

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ДИАПАЗОНА 1–4 мГц (Pc5/Pi3) В МАГНИТОСФЕРНОМ ХВОСТЕ. ВНЕ И ВНУТРИМАГНИТОСФЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ

© 2024 г. Н. В. Ягова^{1, *}, Н. С. Евсина^{1, 2}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*nyagova@ifz.ru

Поступила в редакцию 28.09.2023

После доработки 01.12.2023

Принята к публикации 26.12.2023

По данным магнитометрических измерений на спутниках Cluster исследуются спектральные и пространственные параметры геомагнитных пульсаций Pc5/Pi3 в геомагнитном хвосте вне магнитной бури при разных условиях в межпланетной среде. Рассматриваются как средние значения компонент магнитного поля перед ударной волной, так и флуктуации в частотном диапазоне исследуемых пульсаций. Особое внимание уделяется условиям малых амплитуд флуктуаций («нулевая» возмущенность), чтобы локализовать источник возникающих в этих условиях пульсаций. Для этого используются одновременные измерения на двух спутниках, находящихся по одну или разные стороны от магнитопаузы. Обнаружено, что при снижении амплитуды флуктуаций перед ударной волной меняется амплитуда и пространственный масштаб флуктуаций в магнитослое, а также резко снижается когерентность между флуктуациями по разные стороны магнитопаузы. Это позволяет сделать вывод, что пульсации, возникающие в геомагнитном хвосте при «нулевой» возмущенности перед ударной волной, представляют собой внутримagnetосферное явление, слабо связанное с процессами за магнитопаузой.

DOI: 10.31857/S0023420624040039, EDN: JJDQEW

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает исследование [1], где приведен подробный обзор длиннопериодных геомагнитных пульсаций в магнитосферном хвосте. В хвосте магнитосферы генерируются все основные типы магнитогидродинамических (МГД) волн, существующих в магнитосфере (см., например, обзор [2]), лишь с тем отличием, что на открытых силовых линиях не могут возникать стоячие волны, хотя частичное отражение и формирование квазирезонатора возможно и без резкой границы — на неоднородности в профиле альвеновской скорости [3]. Кроме того, существуют специфические хвостовые изгибные (flapping) колебания, отличающиеся от основных типов магнитосферных МГД-волн [4].

Хотя плотность плазмы и магнитное поле испытывают на магнитопаузе разрыв, когерентные колебания по обе стороны магнитопаузы наблюдаются достаточно часто [5–6]. Это может быть связано как с колебаниями магнитопаузы, так и тем, что крупномасштабные возмущения слабо затухают с расстоянием, и их амплитуды остаются конечными в области, где волна не распространяется.

В работе [1] показано, что среди наблюдающихся в геомагнитном хвосте пульсаций частотного диапазона 1...5 мГц (Pc5/Pi3) можно выделить пульсации, характеризующиеся большим пространственным масштабом и слабой зависимостью амплитуды от амплитуды флуктуаций межпланетного магнитного поля (ММП) и динамического давления солнечного ветра перед ударной волной. При этом остается открытым вопрос об источнике пульсаций при «нулевой» возмущенности. Пульсации могут иметь магнитосферное происхождение или возникать в области между отошедшей ударной волной и магнитопаузой — магнитослое. Исследованию вопроса об источниках пульсаций посвящена настоящая работа.

ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

Для анализа использовались данные магнитометрических измерений на спутниках Cluster 1–3 [7] за 2008–2011 гг., вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности.

Миссия Cluster представляет собой четыре спутника, расстояние между которыми меняется от 0.3 до 2.5 радиусов Земли R_E . Для выполнения условий слабой и умеренной возмущенности

из рассмотрения исключаются периоды главной и восстановительной фаз магнитных бурь с $Dst < -50$ нТл (день бури и четыре дня после минимума Dst) и высокой геомагнитной активности вне бури, благоприятные условия для которой связаны с существенно отрицательной вертикальной компонентой ММП. Для анализа отбирались дни с $B_Z > -2.5$ нТл. Чтобы локализовать источник пульсаций при низкой интенсивности внешних флуктуаций, отбирались интервалы, когда в течение как минимум 80 мин два спутника находились одновременно в ночном магнитослое (NMS) и / или за магнитопаузой: в высокоширотном пограничном слое (HLBL) или доле геомагнитного хвоста (TL). Таким образом был сформирован основной массив данных суммарной длительностью >100 ч. С учетом наложенных требований достаточное для статистического анализа количество наблюдений получилось для сочетаний положений спутников: NMS – NMS, NMS – HLBL, TL – TL.

