  $N$  по мощности  $P_f$  флуктуаций динамического давления СВ (а) и ММП (б). Красными штриховыми линиями отмечены 15 % уровни максимальной и минимальной интенсивности

позволяло провести оценку спектра для  $P_{sw}$  и компонент магнитного поля в межпланетной среде и геомагнитном хвосте. Красными штриховыми линиями отмечены значения  $P_f$ , отсекающие 15 % интервалов с минимальной и максимальной интенсивностью флуктуаций в межпланетной среде, называемые в дальнейшем спокойными и возмущенными соответственно.

Сравнение вероятности появления синхронных пульсаций в геомагнитном хвосте позволит оценить воздействие флуктуаций ММП и динамического давления СВ на колебания в геомагнитном хвосте. Синхронные пульсации наблюдаются как при спокойных, так и при возмущенных условиях вне магнитосферы, но их доли существенно различаются. Если для возмущенных условий доля (по времени) синхронных пульсаций составляет 15 %, то для спокойных — 54 %. Таким образом, синхронные на расстояниях порядка  $1R_E$  пульсации наблюдаются в геомагнитном хвосте преимущественно при низкой интенсивности внемагнитосферных флуктуаций.

Из-за малого количества интервалов, когда «синхронные» пульсации наблюдались при возмущенных внешних условиях, будут рассмотрены три группы пульсаций: возмущенные (D), спокойные несинхронные ( $Q_n$ ) и спокойные синхронные ( $Q_s$ ). По разности фаз для соответствующих компонент на двух спутниках определялся параметр  $k_{eff} = \Delta\phi / \Delta R$ , имеющий размерность обратной длины. Для возмущения, распространяющегося вдоль магнитного поля,  $k_{eff}$  равно волновому числу. Распределения эмпирической плотности вероятности (PDF — probability density function) по  $k_{eff}$ , построенные по продольной

компоненте  $B_z$ , представлены на рис. 4. Поскольку группа  $Q_s$  по условию отбора включала пульсации с малой разностью фаз, более 90 % пульсаций попадают в интервал  $k_{eff} < 0.1R_E^{-1}$ , т. е. их пространственный масштаб больше  $10R_E$ . Группа  $Q_n$  характеризуется двумя максимумами при  $k_{eff} < 0.2R_E^{-1}$  и  $k_{eff} \approx 0.5R_E^{-1}$ , а среднее по распределению значение  $k_{eff} \approx 0.3R_E^{-1}$ . Для группы D два максимума распределения наблюдаются при  $0.1 < k_{eff} < 0.2R_E^{-1}$  и  $k_{eff} \approx 0.65R_E^{-1}$ , а среднее составляет  $k_{eff} \approx 0.5R_E^{-1}$ . Таким образом, пульсации групп D и  $Q_n$  имеют пространственный масштаб порядка  $1R_E$ . Далее термины крупно- и мелкомасштабные используются для пульсаций групп  $Q_s$  и  $Q_n/D$  соответственно.

Проверим, есть ли различия в спектральных и поляризационных параметрах групп пульсаций, выделенных по их пространственному масштабу в хвосте магнитосферы и уровню возмущенности вне магнитосферы. На рис. 5 представлены распределения PDF по суммарной мощности  $\Sigma(P_f)$  (а) и наклону спектра  $\alpha$  (б). Сравнение  $\Sigma(P_f)$  для двух групп мелкомасштабных пульсаций показывает, что распределение для группы  $Q_n$  (спокойный фон) смещено в сторону более низких значений по сравнению с группой D (возмущенный фон). Среднее по группе  $Q_n$  значение спектральной мощности почти на порядок меньше, чем для группы D. При этом мощность регистрируемых на спокойном фоне крупномасштабных пульсаций (группа  $Q_s$ ) значительно выше, чем мелкомасштабных (группа  $Q_n$ ), и сравнима с мощностью пульсаций при возмущенных условиях (группа D). Относительный вклад низких и высоких частот количественно выражается параметром наклона спектра  $\alpha$ .

