

ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ КОГЕРЕНТНОСТИ ДЛИНОПЕРИОДНЫХ УНЧ-ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТИ НОЧНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ

COHERENCE TIME SCALES OF LONG-PERIOD ULF VARIATIONS OF MAGNETIC FIELD IN VICINITY OF THE NIGHT-SIDE MAGNETOPAUSE

Д.А. Стуков

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

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия

Н.В. Ягова 

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

D.A. Stukov

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, sda@ifz.ru
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia

N.V. Yagova

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

Аннотация. Исследуются вариации магнитного поля в диапазоне нескольких миллигерц (геомагнитные пульсации Pc5–6/Pi3) в ближнем магнитосферном хвосте и прилегающих областях магнитослоя по данным спутников Cluster за 2016 г. Зависимость спектральной когерентности длиннопериодных УНЧ-вариаций магнитного поля от длины временного интервала анализируется для разных положений пары спутников Cluster-1 и -4 относительно магнитопаузы. Показано, что абсолютные значения спектральной когерентности и скорость ее спада с ростом длины временного интервала различаются для продольной и поперечных компонент магнитного поля и для разных положений спутников. Отдельно рассмотрен случай когерентных пульсаций в магнитослое при невысоких значениях скорости солнечного ветра и интенсивности флуктуаций перед ударной волной.

Ключевые слова: геомагнитные пульсации Pc5–6/Pi3, магнитосферный хвост, магнитопауза, магнитослой, когерентность.

ВВЕДЕНИЕ

В магнитосферном хвосте возникают наблюдаемые в магнитосфере магнитогидродинамические (МГД) колебания всех основных типов и специфические для хвоста изгибные моды (см., например, обзор [Леонович и др., 2015]). Экспериментальные данные подтверждают, что глобальные геомагнитные пульсации могут наблюдаться в магнитосферном хвосте на расстояниях до десятков радиусов Земли (R_E). Wang et al. [2015] показали, что средняя амплитуда пульсаций диапазона Pc5 коррелирует с флуктуациями динамического давления P_{sw} солнечного ветра (СВ), что согласуется с ролью СВ как внешнего источника возбуждения МГД-колебаний.

В работах [Nosikova et al., 2022; Ягова и др., 2022; Ягова, Евсина, 2024] было установлено, что зависимость амплитуды пульсаций в хвосте от интенсивности флуктуаций компонент межпланетного магнитного поля (ММП) и динамического давления СВ

Abstract. We examine magnetic field variations within the frequency range of several millihertz (Pc5-6/Pi3 geomagnetic pulsations) in the near-Earth magnetotail and adjacent flank magnetosheath regions, using data from Cluster satellites for 2016. Dependence of spectral coherence on interval length is analyzed for a satellite pair Cluster-1 and Cluster-4 at different satellite positions relative to the magnetopause. It is shown that absolute coherence and the rate of its decline with increasing time interval length differ for the longitudinal and transverse magnetic field components, as well as for different satellite positions. We also present a case study of a coherent pulsation recorded in the magnetosheath at low solar wind velocity and weak fluctuations in front of the bow shock.

Keywords: Pc5-6/Pi3 geomagnetic pulsations, magnetotail, magnetopause, magnetosheath, coherence.

перед ударной волной (мы будем называть такие флуктуации «внешними флуктуациями») различается для пульсаций разного пространственного масштаба. Крупномасштабные пульсации характеризуются практически идентичной формой вариаций и малым набегом фазы на расстояниях порядка нескольких R_E . Их амплитуда слабо зависит от интенсивности внешних флуктуаций, и в результате именно эти пульсации доминируют при низком уровне внешней возмущенности. В таких условиях пульсации демонстрируют относительно высокую добродотность и слабую связь с колебаниями магнитного поля в ночном магнитослое. При более высоком уровне амплитуды флуктуаций перед ударной волной увеличивается вклад более мелкомасштабных пульсаций, амплитуда которых существенно зависит от амплитуды внешних флуктуаций, а доля когерентных пульсаций распределена по обе стороны от магнитопаузы.

Оценки спектральной плотности мощности и когерентности в работах [Nosikova et al., 2022; Ягова и

др., 2022; Ягова, Евсина, 2024] выполнялись для фиксированной длины интервала, а возможность использования полученных оценок на других временных масштабах не рассматривалась. В то же время, временной масштаб когерентности является важной характеристикой возмущенности среды. Анализ временных и пространственных масштабов когерентности широко используется при исследовании турбулентности, в том числе в межпланетной среде и магнитослое. Так, Gutynska et al. [2008, 2009] исследовали временные масштабы когерентности, используя метод, основанный на анализе отдельных волновых пакетов. Для этого оценивались корреляции между колебаниями модуля магнитного поля в зависимости от времени задержки при сдвигах до 20 мин. В работе [Gutynska et al., 2012] на основе такого анализа делается вывод, что для частот ниже 10^{-2} Гц колебания всегда имеют источник перед ударной волной, в отличие от более высокочастотных, которые могут возбуждаться непосредственно в магнитослое.

Наиболее полное на сегодня статистическое исследование спектров турбулентности в магнитослое в частотном диапазоне от миллигерц до нескольких герц проведено в работе [Рахманова и др., 2024], которая продолжает серию исследований [Zastenker et al., 2002; Shevlyrev et al., 2003, 2007; Rakhamanova et al., 2020] (подробный обзор работ по теме дан в [Rakhamanova et al., 2023]).

При исследовании параметров турбулентности необходим охват максимально широкого интервала частот. Работы по турбулентности в магнитослое описывают спектры вариаций параметров плазмы и магнитного поля. Основное внимание при изучении флуктуаций магнитного поля в магнитослое уделяется более высоким частотам, чем частоты длинно-периодных пульсаций, которым посвящена настоящая работа. Колебания с частотами несколько миллигерц или совсем не исследуются, или лежат на границе исследуемого диапазона [Gutynska et al., 2009]. Результаты по длиннопериодным вариациям не всегда комментируются авторами, и в этой области частот есть риск снижения точности, поскольку нижняя граница частоты оказывается порядка или даже меньше обратной длины исследуемого интервала [Alexandrova et al., 2008; Gutynska et al., 2009].

Анализ спектров и поляризации вариаций магнитного поля в магнитослое в диапазоне от долей миллигерц до 10 Гц, выполненный в работе [Alexandrova et al., 2008], показал, что в большинстве случаев основная мощность сосредоточена в поперечных компонентах. Приведенные авторами спектры демонстрируют спектральные максимумы в миллигерцовой области спектра, но вопрос о свойствах квазигармонических колебаний миллигерцового диапазона в магнитослое в работе не исследуется. В работе [Huang et al., 2017] проводится анализ спектральной плотности мощности (Power Spectral Density, PSD) и спектральных наклонов по данным спутников Cluster в магнитослое в диапазоне частот от долей миллигерц до десятков герц. Основное внимание в работе сосредоточено на изменении наклона спектра при переходе от инерционного к диссипативному режиму и свойствам колебаний продольной компоненты поля. Вычисление спектров

и оценка спектрального наклона выполнены по интервалам длительностью 1.6 ч, что позволяет корректно оценивать спектральные параметры в диапазоне нескольких миллигерц. Для отдельных событий, рассмотренных работе, в дневном магнитослое наблюдаются спектральные максимумы, которые не комментируются авторами.