Амплитуда флуктуаций межпланетного поля перед ударной волной (далее – внешних флуктуаций) анализировалась по данным измерений в точке либрации, пересчитанных к подсолнечной точке магнитопаузы, представленных с минутным разрешением (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Для анализа использовались вариации трех компонент ММП и динамического давления солнечного ветра P_{SW} . Предварительный анализ показал близкую к единице корреляцию спектральной плотности мощности (PSD) для всех компонент магнитного поля; для дальнейшего анализа выбрана только B_Y -компонента, для которой выявлена сильная связь с геомагнитными пульсациями Pc5/Pi3 в магнитосфере и на Земле [6].

По параметру PSD внешних флуктуаций были выделены интервалы низкой (группа 0) и повышенной (группа 1) интенсивности. Для интервалов группы 0 были установлены пороговые значения для однократного скачка B_Y - и B_Z -компонент ММП, динамического давления солнечного ветра P_{SW} и PSD на частоте главного спектрального максимума f_0 флуктуаций B_Y и P_{SW} в течение 3 ч. Для отбора интервалов группы 1 использовалось условие надпороговых значений $PSD(f_0)$ для B_Y и P_{SW} . Полная длительность интервалов групп 0 и 1 составила соответственно 17 и 14 ч. Следует отметить, что уровень внешних флуктуаций в рассматриваемый период ниже, чем в 2016 г., для которого выполнялось исследование [1], и большая часть интервалов группы 1 не попадают в число возмущенных интервалов по использованному тогда критерию. Фактически в настоящем исследовании рассматриваются низкие и умеренные уровни амплитуд внешних флуктуаций.

Для оценки спектральных параметров пульсаций в скользящем окне длительностью 96 мин с шагом 10 мин вычислялись параметры PSD,

спектральные когерентности γ^2 и разность фаз $\Delta\phi$ для всех сочетаний пар спутников и компонент магнитного поля. Для количественной оценки спектрального состава использовались, определенные по методике работы [8], наклон спектра α и параметр Q , характеризующий наличие выделенного максимума вблизи центральной частоты рассматриваемой частотной полосы. Для анализа пульсаций в магнитослое и когерентности по разные стороны магнитопаузы использовалась геоцентрическая солнечно-эклиптическая система координат GSE, а для пульсаций в доле хвоста выполнялся пересчет в локальную систему отсчета, связанную с магнитным полем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим, как меняются флуктуации в ночном магнитослое при уменьшении амплитуды внешних флуктуаций. На рис. 1 показаны распределения по частотам главного спектрального максимума f_0 и спектральной плотности мощности на этой частоте $PSD(f_0)$ в ночном магнитослое при повышенной (группа 1) и низкой (группа 0) интенсивности внешних флуктуаций. Для обеих групп наиболее вероятные значения частоты f_0 отличаются слабо и лежат вблизи 2 МГц, но для группы 0 распределение сдвинуто в сторону высоких частот. Наиболее вероятные значения $PSD(f_0)$ также близки для двух групп и составляют соответственно 650 и 250 нТл²/Гц для компонент B_X и B_Y/B_Z . При этом среднее значение $PSD(f_0)$ снижается для разных компонент в 1.5...2 раза при уменьшении внешней возмущенности.