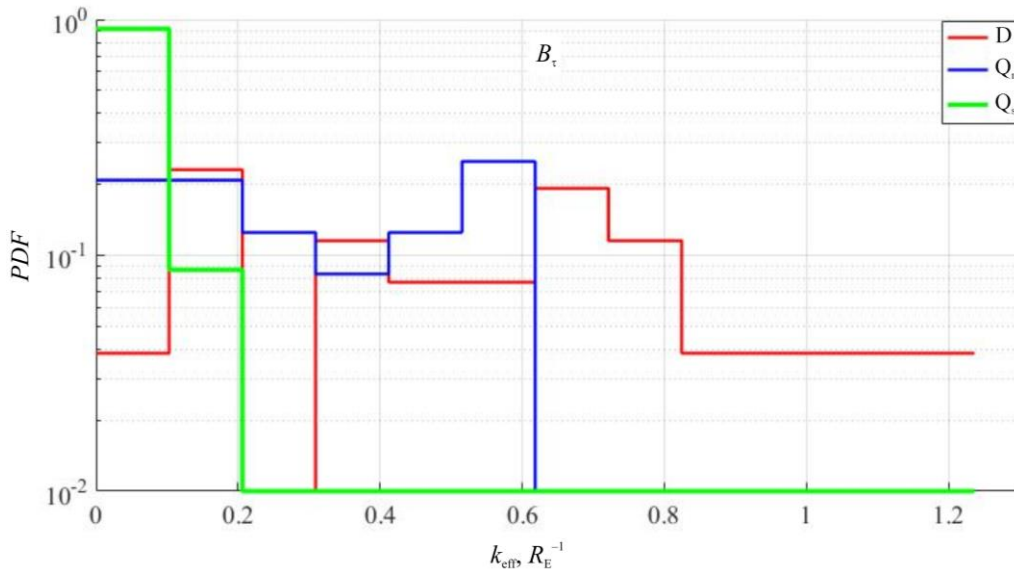


Рис. 4. Распределение PDF по параметру  $k_{\text{eff}}$ , определенному по компоненте  $B_r$ , для трех групп пульсаций

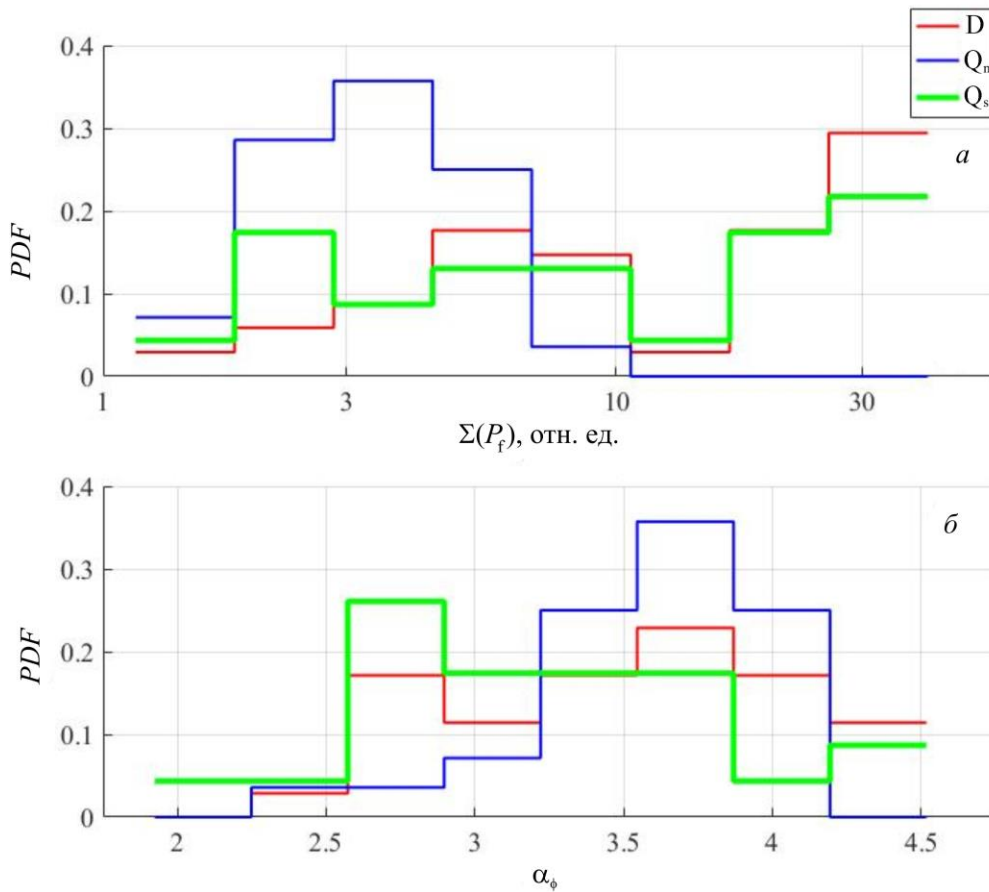


Рис. 5. Распределения PDF по суммарной спектральной мощности  $\Sigma(P_f)$  (а) и наклону спектра  $\alpha_\phi$  (б) для трех групп пульсаций по данным спутника Cluster-1

Для группы  $Q_s$  наблюдается сдвиг  $\alpha$  в сторону низких значений, т. е. спектры пульсаций этого типа обогащены высокими частотами по сравнению со спектрами пульсаций других групп.