В работе [Стуков, Ягова, 2024] было показано, что снижение степени когерентности при увеличении длины интервала T примерно одинаково для доли хвоста и магнитослоя при значениях T примерно до часа, а при больших значениях T степень когерентности в магнитослое снижается быстрее, чем в геомагнитном хвосте. Настоящая работа продолжает анализ вариаций миллигерцового диапазона в магнитосферном хвосте, проведенный в работах [Nosikova et al., 2022; Ягова и др., 2022; Ягова, Евсина, 2024; Стуков, Ягова, 2024]. Временные масштабы когерентности в течение всего 2016 г. исследуются для ближнего хвоста и прилегающих фланговых областей магнитослоя по данным пары спутников Cluster-1 и -4.

1. ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

Миссия Cluster [Escoubet et al., 2001, 2015] включает четыре спутника. Их мгновенные положения образуют тетраэдр, что позволяет изучать трехмерные распределения магнитного поля, параметров плазмы и потоков частиц. Орбиты спутников высокоэллиптические с апогеем $\sim 20R_E$ и перигеем $\sim 4R_E$ последовательно пересекают магнитослой, магнитопаузу и хвост магнитосферы.

Измерения магнитного поля осуществлялись феррозондовым (fluxgate) магнитометром FGM с временным шагом около 0.045 с. На сайте [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>] данные доступны в нескольких вариантах временного разрешения — от исходного до нескольких минут. В работе используются данные за 2016 г. с временным шагом около 4 с. Их первичная обработка включала выбор положения спутников по данным [<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/>], а также отбор интервалов длительностью более 2.5 ч, на которых данные не имели пробелов и пиков, связанных со сбоями в работе аппаратуры.

Для отобранных непрерывных фрагментов данных выполнялся переход из геоцентрической солнечно-эклптической системы координат GSE в систему координат, связанную с магнитным полем. Главное магнитное поле определялось по данным собственных измерений спутника. Для каждого момента времени t_0 вектор главного магнитного поля \mathbf{B}_{av} определялся усреднением в скользящем окне длительностью 20 мин ($t_0 \pm 10$ мин). Для текущего значения магнитного поля $\mathbf{B}(t_0)$ выполнялся переход к новой системе координат с компонентами B_t, B_p, B_ϕ , где компонента B_t сонаправлена \mathbf{B}_{av} , компонента B_p перпендикулярна B_t и лежит в плоскости, образованной \mathbf{B}_{av} и прямой Земля–спутник, а компонента B_ϕ замыкает правую тройку векторов. Полученный таким образом временной ряд имеет тот же шаг оцифровки, что и исходный, и позволяет исследовать вариации магнитного поля относительно главного поля, определенного по собственным измерениям спутника, на частотах выше обратной длительности интервала усреднения.

Число интервалов для каждого значения T и их суммарная длительность ΣT в минутах
для трех классов расположения спутников

Длительность интервала T (мин)	Both IN		Both OUT		MPCross	
	N	ΣT	N	ΣT	N	ΣT
48	945	15888	346	5904	127	2352
64	897	15424	322	5568	109	2240
80	851	14880	301	5440	92	1840
96	807	14400	281	5184	80	1920
112	764	14224	261	5376	69	1568
128	723	13696	241	4736	61	1536
144	683	13680	222	4752	54	1152

Для дальнейшего анализа выбирались участки орбит, когда спутники находились в одной из следующих областей: доля хвоста (tail lobe), высокоширотный пограничный слой (High Latitude Boundary Layer, HLBL) и фланговый магнитослой — ночной и дневной магнитослой вдали от подсолнечной точки ($X_{\text{GSE}} < 3R_E$). Далее выбирались временные интервалы, относящиеся к одному из трех классов, определенных по расположению спутников Cluster-1 и -4 относительно магнитопаузы: Both IN — оба спутника в долях хвоста, Both OUT — оба спутника в магнитослое, MPCross — спутники вблизи магнитопаузы. В последнюю категорию попадают интервалы, включающие моменты времени, когда один спутник определяется в HLBL, а другой — в магнитослое, при этом для всех точек интервала расстояние от магнитопаузы D_{MP} (на основе модельного расположения магнитопаузы по данным [<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/>]) удовлетворяет условию $-2R_E < D_{\text{MP}} < 0.6R_E$. Для класса Both IN $D_{\text{MP}} < -2R_E$, для класса Both OUT $D_{\text{MP}} > 0.6R_E$. Таким образом, классы не пересекаются.

Полное количество и суммарная длительность интервалов в каждом классе представлены в таблице. Рассматриваются интервалы длиной от 48 до 144 мин с шагом 16 мин. Минимальная длительность интервала для спектрального анализа составляет примерно три полных периода колебаний на нижней границе исследуемого частотного диапазона, а максимальная ограничена временем нахождения спутника в исследуемой области. Последовательность интервалов для спектрального анализа выбирается из непрерывных фрагментов данных каждого класса. Шаг между соседними интервалами составляет 16 мин. Использование перекрытия позволяет избежать краевых эффектов. Из-за перекрытия суммарная длительность интервалов может быть меньше, чем произведение длины интервала на их количество. В качестве порогового значения для дальнейшего анализа и представления результатов на графиках взято $\Sigma T = 20T$. Значения, удовлетворяющие этому условию, даны в таблице жирным шрифтом.

Обработка данных проводилась в вычислительной среде Python с помощью библиотеки SciPy, которая обеспечивает реализацию алгоритмов спектрального анализа и обработки временных рядов. Спектральное оценивание выполнялось с использованием следующих параметров: окно Блэкмана шириной $\Delta T = 16$ мин (960 с), длиной сегмента $N_{\text{perseg}} = 32$, перекрытием $N_{\text{overlap}} = 24$ и числом точек для быстрого

преобразования Фурье $N_{\text{fft}} = 128$. Для выбранных интервалов в полосе частот $1.2 \div 4.2$ мГц вычислялись PSD и спектральная когерентность $\langle \gamma^2 \rangle$. PSD определялась для трех компонент магнитного поля для каждого спутника, а $\langle \gamma^2 \rangle$ — для всех попарных сочетаний компонент $b_{c1} \div b_{c4}$, где индекс c принимает значения (τ , ρ , ϕ), а числовой индекс соответствует номеру спутника Cluster. Для обозначения вариаций компонент магнитного поля и их спектров далее используется строчная b , чтобы отличать их от обозначений компонент полного поля.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Когерентность. Статистика

Матрица когерентности симметрична и содержит в общем случае шесть отличающихся элементов: три диагональных (для одноименных компонент) и три недиагональных. На рис. 1–3 изображены зависимости среднего в полосе значения $\langle \gamma^2 \rangle$ для продольных и поперечных компонент магнитного поля при положении спутников в долях хвоста, окрестности магнитопаузы и ночной магнитослое. Из рисунков видно, что для всех положений спутников и значений T недиагональные элементы матрицы когерентности меньше диагональных, поэтому в дальнейшем недиагональные элементы будут исключены из анализа.