Чтобы понять, как условия перед ударной волной влияют на проникновение флуктуаций магнитного поля через магнитопаузу, для двух групп пульсаций сравниваются распределения когерентности между вариациями магнитного поля в ночном магнитослое (NMS) и HLBL. Результаты представлены на рис. 2 в виде интегральной эмпирической функции вероятности $P(\gamma > \gamma_b)$, равной отношению числа интервалов, для которых когерентность выше заданной, к полному их числу. Для группы 0 $P(\gamma > \gamma_b)$ спадает с ростом γ_b существенно быстрее, чем для группы 1. В частности, доля интервалов с когерентностью ($\gamma_b^2 > 0.5$) падает практически до нуля.

Пример вариаций магнитного поля, одновременно наблюдавшихся перед ударной волной, в ночном магнитослое и в HLBL, показан на рис. 3. Перед ударной волной показаны также колебания динамического давления солнечного ветра. И временные формы, и спектры колебаний P_{SW} и B_X -компоненты в магнитослое (верхние панели рис. 3а, б) не демонстрируют схождения, что отражается в низкой когерентности (рис. 3в). В вариациях B_Y -компоненты перед ударной волной и в магнитослое

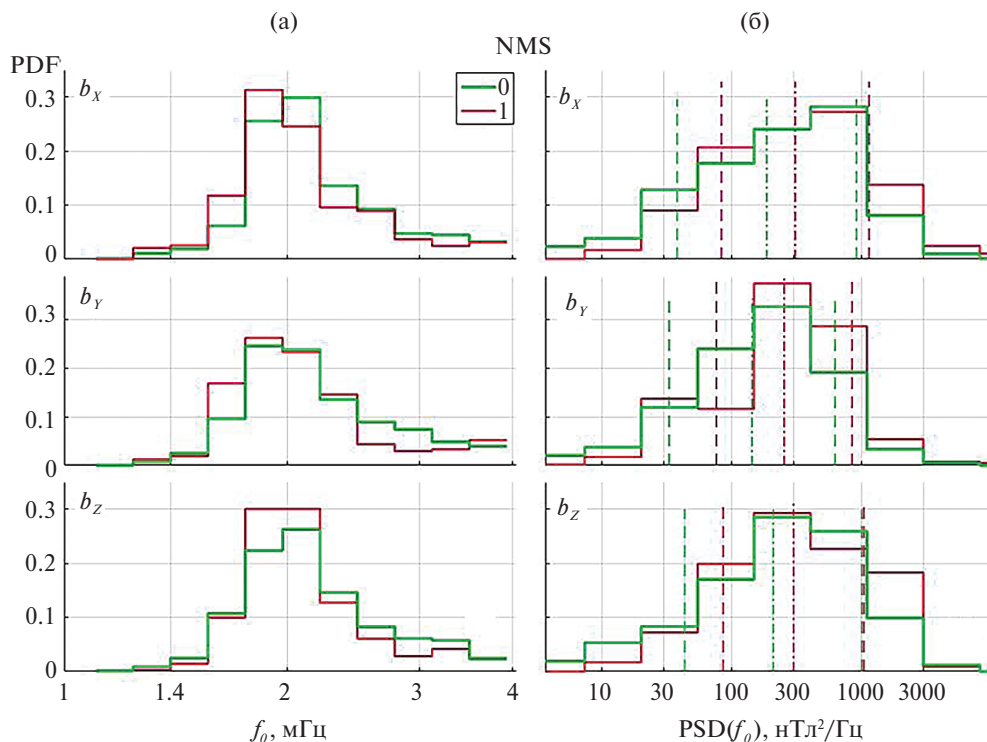


Рис. 1. Распределение по частотам главных спектральных максимумов f_0 (панель а) и спектральной плотности мощности $PSD(f_0)$ (панель б) для трех компонент магнитного поля в ночном магнитослое для групп интервалов 0 и 1. Вертикальными линиями на панели б показаны средние для каждого распределения PSD_{av} (штрих-пунктир) и $PSD_{av} \pm STD(PSD)$, $STD(PSD)$ – стандартное отклонение.