Поляризационные параметры представлены на рис. 6 отношением  $R_N$  мощности поперечных компонент к суммарной мощности (а) и параметром  $\mu_{p-\phi}$  (б), характеризующим поляризацию пульсаций в плоскости, нормальной к главному магнитному

полю:  $\mu_{p-\phi} = \cos(\Delta\phi_{p-\phi})$ , где  $\Delta\phi_{p-\phi}$  — разность фаз между пульсациями компонент поля  $B_p$  и  $B_\phi$ . Линейная поляризация соответствует  $\mu_{p-\phi} = \pm 1$ . Пульсации группы D характеризуются минимальным значением  $R_N$ , что соответствует преобладающему вкладу в суммарную мощность продольной компоненты, в то время как мелкомасштабные пульсации при спокойных условиях (группа  $Q_n$ ) являются преимущественно поперечными. Для крупномасштабных пульсаций наибо-

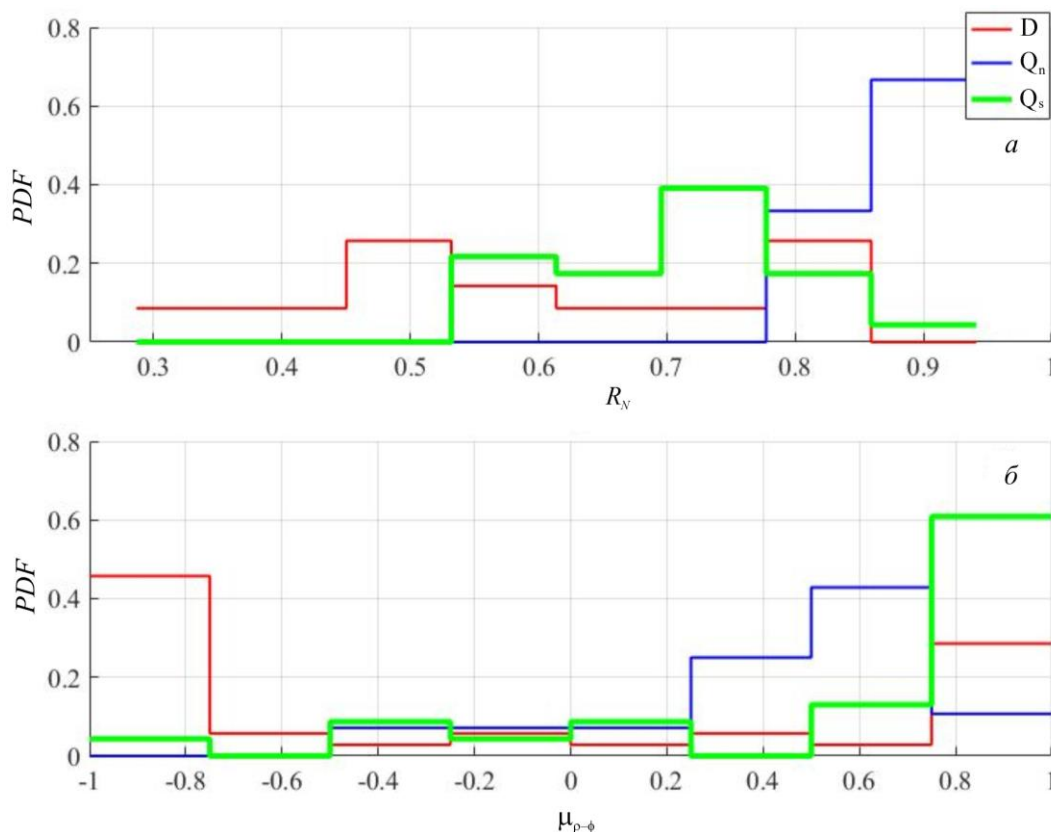


Рис. 6. Распределения PDF по отношению  $R_N$  (а) и  $\mu_{p-\phi}$  (б) для трех групп пульсаций по данным спутника Cluster-1