На рис. 4–6 представлен более полный набор параметров когерентности для диагональных элементов. Рассматриваются средние $\langle \gamma^2 \rangle$ и максимальные γ_{max}^2 в частотной полосе значения. Средние по каждому классу значения $\langle \gamma^2 \rangle$ и γ_{max}^2 представлены на верхних панелях рис. 4–6. На нижних панелях приведена вероятность появления надпороговых значений $P(\langle \gamma^2 \rangle > 0.5)$, определенная как отношение числа интервалов, для которых $\langle \gamma^2 \rangle > 0.5$, к полному числу интервалов N , и $P(\gamma_{\text{max}}^2 > 0.75)$, определенная аналогично для γ_{max}^2 . Для краткости при описании результатов, общих для всех параметров когерентности, используется термин «когерентность».

Рисунок 4 демонстрирует зависимость когерентности от T для продольной компоненты b_{τ} . Все параметры когерентности убывают с ростом длины интервала и демонстрируют качественно одинаковую зависимость от положения спутников. Максимальные значения когерентности при всех T соответствуют классу Both IN: $\langle \gamma^2 \rangle > 0.6$ для всех значений T ,

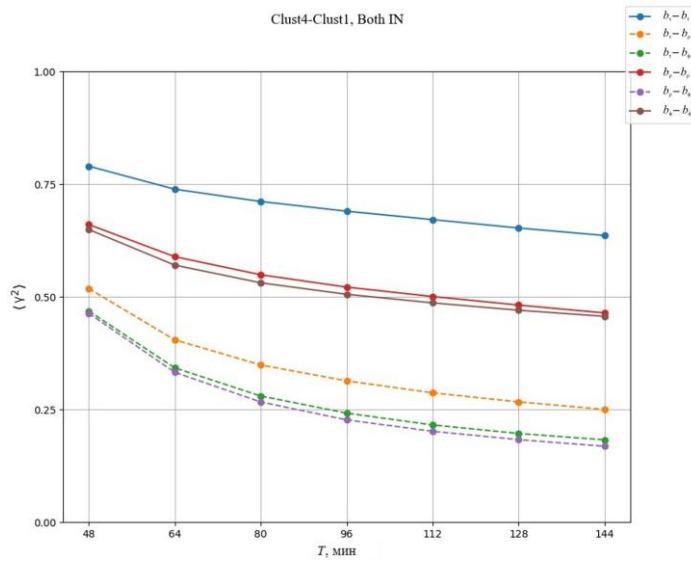


Рис. 1. Зависимости среднего в полосе значения спектральной когерентности $\langle \gamma^2 \rangle$ от длины интервала T для продольных и поперечных компонент магнитного поля при положении спутников в долях хвоста (Both IN): сплошные линии — диагональные элементы матрицы когерентности, а штриховые — недиагональные

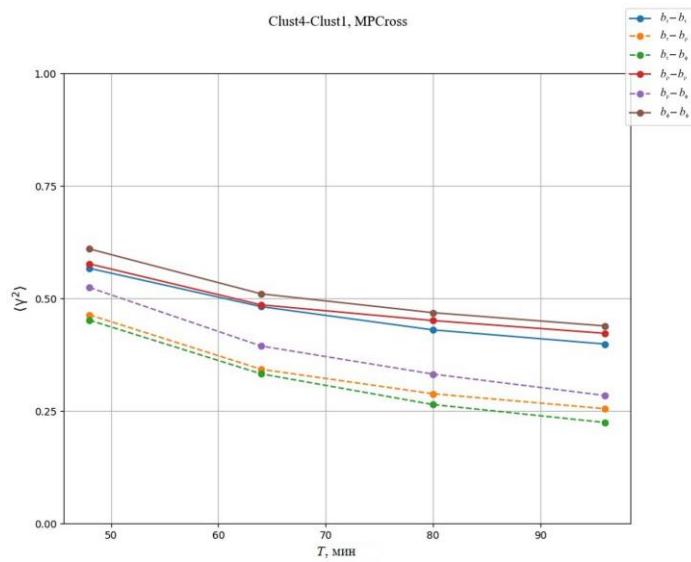


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для положения спутников в окрестности магнитопаузы (MPCross)

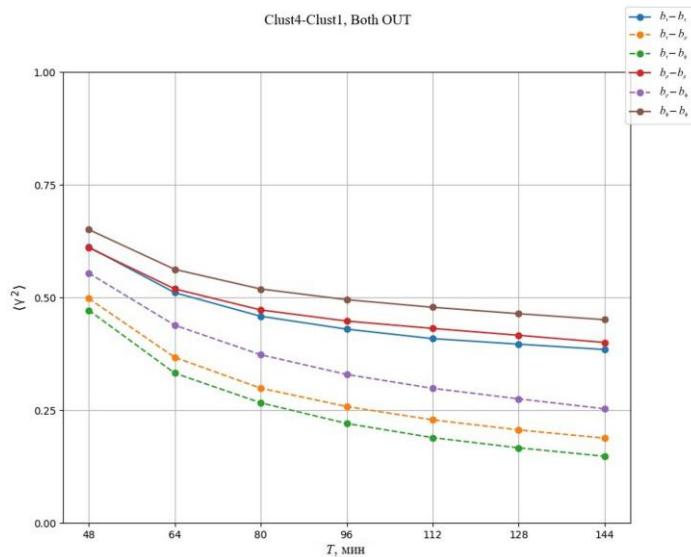


Рис. 3. То же самое для флангового магнитослоя (Both OUT)

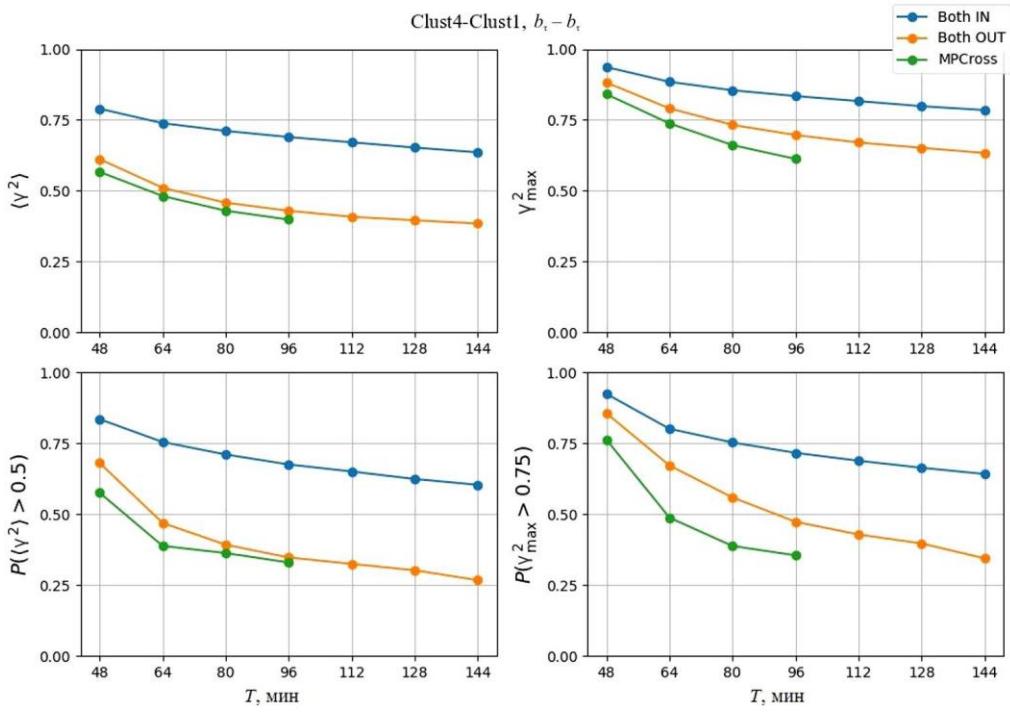


Рис. 4. Зависимости параметров когерентности от длины интервала T для продольной компоненты вариаций магнитного поля b_r : среднее по всем интервалам заданной длины (верхняя панель) и доля интервалов с надпороговой когерентностью (нижняя панель) для среднего в полосе $\langle \gamma^2 \rangle$ (слева) и для максимального γ^2_{\max} (справа) значений