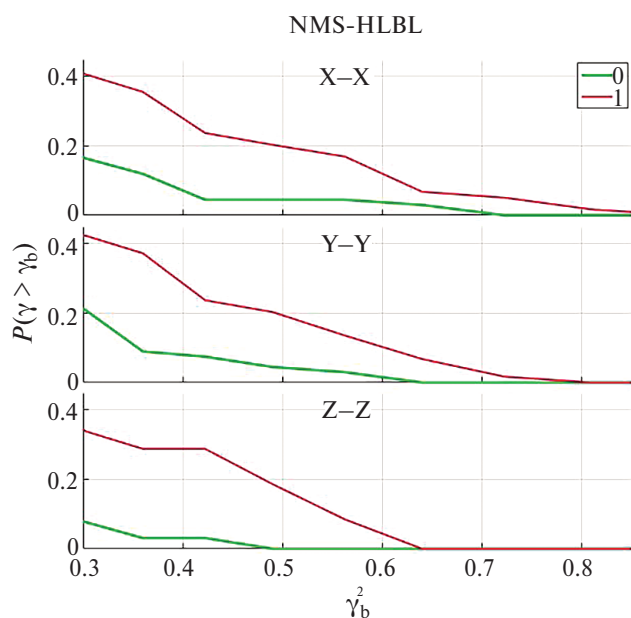


Рис. 2. Зависимость доли интервалов с надпороговой когерентностью вариаций магнитного поля на двух спутниках, расположенных по разные стороны магнитопаузы (NMS–HLBL) от порогового значения когерентности γ_b^2 для одноименных компонент магнитного поля.

(средние панели) видно, как степень сходства зависит от амплитуды вариаций: интенсивные вариации в интервале 10...30 мин практически совпадают (с учетом нормировки) перед ударной волной и в магнитослое, но так как длительность этого интервала мала по сравнению с полной, спектры PSD не имеют общих максимумов, а когерентность не поднимается выше 0.5. При этом для колебаний по обе стороны магнитопаузы (нижние панели) схожие колебания видны и после снижения амплитуды, спектральные максимумы наблюдаются на близких частотах, а когерентность $\gamma^2 > 0.5$ при всех $f > 1.3$ МГц. Все интервалы, когда когерентные вариации наблюдались по обе стороны магнитопаузы, были аналогичны показанным на рис. 3 или же, если амплитуда внешних флуктуаций была ниже, чем в рассмотренном случае, характеризовались меньшей когерентностью между внешними флуктуациями и вариациями в магнитослое.

Таким образом, как при умеренной амплитуде внешних флуктуаций (группа 1), так и при низкой (группа 0), спектр пульсаций, характерный для магнитосферного хвоста, формируется за ударной волной внутри «большой магнитосферы» [9]. При уменьшении амплитуды внешних флуктуаций падает и средняя когерентность пульсаций по обе стороны магнитопаузы.