лее вероятное значение  $R_N$  составляет примерно 2/3, что соответствует равномерному распределению мощности между тремя компонентами. У пульсаций группы D (возмущенный фон) преобладает близкая к линейной поляризация в плоскости, перпендикулярной главному полю — максимумы распределения наблюдаются при  $\mu_{p-\phi} \approx \pm 1$ . Для пульсаций группы Q<sub>n</sub> преобладает эллиптическая поляризация с максимумом распределения при  $\mu_{p-\phi} \approx 0.6$ . Для крупномасштабных пульсаций (группа Q<sub>s</sub>) поляризация близка к линейной: максимум распределения наблюдаются при  $\mu_{p-\phi} \approx 1$ .

Таким образом, группы пульсаций, выделенные по пространственному масштабу в геомагнитном хвосте и уровню флуктуаций вне магнитосферы, различаются также по спектральным и поляризационным параметрам. Спектральная мощность пульсаций с пространственным масштабом  $1R_E$  существенно зависит от уровня возмущенности вне магнитосферы и резко падает при низкой интенсивности флуктуаций ММП и динамического давления СВ, а мощность развивающихся на спокойном фоне крупномасштабных пульсаций близка к мощности мелкомасштабных пульсаций, возникающих при высокой возмущенности вне магнитосферы.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ выявил, что пульсации диапазона 1–4 мГц, регистрируемые в магнитосферном хвосте, распадаются на два подтипа:

1) пульсации с пространственным масштабом порядка  $1R_E$ , амплитуда которых контролируется

амплитудой флуктуаций ММП и динамического давления СВ ( $P_{SW}$ ) в том же частотном диапазоне;

2) крупномасштабные пульсации, наблюдаемые как синхронные и идентичные на расстояниях порядка  $1R_E$ , которые регистрируются на спокойном фоне и характеризуются амплитудами, сравнимыми с мелкомасштабными пульсациями при высоком уровне флуктуаций ММП и  $P_{SW}$ .

Средний наклон спектра крупномасштабных пульсаций меньше, чем мелкомасштабных, а мощность примерно равномерно распределена между компонентами.

Наблюдаемые периоды этих колебаний составляют от нескольких сотен до тысячи секунд. Такие периоды соответствуют баллонной моде, развивающейся при невозмущенном плазменном слое [Reddy, Lakhina, 1996], или колебаниям хвоста как целого (флэппинг) [Zhang et al., 2002; Sergeev et al., 2006]. Кроме того, многоспутниковые измерения [Cai et al., 2009] выявили продольные неоднородности плотности в геомагнитном хвосте. Соответствующие им неоднородности альвеновской скорости создают возможность для резонансного возбуждения в потоке плазмы [Hasegawa et al., 2006].

В настоящей работе использовались параметры СВ перед ударной волной, что приводит к небольшой дополнительной задержке и возможному искажению параметров СВ относительно ближайшей к месту наблюдений пульсаций области межпланетной среды. Поскольку в настоящей работе использовались результаты измерений магнитного поля на расстояниях, не превышающих  $14R_E$ , эта задержка, вычисленная

по скорости СВ, мала по сравнению с длиной интервала (96 мин), для которого рассчитывались спектры. При этом для локализации источника исследуемых колебаний потребуется непосредственное сравнение пульсаций в доле хвоста с флуктуациями магнитного поля в ближайших точках магнитослоя и межпланетной среды.

В работах [Heacock, Chao, 1980; Yagova et al., 2017] выявлена связь УНЧ-колебаний миллигерцового диапазона в полярных шапках и последующей авроральной суббури. Изменения параметров пульсаций наблюдаются за 2–4 ч до суббури без явного внешнего триггера. В работе [Nosikova et al., 2022] для одного случая показана высокая когерентность пульсаций в обеих полярных шапках и крупномасштабных пульсаций в магнитосферном хвосте, наблюдаемых при «нулевом» уровне внешней возмущенности. Вопрос о статистической связи бес триггерных суббурь и других переходных процессов в магнитосфере с параметрами геомагнитных пульсаций диапазона единиц миллигерц в магнитосферном хвосте требует отдельного исследования.