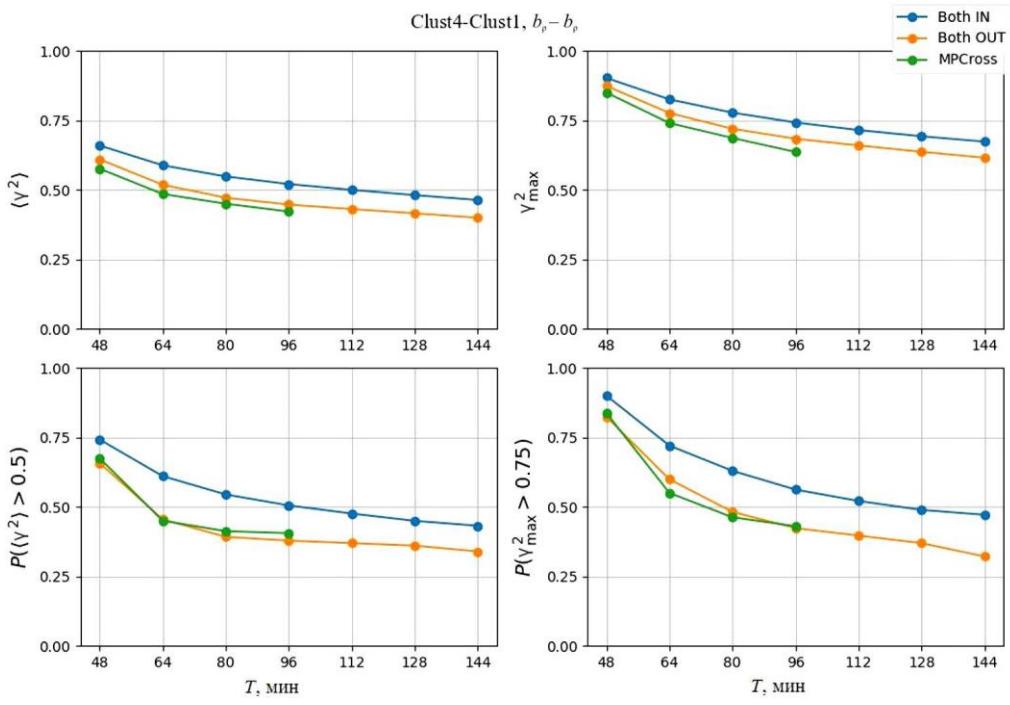


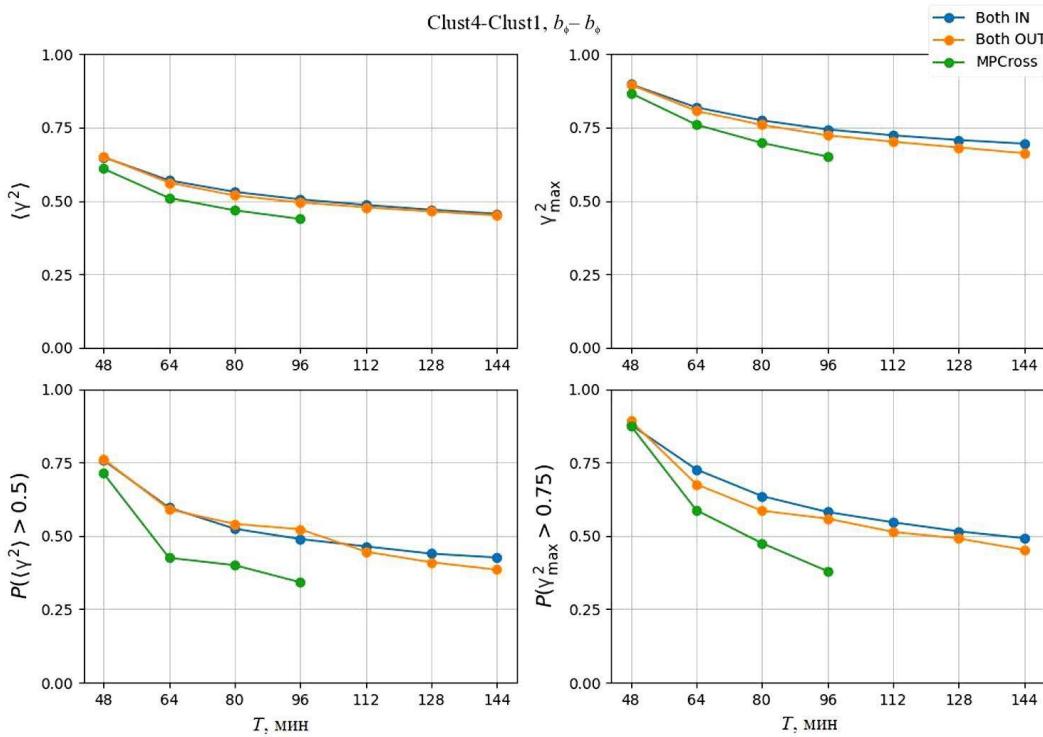
Рис. 5. То же самое для компоненты b_p

а при $T=48$ мин достигает 0.8, $\gamma^2_{\max} > 0.8$ при всех $T \leq 128$ мин. Вероятность появления надпороговых значений как для $\langle \gamma^2 \rangle$, так и для γ^2_{\max} превышает 0.6 во всем диапазоне T . Наименьшими значениями когерентности характеризуется класс MPCross, а для интервалов Both OUT параметры когерентности принимают промежуточные значения.

Для обоих параметров, описывающих $\langle \gamma^2 \rangle$, различия между классами MPCross и Both OUT малы, но они отчетливо проявляются для γ^2_{\max} . Общим для

всех параметров когерентности является увеличение различий между классами с ростом T . Этот эффект слабее проявляется для средних по интервалу значений $\langle \gamma^2 \rangle$ и наиболее сильно для $P(\gamma^2_{\max} > 0.75)$. При $T=80$ мин значение $P(\gamma^2_{\max} > 0.75)$ для класса MPCross почти в два раза меньше, чем для Both IN, тогда как при $T=48$ мин отличие составляет около 25 %.