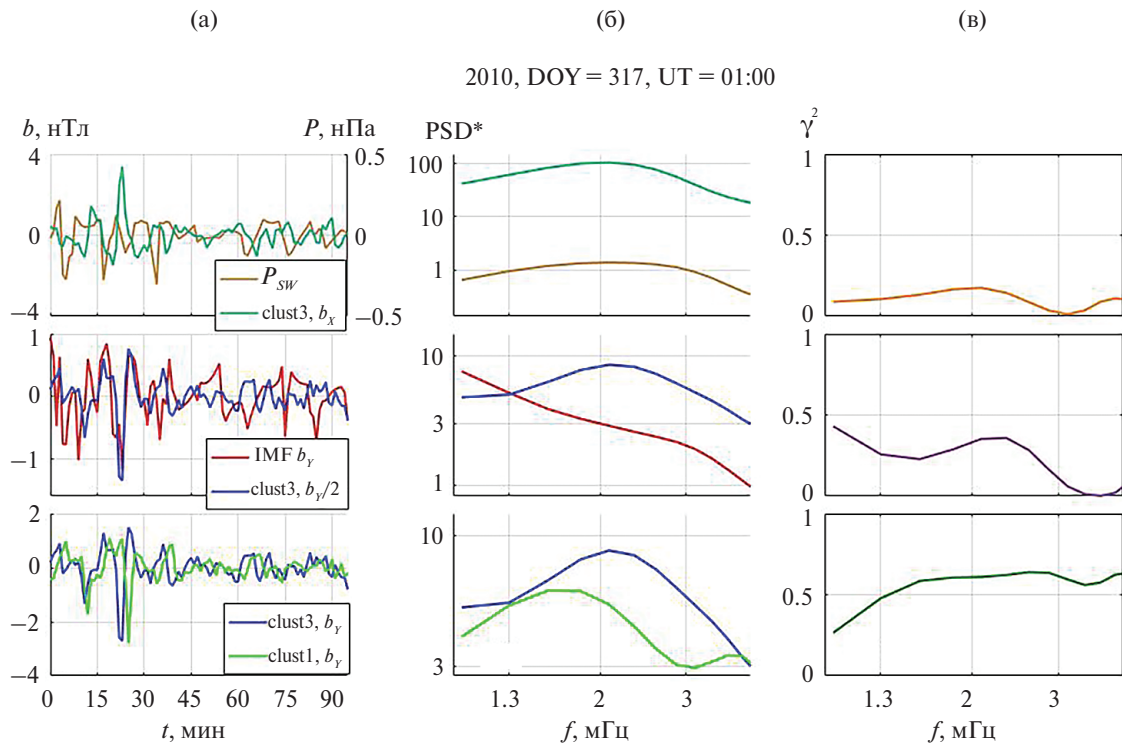


Рис. 3. Пример пульсаций магнитного поля, наблюдавшихся 13.XI.2010 (день 317) по обе стороны магнитопаузы на спутниках *Cluster-3* (NMS) и *Cluster-1* (HLBL) (нижние панели), флуктуаций динамического давления солнечного ветра и B_y -компоненты ММП (верхние и средние панели). На панели а показаны временные формы вариаций после высокочастотной фильтрации с частотой отсечки 0.8 МГц. На панели б представлены нормированные спектры PSD*, на панели в – спектральные когерентности.

На прохождение волн через границу раздела влияют как параметры среды вблизи границы, так и свойства волны, прежде всего, пространственный масштаб. Зависимость доли интервалов с надпороговой когерентностью $P(\gamma > \gamma_b)$ вариаций магнитного поля на двух спутниках в ночном магнитослое от величины порога показана на рис. 4 для диагональных элементов кросс-спектральной матрицы (одноименных компонент магнитного поля). Для группы 0 доля когерентных внутри магнитослоя флуктуаций ниже, чем для группы 1, что вместе с уменьшением амплитуды приводит к снижению когерентности между колебаниями по разные стороны магнитопаузы. Значения $P(\gamma > \gamma_b)$ для недиагональных элементов (не показаны на рисунке) слабо отличаются для двух групп и близки к значениям для диагональных элементов группы 0.

В публикациях [1, 10] было показано, что в доле хвоста регистрируются пульсации большого пространственного масштаба, амплитуда которых демонстрирует более слабую связь с амплитудой внешних флуктуаций, чем для пульсаций с пространственным масштабом порядка R_E . Для 2016 г., т.е. в начале фазы спада солнечной активности, доля этих пульсаций была значительно выше при низкой интенсивности внешних флуктуаций.

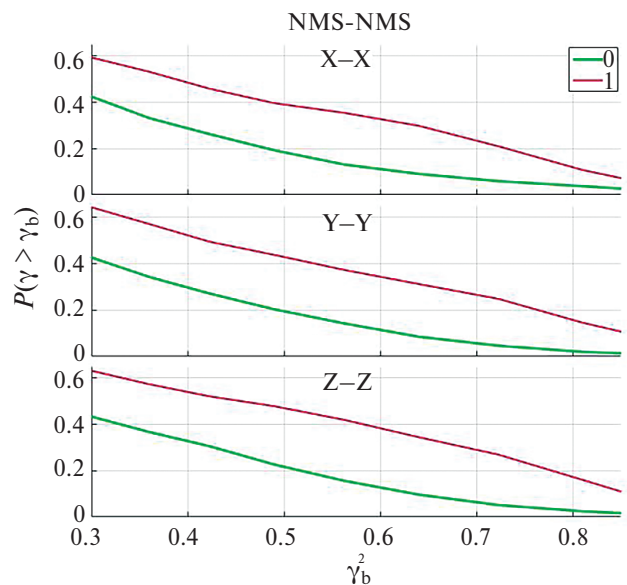


Рис. 4. Зависимость доли интервалов с надпороговой когерентностью вариаций магнитного поля на двух спутниках в ночном магнитослое от порогового значения когерентности γ_b^2 для одноименных компонент магнитного поля.