## ВЫВОДЫ

Исследование геомагнитных пульсаций диапазона 1–4 мГц ( $Pc5/Pi3$ ) в доле геомагнитного хвоста по данным измерений магнитного поля на спутниках Cluster в 2016 г. показало, что можно выделить группы пульсаций разного пространственного масштаба: крупномасштабные (порядка или больше  $10R_E$ ) и более мелкомасштабные с характерным масштабом порядка  $R_E$ . Амплитуда более мелкомасштабных пульсаций контролируется амплитудой флуктуаций ММП и динамического давления СВ, в то время как крупномасштабные пульсации наблюдаются преимущественно при низком уровне флуктуаций вне магнитосферы с амплитудами, близкими к амплитуде мелкомасштабных пульсаций при высоком уровне флуктуаций вне магнитосферы. Крупномасштабные пульсации характеризуются меньшим, чем мелкомасштабные, наклоном спектра и приблизительно равным распределением спектральной мощности между компонентами.

Для анализа использовались данные измерений магнитного поля на спутниках Cluster и параметров ММП и СВ, представленные на сайте [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-05-00787.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дженкинс Г., Ваттс Д. *Спектральный анализ и его приложения*. Вып. 2. М.: Мир, 1972. 287 с.
- Леонovich А.С., Мазур В.А. Собственные сверхнизкочастотные магнитозвуковые колебания ближнего плазменного слоя. *Космические исследования*. 2008. Т. 46, № 4. С. 336–343.
- Леонovich А.С., Мазур В.А., Козлов Д.А. МГД-волны в геомагнитном хвосте: обзор. *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 1. С. 4–22. DOI: [10.12737/7168](https://doi.org/10.12737/7168).
- Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А. МГД-волноводы в космической плазме. *Физика плазмы*. 2010. Т. 6, № 7. С. 653–670.

Ягова Н.В. Наклон спектра высокоширотных геомагнитных возмущений диапазона 1–5 мГц. Контролирующие параметры вне и внутри магнитосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55, № 1. С. 35–44. DOI: [10.7868/S0016794015010149](https://doi.org/10.7868/S0016794015010149).

Allan W., Wright A.N. Magnetotail waveguide: Fast and Alfvén waves in the plasma sheet boundary layer and lobe. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 317–328. DOI: [10.1029/1999JA900425](https://doi.org/10.1029/1999JA900425).

Angelopoulos V. The THEMIS mission. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 141, iss. 1–4. P. 5–34. DOI: [10.1007/s11214-008-9336-1](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9336-1).

Ballatore P., Lanzerotti L., MacLennan C.G. Multistation measurements of Pc geomagnetic power amplitudes at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 294555–294565. DOI: [10.1029/1998JA900035](https://doi.org/10.1029/1998JA900035).

Cai C.L., Dandouras I., Rème H., et al. Foreshock-like density cavity in the outflow region of magnetotail reconnection. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. P. 3043–3053. DOI: [10.5194/angeo-27-3043-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-3043-2009).

Escoubet C.P., Fehringer M., Goldstein M. The Cluster mission. *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19. P. 1197–1200. DOI: [10.5194/angeo-19-1197-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1197-2001).

Francia P., Lanzerotti L.J., Villante U., et al. A statistical analysis of low frequency magnetic 415 pulsations at cusp and cap latitudes in Antarctica. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. A02205. DOI: [10.1029/2004JA0106802005](https://doi.org/10.1029/2004JA0106802005).

Hasegawa H., Fujimoto M., Takagi K., et al. Single-spacecraft detection of rolled-up Kelvin—Helmholtz vortices at the flank magnetopause. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, 9203. DOI: [10.1029/2006JA011728](https://doi.org/10.1029/2006JA011728).

Heacock R.R., Chao J.K. Type Pi magnetic field pulsations at very high latitudes and their relation to plasma convection in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1980. Vol. 85. P. 1203–1213.

Kim K.-H., Cattell C.A., Lee D.-H., et al. Cluster observations in the magnetotail during sudden and quasiperiodic solar wind variations. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, A04219. DOI: [10.1029/2003JA010328](https://doi.org/10.1029/2003JA010328).

Nosikova N.S., Yagova N.V., Baddeley L.J., et al. An investigation into the spectral parameters of ultra-low-frequency (ULF) waves in the polar caps and magnetotail. *Ann. Geophys.* 2022. Vol. 40. P. 151–165. DOI: [10.5194/angeo-40-151-2022](https://doi.org/10.5194/angeo-40-151-2022).