Таким образом, когерентность между продольными компонентами характеризуется максимальными значениями в доле хвоста, минимальными —

Рис. 6. То же самое для компоненты b_ϕ

в окрестностях магнитопаузы и промежуточными — в магнитослос. Различие увеличивается с длиной интервала и сильнее проявляется для γ_{\max}^2 и вероятности появления надпороговых значений.

Те же зависимости для двух поперечных компонент поля представлены на рис. 5 и 6. Компоненты b_ρ и b_ϕ для исследуемых областей магнитосферного хвоста имеют ненулевые составляющие как параллельные основному току на магнитопаузе, так и нормальные к нему. Для обеих поперечных компонент параметры когерентности для класса Both IN и различия между классами меньше, чем для продольной компоненты. Для компоненты b_ρ почти нет различий между классами MPCross и Both OUT, а их отличие от класса Both IN сильнее проявляется в вероятности появления надпороговых значений $\langle \gamma^2 \rangle$ и γ_{\max}^2 , чем в средних значениях. Для компоненты b_ϕ сохраняется минимум когерентности для класса MPCross, а классы Both IN и Both OUT практически не различаются по величинам параметров когерентности. Отличия класса MPCross от двух других (так же, как и для компоненты b_ρ) наиболее явно проявляются в вероятности появления надпороговых значений.

Таким образом, минимум когерентности в окрестности магнитопаузы, обнаруженный в работе [Ягова, Евсина, 2024], существует для поперечных компонент для всего исследуемого диапазона длин интервалов T .

2.2. Пример когерентной пульсации в магнитослое

Кроме описанных в работах [Kim et al., 2002; Kerkko et al., 2002] колебаний, непосредственно проникающих в магнитосферу из межпланетной среды, в магнитослое регистрируются пульсации, «расцепленные» с внешними флюктуациями [Zastenker et al.,

2002]. В работе [Ягова, Евсина, 2024] рассматривались свойства таких пульсаций в диапазоне Pc5-6/Pi3 по обе стороны магнитопаузы. Ниже свойства длиннопериодных пульсаций магнитного поля анализируются для интервала, когда оба спутника находились в магнитослое.

Пульсации наблюдались 22 июня 2016 г. Проекции орбит спутников и магнитосферных границ, определенных по данным [<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/>] для интервала 12:23–13:27 UT, показаны на рис. 7 вместе со средними по интервалу ММП (пересчитанным к подсолнечной точке) и магнитным полем в месте расположения каждого из спутников Cluster. На рисунке используется проекция $X-R$, где $R^2 = Y^2 + Z^2$ системы GSE. В рассматриваемый период времени оба спутника находились в ближнем ночном магнитослое, причем расстояние между спутниками составляло около $2R_E$, а Cluster-4 находился ближе к подсолнечной точке. Направление магнитного поля в местах расположения обоих спутниках почти нормально к магнитопаузе.

Спектры PSD для трех компонент магнитного поля на траектории каждого спутника показаны на рис. 8. В обоих случаях основная спектральная мощность сосредоточена в компоненте b_ϕ , а главный максимум наблюдается на частоте $f_1 = 1.5$ мГц. Рассмотрим пульсации в компоненте b_ϕ более подробно. На рис. 9 показаны временные формы сигналов после высокочастотной фильтрации с частотой отсечки 0.8 мГц, спектральная когерентность γ^2 и разность фаз $\Delta\phi$. На магнитограммах (рис. 9, a) видны сходство волновых форм и набег фазы в направлении от Cluster-4 к Cluster-1, т. е. в антисолнечном направлении. Размах колебаний составляет около 16 нТл для Cluster-1 и 12 нТл для Cluster-4, т. е. по мере их распространения происходит рост амплитуды.

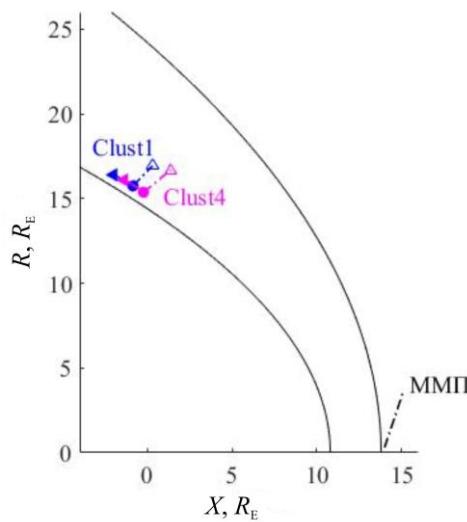


Рис. 7. Проекции X - R фрагментов орбит спутников 22 июня 2016 г. (день 174) в интервале 12:23–13:27 UT, определенные по данным [https://sscweb.gsfc.nasa.gov/] магнитосферные границы и средние по интервалу проекции магнитного поля перед ударной волной и в магнитослое. Направление движение спутника показано стрелкой, направление магнитного поля — штрихпунктиром

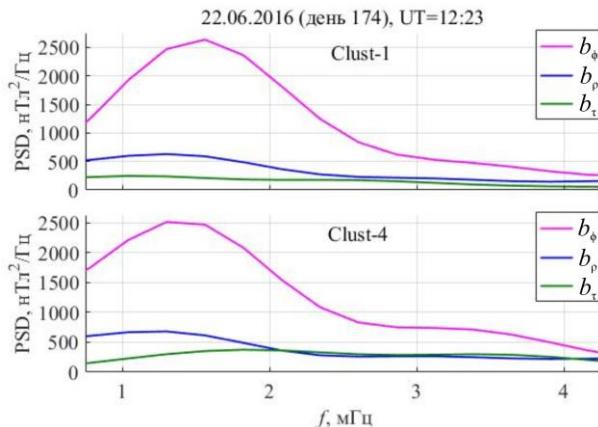


Рис. 8. Спектры PSD вариаций компонент магнитного поля для интервала 12:23–13:27 UT 22 июня 2016 г. (день 174) по данным спутников Cluster-1 и -4

Спектральная когерентность (рис. 9, б) демонстрирует два максимума: первый на частоте главного спектрального максимума $f_1 \approx 1.5$ мГц с $\gamma_{\max}^2 = 0.75$, второй — на частоте $f_2 = 3.6$ мГц, где в спектре мощности по данным спутника Cluster-4 наблюдается особенность в виде плато, а по данным Cluster-1 — замедление спада PSD с частотой. В окрестности f_1 разность фаз $\Delta\phi = 140^\circ$, а в окрестности f_2 $\Delta\phi \approx 0$, т. е. колебания практически синфазны.

Длиннопериодные пульсации в магнитослое могут быть как откликом на квазипериодические вариации ММП и P_{sw} перед ударной волной, так и формироваться внутри «большой магнитосферы» [Ягова, 2015]. Для определения характера возбуждения наблюдаемых колебаний рассмотрим вариации компонент ММП и P_{sw} в том же частотном диапазоне. Временные формы и спектры когерентности для P_{sw} и компонент ММП показаны на рис. 10. На рис. 10, а, б показаны вариации P_{sw} и компонент B_y и B_z ММП после высокочастотной фильтрации с той же ча-

стотой отсечки 0.8 мГц, что и для вариаций магнитного поля в магнитослое (для вариаций используются строчные буквы, чтобы отличить их от полного значения той же величины). Размах колебаний составлял около 2.5 нТл для B_z ММП и 1 нТл для B_y ММП, что в несколько раз меньше, чем размах колебаний компоненты b_ϕ в магнитослое, превышавший по данным обоих спутников 10 нТл (см. рис. 9, а). Средний размах колебаний P_{sw} составлял примерно 0.3 нПа, а максимальный — 0.5 нПа (рис. 10, б). Такой уровень амплитуд типичен при невысоких скоростях СВ. Спектральная когерентность вариаций как P_{sw} (рис. 10, в), так и компонент ММП (рис. 10, г) с вариациями b_ϕ в магнитослое не превышает 0.3.