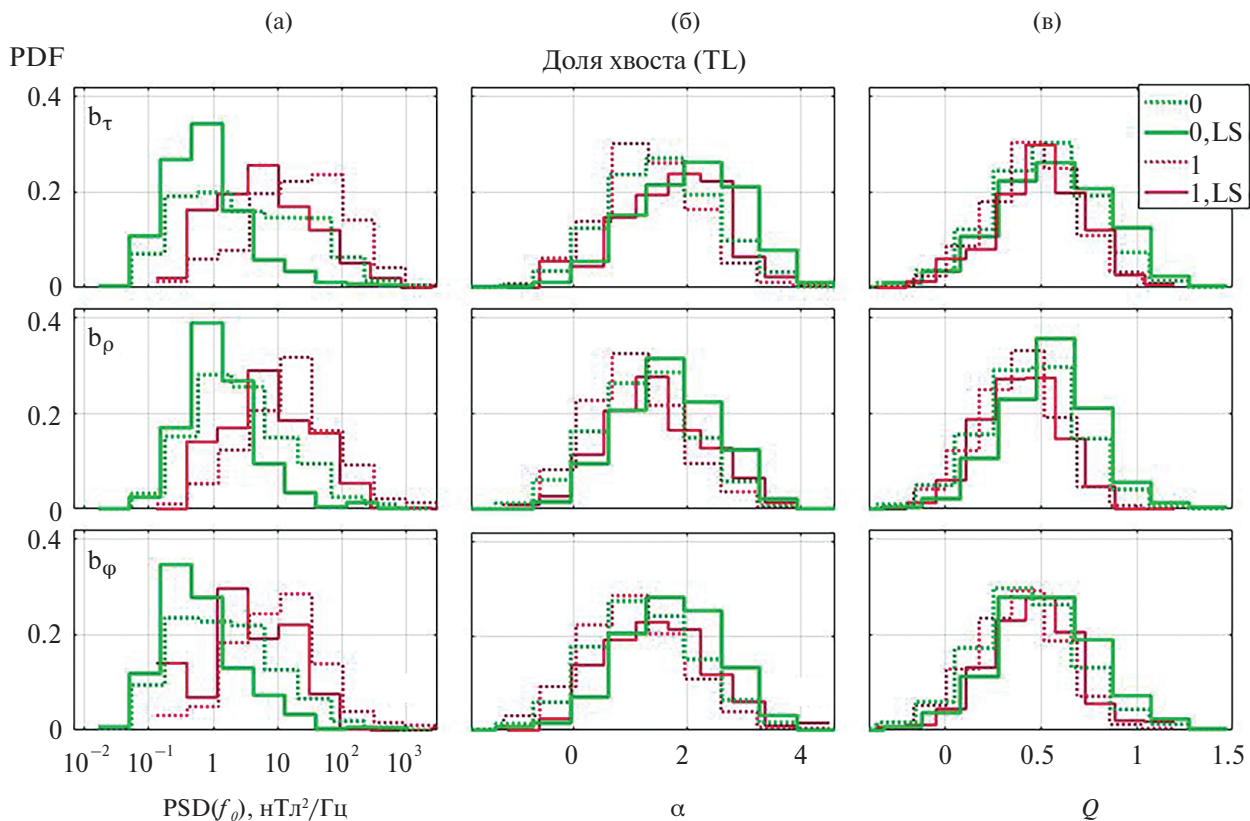


Рис. 5. Распределения по $\text{PSD}(f_0)$ (панель а), спектральному наклону α (панель б) и параметру Q (панель в) пульсаций групп 0 и 1, в том числе крупномасштабных (LS) для трех компонент магнитного поля в доле геомагнитного хвоста.