Patel V.L. Magnetospheric tail as a hydromagnetic waveguide. *Phys. Lett. A*. 1968. Vol. 26. P. 596–597. DOI: [10.1016/0375-9601\(68\)90141-2](https://doi.org/10.1016/0375-9601(68)90141-2).

Reddy R.V., Lakhina G.S. Shear flow instabilities in the Earth's magnetotail. *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 14. P. 786–793. DOI: [10.1007/s00585-996-0786-z](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0786-z).

Sarafopoulos D.V., Sarris E.T. Quiet-time Pc5 pulsations in the Earth's magnetotail: IMP-8, ISEE-1 and ISEE-3 simultaneous observations. *Ann. Geophys.* 1994. Vol. 12. P. 121–138. DOI: [10.1007/s00585-994-0121-5](https://doi.org/10.1007/s00585-994-0121-5).

Sarafopoulos D.V. Long duration Pc5 compressional pulsations inside the Earth's magnetotail lobes. *Ann. Geophys.* 1995. Vol. 13. P. 926–937. DOI: [10.1007/s00585-995-0926-x](https://doi.org/10.1007/s00585-995-0926-x).

Sergeev V.A., Sormakov D.A., Apatenkov S.V., et al. Survey of large-amplitude flapping motions in the midtail current sheet. *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24. P. 2015–2024. DOI: [10.5194/angeo-24-2015-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-2015-2006).

Siscoe G.L. Resonant compressional waves in the geomagnetic tail. *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 74. P. 6482–6486. DOI: [10.1029/JA074i026p06482](https://doi.org/10.1029/JA074i026p06482).

Tsutomu T., Teruki M. Flapping motions of the tail plasma sheet induced by the interplanetary magnetic field variations. *Planet. Space Sci.* 1976. Vol. 24. P. 147–159. DOI: [10.1016/0032-0633\(76\)90102-1](https://doi.org/10.1016/0032-0633(76)90102-1).

Walker A.D.M., Ruohoniemi J.M., Baker K.B., et al. Spectral properties of magnetotail oscillations as a source of Pc5 pulsations. *Adv. Space Res.* 1993. Vol. 13. P. 59–65. DOI: [10.1016/0273-1177\(93\)90313-Z](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90313-Z).



Wang G.Q., Zhang T.L., Ge Y.S. Spatial distribution of magnetic fluctuation power with period 40 to 600 s in the magnetosphere observed by THEMIS. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 9281–9293. DOI: [10.1002/2015JA021584](https://doi.org/10.1002/2015JA021584).

Yagova N.V., Pilipenko V.A., Lanzerotti L.J., et al. Two-dimensional structure of long-period pulsations at polar latitudes in Antarctica. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. A03222. DOI: [10.1029/2003JA010166](https://doi.org/10.1029/2003JA010166).

Yagova N.V., Pilipenko V.A., Baransky L.N., Engebretson M.J. Spatial distribution of spectral parameters of high latitude geomagnetic disturbances in the Pc5/Pi3 frequency range. *Ann. Geophys.* 2010. Vol. 28. P. 1761–1775.

Yagova N., Nosikova N., Baddeley L., et al. Non-triggered auroral substorms and long-period (1–4 mHz) geomagnetic and auroral luminosity pulsations in the polar cap. *Ann. Geophys.* 2017. Vol. 35. P. 365–376. DOI: [10.5194/angeo-35-365-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-365-2017).

Zhang T.L., Baumjohann W., Nakamura R., et al. A wavy twisted neutral sheet observed by CLUSTER. *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29, 1899. DOI: [10.1029/2002GL015544](https://doi.org/10.1029/2002GL015544).

Zhang S., Tian A., Shi Q., et al. Statistical study of ULF waves in the magnetotail by THEMIS observations. *Ann. Geophys.* 2018. Vol. 36. P. 1335–1346. DOI: [10.5194/angeo-36-1335-2018](https://doi.org/10.5194/angeo-36-1335-2018).

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 20 февраля 2022 г.).

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (дата обращения 20 февраля 2022 г.).

*Статья подготовлена по материалам Семнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 7–11 февраля 2022 г., ИКИ РАН, Москва.*

*Как цитировать эту статью:*

Ягова Н.В., Козырева О.В., Носикова Н.С. Геомагнитные пульсации диапазона 1–4 мГц (Pc5/Pi3) в магнитосферном хвосте при разном уровне возмущенности в межпланетной среде. *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8, № 2. С. 84–92. DOI: [10.12737/szf-82202212](https://doi.org/10.12737/szf-82202212).