Рассмотрим более подробно условия в межпланетной среде в показанный на рис. 7–10 интервал времени и предшествующие ему 80 мин. На рис. 11 представлены вариации трех компонент ММП, скорости и динамического давления СВ, определенные по данным OMNI. Скорость СВ $V \approx 350$ км/с, а P_{sw} менялось от 2.5 до 3 нПа. Около 11:40 UT начался подъем P_{sw} до 3.5 нПа одновременно с поворотом компоненты B_z к северу, во время которого ее значения изменились от слабоотрицательных до оклонулевых. Таким образом, существенных возмущений в межпланетной среде не было ни накануне, ни в рассматриваемом временном интервале. На этом фоне в магнитослое развивались квазипериодические колебания, когерентные на масштабах нескольких R_E , которые имели преимущественно поперечную поляризацию и распространялись в антисолнечном направлении.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ зависимости когерентности длиннопериодных вариаций магнитного поля от длительности интервала T показал, что различия в значениях когерентности между пульсациями в магнитосферном хвосте, окрестностях магнитопаузы и фланговом магнитослое существуют в диапазоне T от 48 минут до ~ 2.5 ч. Практически всегда различия между значениями когерентности при разных расположениях спутников возрастают с T .

Наиболее явно эти различия проявляются для вариаций продольной компоненты поля b_ϕ , для которой максимум когерентности наблюдается в доле хвоста (Both IN, $t-t$). Именно для комбинации Both IN, $t-t$ достигаются максимальные значения когерентности среди всех исследованных сочетаний компонент магнитного поля и положений спутников.

Когерентность в доле хвоста для поперечных компонент ниже, чем для продольной. Для компоненты b_ϕ величины параметров когерентности в доле хвоста и в магнитослое почти совпадают во всем диапазоне T , а их значения ближе к значениям для класса Both OUT в продольной компоненте. «Расцепленные» между положениями Both IN и Both OUT колебания существуют по крайней мере до $T=96$ мин, что статистически проявляется в меньших значениях когерентности в окрестности магнитопаузы. Это подтверждает вывод работы [Ягова, Евсина, 2024], полученный для одного значения T и фазы минимума солнечного цикла.

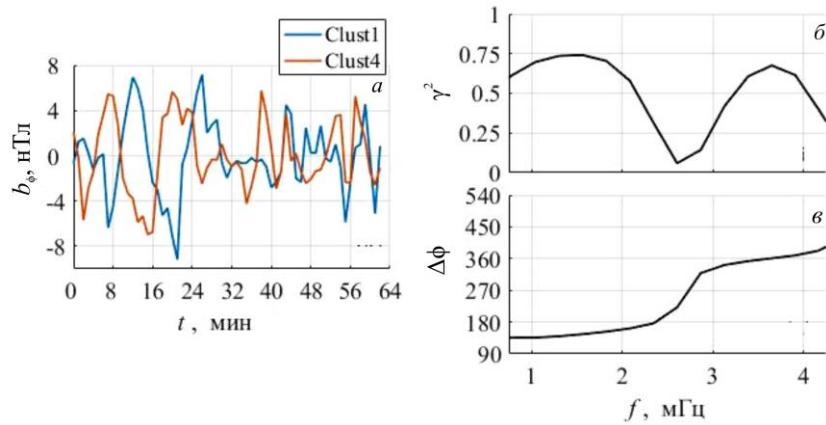


Рис. 9. Магнитограммы (а), спектральная когерентность γ^2 (б) и разность фаз $\Delta\Phi$ (в) вариаций компоненты b_ϕ по данным спутников Cluster-1 и -4 для того же временного интервала, что и на рис. 7, 8

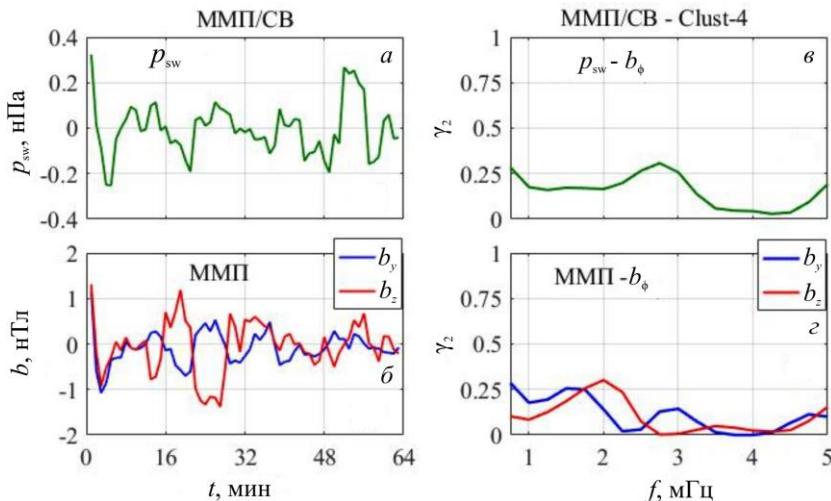


Рис. 10. Отфильтрованные ($f > 0.8$ мГц) вариации динамического давления P_{sw} (а) и компонент B_y и B_z ММП (б) и их когерентность с вариациями b_ϕ по данным спутника Cluster-4 (в, г) для того же временного интервала

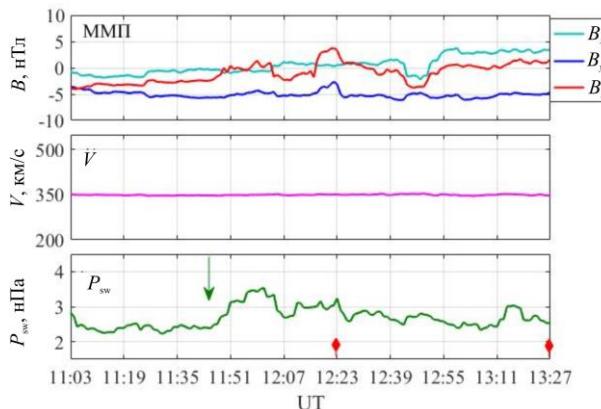


Рис. 11. Компоненты ММП, скорость и динамическое давление СВ для того же временного интервала, что и на рис. 7–10 (выделен красными маркерами), и предшествующего периода. Стрелкой отмечено начало подъема P_{sw}

Для компоненты b_p , так же как и для продольной компоненты b_t , максимальная когерентность наблюдается в дюле хвоста, но ее численные значения ниже, как и контраст Both IN/Both OUT, что приближает картину к наблюдаемой для компоненты b_ϕ . Различие же между классами Both OUT и MPCross для компоненты b_p меньше, чем для продольной компоненты,

и практически отсутствует для средних значений когерентности.