Рассмотрим, наблюдаются ли эти пульсации в минимуме солнечной активности. Так как в настоящем исследовании используются данные трех спутников и рассматривается более длительный период наблюдений, метод выделения крупномасштабных пульсаций был модифицирован, чтобы уже на стадии отбора прямо оценить пространственный масштаб пульсаций. Для этого выделялись пульсации со спектральной когерентностью $\gamma^2 > 0.5$, а из них выделялись крупномасштабные (LS) пульсации, для которых абсолютное значение отношения $m_{ef} = \Delta\phi/R$ в продольной компоненте b_τ не превышало 0.25 (здесь $\Delta\phi$ — разность фаз на частоте главного спектрального максимума; R — расстояние между спутниками в R_E). На рис. 5 для трех компонент магнитного поля показаны распределения по PSD на частоте главного спектрального максимума, спектральному наклону α , и параметру Q крупномасштабных пульсаций групп 0 и 1 и пульсаций этих же групп независимо от их пространственного масштаба. В продольной компоненте для всех пульсаций наиболее вероятное значение $\text{PSD}(f_0)$ почти на два порядка выше для группы 1, чем для группы 0, то для крупномасштабных — в 7 раз. Аналогичное уменьшение контраста наблюдается и для поперечных компонент

поля. Распределения по спектральным наклонам имеют схожий вид для всех компонент и групп пульсаций с максимумом при $\alpha \approx 1$ для обеих групп пульсаций, и представлены более высокими значениями — для крупномасштабных, причем самые высокие значения ($\alpha > 2$) наблюдаются для крупномасштабных пульсаций группы 0.

Для отдельных случаев, рассмотренных в работе [10], крупномасштабные пульсации группы 0, демонстрировали регулярные волновые формы, типичные для пульсаций на замкнутых силовых линиях. Это статистически подтверждается распределениями параметра Q , которые сдвинуты в сторону положительных значений для крупномасштабных пульсаций группы 0 относительно остальных групп пульсаций.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ пульсаций диапазона первых миллигерц (Pc5/Pi3) в геомагнитном хвосте и ночном магнитослое одновременно на двух спутниках показал, что при низком уровне внешних флуктуаций амплитуда вариаций магнитного поля в ночном магнитослое снижается при сохранении спектрального состава. При этом уменьшается

доля когерентных вариаций, т.е. уменьшается их пространственный масштаб. Это приводит к существенному уменьшению когерентности между вариациями магнитного поля по разные стороны магнитопаузы.

Когерентность же между внешними флуктуациями и пульсациями в ночном секторе «большой магнитосферы» остается низкой для всех рассмотренных событий. При этом амплитуды пульсаций растут с амплитудой внешних флуктуаций. Таким образом, внешние флуктуации являются одним из источников энергии для пульсаций в геомагнитном хвосте и ночном магнитослое, но для рассмотренных условий минимума солнечной активности почти нет случаев эффективного проникновения возмущений через ударную волну. В условиях «нулевого» уровня флуктуаций уменьшается и проникновение возмущений через магнитопаузу.

Одновременно в доле хвоста регистрируются пульсации большого пространственного масштаба, характерной особенностью которых является более слабая, чем в среднем, связь с амплитудой внешних флуктуаций и более регулярный вид с выраженным спектральным максимумом вблизи 2 МГц, что количественно выражается большими значениями параметра Q . Наиболее вероятное значение спектрального наклона для этих пульсаций $\alpha \approx 2$, что несколько выше, чем для других групп.

Следует обозначить, что отличие в распределениях спектрального наклона между пульсациями с разным пространственным масштабом и при разной интенсивности внешних флуктуаций в рассматриваемый период меньше, чем полученное в работе [1] для фазы спада солнечной активности, а уменьшение наклона сменилось его слабым ростом при переходе к большим пространственным масштабам пульсаций и низким уровням внешних флуктуаций. Частично это может быть результатом отличий в методике обработки. В настоящей работе использовался заметно больший массив данных, что позволило сделать более строгой процедуру отбора. Отметим, что отличия в абсолютных значениях спектрального наклона в настоящей работе и в исследовании [1] связано с тем, что в работе [1] для наклона использовались относительные единицы.