Анализ отдельного случая когерентных колебаний в ночном магнитослое показал, что их спектральный состав формируется внутри «большой магнитосферы», они имеют вид квазипериодических вариаций с частотой главного максимума 1.5 мГц, распространяющихся в антисолнечном направлении. Событие развивается при низком уровне флюктуаций в межпланетной среде и невысокой скорости СВ. Низкая когерентность магнитных вариаций в магнитослое и внешних флюктуаций противоречит выводу работы [Gutynska et al., 2012], что в низкочастотной области связь с флюктуациями перед ударной волной обязательно проявляется в низкочастотных колебаниях. Это различие, вероятно, связано с тем, что в работе [Gutynska et al., 2012] анализ выполнялся для модуля магнитного поля и не включал поперечные колебания.

Почти на всем исследуемом интервале в подсолнечной точке отношение $|B_X|/|B_n| < 0.5$, т. е. условия ближе к условиям квазиперпендикулярной ударной волны (B_n — нормальная к линии Солнце–Земля компонента ММП), тогда как на фланге магнитопаузы условия ближе к условиям квазипараллельной волны.

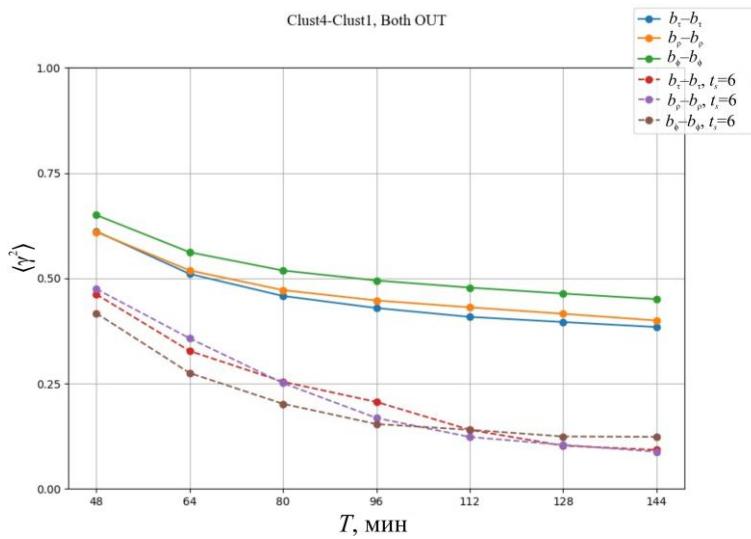


Рис. 12. Зависимости среднего в полосе значения когерентности $\langle \gamma^2 \rangle$ от длины интервала T для компонент магнитного поля при положении спутников в магнитослое (Both OUT). Сплошной линией показаны зависимости для одновременных, а штриховой — для смещенных данных

Следовательно, источником наблюдаемых колебаний могут быть обычно не учитываемые колебания динамического давления на поперечных компонентах скорости СВ и/или вариации B_x -компоненты ММП [Belenkaya, 1998; Cowley, 1981; Kubyshkina et al., 2023]. Кроме того, высокая изменчивость параметров плазмы и магнитного поля требует анализа реального распределения поля скоростей в магнитослое (см., например, [Shevurev, Zastenker, 2005]), что выходит за рамки настоящей работы.

Свойства рассматриваемых временных рядов могут отличаться от необходимых для корректного применения стандартных статистических тестов, а средняя когерентность квазипериодических процессов с широким спектром меняется в зависимости от их спектрального состава. Проведем анализ значимости результатов. В качестве индикатора связи между процессами будем использовать превышение когерентностью для данных на одних и тех же временных интервалах среднего уровня когерентности для этих рядов данных в любой момент времени. Сравним значения когерентности для данных одновременных измерений магнитного поля и этих же данных при ненулевом смещении одного ряда относительно другого. Поскольку рассматриваются пульсации в геомагнитном хвосте и магнитослое, суточного хода в вариациях параметров пульсаций нет, а выбор времени смещения t_s определяется двумя условиями. С одной стороны, t_s должно быть больше длительности интервалов, для которых проводился спектральный анализ, а с другой — за этот промежуток времени параметры вне магнитосферы не должны меняться слишком сильно. Исходя из этих требований, принимаем $t_s=6$ ч.

На рис. 12 показаны средние в полосе значения когерентности для одновременно измеренных и смещенных рядов данных для интервалов класса Both OUT, количество которых максимально, при тех же длинах интервалов, что и на рис. 1–6. Для всех пар компонент значения $\langle \gamma^2 \rangle$ для данных со смещением значительно ниже, чем для одновременных. Таким

образом, тест со смещенными рядами косвенно подтверждает значимость полученных результатов.

Выбор системы координат для анализа вариаций магнитного поля при наличии границы, на которой возникает разрыв в направлении главного поля, неоднозначен. В пользу адекватности выбранной системы координат свидетельствуют более высокие значения диагональных элементов матрицы спектральной когерентности, чем недиагональных (см. рис. 1–3), и значимая разница в результатах между продольной и поперечными компонентами (см. рис. 4–6). Тем не менее выбор ориентации поперечных компонент, реализованный по той же схеме, что и во внутренней магнитосфере, может быть не оптимальен и требует проверки для разных положений спутников относительно плоскости эклиптики и магнитосферных границ.

ВЫВОДЫ

Для всех положений спутника относительно магнитосферных границ и компонент магнитного поля наблюдается уменьшение спектральной когерентности γ^2 с длиной временного интервала. Для нижней границы показателя когерентности пульсаций $\langle \gamma_b^2 \rangle = 0.5$, определенной по среднему в полосе значению γ^2 , получены следующие основные результаты.

Когерентность максимальна для продольной компоненты вариаций магнитного поля b_r в доде магнитосферного хвоста. Для этой компоненты в магнитосферном хвосте пульсации когерентны во всем исследованном диапазоне периодов, т. е. масштаб когерентности превышает 2.5 ч. Для b_r фиксируется максимальный контраст между магнитосферным хвостом и магнитослоем: в магнитослое и окрестности магнитопаузы масштаб когерентности составляет 1 ч.

Для поперечных компонент вариаций магнитного поля масштаб когерентности составляет от 1 ч до 100 мин. Для компоненты b_ϕ максимально влияние магнитопаузы. Для этой компоненты масштаб

когерентности составляет 100 мин для магнитосферного хвоста и магнитослоя и 1 ч — для окрестностей магнитопаузы, что подтверждает наличие во фланговом магнитослое колебаний диапазона Pc5/Pi3, «расцепленных» как с внешними флуктуациями, так и с пульсациями в хвосте.

Для компоненты b_ρ масштаб когерентности составляет 100 мин для магнитосферного хвоста, как для b_ϕ , и 1 ч для магнитослоя и окрестностей магнитопаузы, как для b_τ .

Квазигармонические поперечные волновые УНЧ-возмущения, когерентные в магнитослое и «расцепленные» с внешними флуктуациями, могут развиваться при невысоких скоростях СВ и интенсивности флуктуаций ММП и динамического давления СВ.

Авторы благодарны рецензентам за внимательное прочтение рукописи и полезные замечания. 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 № 24-77-10012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Леонович 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) / Leonovich A.S., Mazur V.A., Kozlov D.A. MHD waves in the geomagnetic tail: a review. *Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 1, no. 1, pp. 4–22. DOI: [10.12737/7168](https://doi.org/10.12737/7168).
- Рахманова Л.С., Хохлачев А.А., Рязанцева М.О. и др. Развитие турбулентности за околоземной ударной волной в периоды спокойного и возмущенного солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 2, с. 15–28. DOI: [10.12737/szf-102202402](https://doi.org/10.12737/szf-102202402) / Rakhmanova R., Khokhlačev A., Riazantseva M., Yermolaev Y., Zastenker G. Turbulence development behind the bow shock during disturbed and undisturbed solar wind. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, no. 2, pp. 13–25. DOI: [10.12737/102202402](https://doi.org/10.12737/102202402).
- Стуков Д.А., Ягова Н.В. Временные масштабы когерентности пульсаций магнитного поля диапазона 1–5 мГц в геомагнитном хвосте и ночном магнитослое. *Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (БШФФ–2024) «Физические процессы в космосе и околоземной среде» и Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*. Иркутск, 2024, с. 220–222.
- Ягова Н.В. Наклон спектра высоколатитных 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).
- Ягова Н.В., Евсина Н.С. Геомагнитные пульсации диапазона 1–4 мГц (Pc5/Pi3) в магнитосферном хвосте. Вне и внутримагнитосферные источники. *Космические исследования*. 2024, т. 62, № 4, с. 334–340. DOI: [10.31857/S0023420624040039](https://doi.org/10.31857/S0023420624040039).
- 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) / Yagova N.V., Kozyreva O.V., Nosikova N.S. Geomagnetic pulsations in 1–4 mHz frequency range (Pc5/Pi3) in the magnetotail at different levels of disturbances in the interplanetary medium. *Sol.-Terr. Phys.* 2022, vol. 8, iss. 3, pp. 76–83. DOI: [10.12737/stp-82202212](https://doi.org/10.12737/stp-82202212).
- Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A. Spectra and anisotropy of magnetic fluctuations in the Earth's magnetosheath: Cluster observations. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 3585–3596. DOI: [10.5194/angeo-26-3585-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-3585-2008).
- Belenkaya E.S. Reconnection modes for near-radial interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, pp. 26487–26494. DOI: [10.1029/98JA02270](https://doi.org/10.1029/98JA02270).
- Cowley S.W.H. Asymmetry effects associated with the x-component of the IMF in a magnetically open magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1981, vol. 29, iss. 8, pp. 809–818. DOI: [10.1016/0032-0633\(81\)90071-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90071-4).
- Escoubet C.P., Fehringer M., Goldstein M. The Cluster mission. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 1197–1200. DOI: [10.5194/angeo-19-1197-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1197-2001).
- Escoubet C.P., Masson A., Laakso H., Goldstein M.L. Recent highlights from Cluster, the first 3-D magnetospheric mission. *Ann. Geophys.* 2015, vol. 33, pp. 1221–1235. DOI: [10.5194/angeo-33-1221-2015](https://doi.org/10.5194/angeo-33-1221-2015).
- Gutynska O., Šafránková J., Němecěk Z. Correlation length of magnetosheath fluctuations: Cluster statistics. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 2503–2513. DOI: [10.5194/angeo_26_2503_2008](https://doi.org/10.5194/angeo_26_2503_2008).
- Gutynska O., Šafránková J., Němecěk Z. Correlation properties of magnetosheath magnetic field fluctuations. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, no. A8, A08207. DOI: [10.1029/2009JA014173](https://doi.org/10.1029/2009JA014173).
- Gutynska O., Šimůnek J., Šafránková J., et al. Multipoint study of magnetosheath magnetic field fluctuations and their relation to the foreshock. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A04214. DOI: [10.1029/2011JA017240](https://doi.org/10.1029/2011JA017240).
- Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F., et al. On the existence of the Kolmogorov inertial range in the terrestrial magnetosheath turbulence. *Astrophys. J. Lett.* 2017, vol. 836, L10. DOI: [10.3847/2041-8213/836/1/L10](https://doi.org/10.3847/2041-8213/836/1/L10).
- Kepko L., Spence H.E., Singer H.J. ULF waves in the solar wind as direct drivers of magnetospheric pulsations. *Geophys. Res. Lett.* 2002, vol. 29, iss. 8. DOI: [10.1029/2001GL014405](https://doi.org/10.1029/2001GL014405).
- Kim K.-H., Cattell C.A., Lee D.-H., et al. Magnetospheric responses to sudden and quasiperiodic solar wind variations. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, iss. A11, p. 1406. DOI: [10.1029/2002JA009342](https://doi.org/10.1029/2002JA009342).
- Kubyshkina M.V., Semenov V.S., Tsyganenko N.A., et al. Unraveling the role of IMF B_x in driving geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023, vol. 128, e2022JA031275. DOI: [10.1029/2022JA031275](https://doi.org/10.1029/2022JA031275).
- Nosikova N.S., Ягова Н.В., 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, pp. 151–165. DOI: [10.5194/angeo-40-151-2022](https://doi.org/10.5194/angeo-40-151-2022).
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Yermolaev Y. Dynamics of plasma turbulence at Earth's bow shock and through the magnetosheath. *Astrophys. J.* 2020, vol. 901, p. 30. DOI: [10.3847/1538-4357/abae00](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abae00).
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Yermolaev Y. Role of the variable solar wind in the dynamics of small-scale magnetosheath structures. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2023, vol. 10. DOI: [10.3389/fspas.2023.1121230](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1121230).
- Shevyrev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks. *Planet. Space Sci.* 2005, vol. 53, pp. 95–102. DOI: [10.1016/j.pss.2004.09.033](https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033).
- Shevyrev N.N., Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., et al. High and low frequency large amplitude variations of plasma and magnetic field in the magnetosheath: Radial profile and some features. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 31, pp. 1389–1394. DOI: [10.1016/S0273-1177\(03\)00008-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00008-5).

Shevyrev N.N., Zastenker G.N., Du J. Statistics of low-frequency variations in solar wind, foreshock and magnetosheath: INTERBALL-1 and CLUSTER data. *Planetary Space Sci.* 2007, vol. 55, pp. 2330–2335.

DOI: [10.1016/j.pss.2007.05.014](https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.05.014).

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, pp. 9281–9293.

DOI: [10.1002/2015JA021584](https://doi.org/10.1002/2015JA021584).

Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., Němeček Z., et al. Multi-spacecraft measurements of plasma and magnetic field variations in the magnetosheath: Comparison with Spreiter models and motion of the structures. *Planetary Space Sci.* 2002, vol. 50, iss. 5-6, pp. 601–612. DOI: [10.1016/S0032-0633\(02\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00039-9).

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 31 марта 2025 г.).

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (дата обращения 31 марта 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.

Как цитировать эту статью:

Стуков Д.А., Ягова Н.В. Временные масштабы когерентности длиннопериодных УНЧ-вариаций магнитного поля в окрестности ночной магнитопаузы. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 132–142. DOI: [10.12737/szf-114202513](https://doi.org/10.12737/szf-114202513).