Другая группа причин может быть связана с более длинным, чем используемый трехчасовой интервал, временем, на котором сохраняется связь между амплитудами пульсаций в магнитосферном хвосте и внешних флуктуаций. Кроме того, амплитуда пульсаций в магнитосфере зависит от скорости солнечного ветра, среднее значений которой в 2016 г. было выше, чем в 2008–2011 гг. Для количественной оценки вклада этих факторов необходим анализ параметров пульсаций в течение 1...2 полных циклов солнечной активности.

ВЫВОДЫ

1. Амплитуда пульсаций диапазона Pc5/Pi3 в геомагнитном хвосте в минимуме солнечной активности зависит от интенсивности флуктуаций межпланетного магнитного поля и динамического давления солнечного ветра перед ударной волной (внешних флуктуаций), но волновые формы и спектры пульсаций по разные стороны от отошедшей ударной волны отличаются, что проявляется в низких значениях спектральной когерентности. Это позволяет сделать вывод, что внешние флуктуации являются одним из источников энергии для исследованных пульсаций, но вид колебаний определяется свойствами плазмы за ударной волной.

2. При умеренных амплитудах внешних флуктуаций вариации магнитного поля в ночном магнитослое могут демонстрировать высокую когерентность с пульсациями в высокоширотном пограничном слое (HLBL). Если же амплитуды внешних флуктуаций малы, пульсации по разные стороны магнитопаузы становятся некогерентными. Таким образом, при умеренной интенсивности внешних флуктуаций наблюдаются колебания, захватывающие пограничные области по обе стороны магнитопаузы, а при низкой — область, занятая когерентными колебаниями, ограничена магнитопаузой.

3. Для крупномасштабных пульсаций в доле хвоста зависимость от интенсивности внешних флуктуаций слабее, чем в среднем для пульсаций данной группы. Крупномасштабные колебания в доле хвоста при низкой интенсивности внешних флуктуаций имеют наиболее регулярный вид из всех исследованных колебаний, что проявляется в больших значениях параметра спектральной формы Q .

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Центру космических полетов имени Р. Годдарда НАСА за данные измерений магнитного поля на спутниках *Cluster* и параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра, представленные на сайте <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН и была представлена на Первой конференции им. М.И. Панасюка «Проблемы космофизики», 10–13 июня 2023 г., Дубна.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. С. 84–92.
<https://doi.org/10.12737/szf-82202212>
2. Леонович А.С., Мазур В.А., Козлов Д.А. МГД волны в геомагнитном хвосте: обзор // Солнечно-земная физика. Т. 1. 2015. С. 4–22.
<https://doi.org/10.12737/7168>
3. Pilipenko V.A., Mazur N.G., Fedorov E.N. et al. Interaction of propagating magnetosonic and Alfvén waves in a longitudinally inhomogeneous plasma // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. ID. A08218.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012651>
4. Zhang T.L., Baumjohann W., Nakamura R. et al. A wavy twisted neutral sheet observed by CLUSTER // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. Art. ID. 1899.
<https://doi.org/10.1029/2002GL015544>
5. Kepko L., Spence H.E., Singer H.J. ULF waves in the solar wind as direct drivers of magnetospheric pulsations // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. Art. ID. 1197.
<https://doi.org/10.1029/2001GL014405>
6. 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. V. 109. Art. ID. A04219.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010328>
7. Escoubet C.P., Fehringer M., Goldstein M. The Cluster mission // Ann. Geophys. 2001. V. 19. P. 1197–1200.
<https://doi.org/10.5194/angeo-19-1197-2001>
8. Yagova N.V., Pilipenko V.A., Baransky L.N. et al. Spatial distribution of spectral parameters of high latitude geomagnetic disturbances in the Pc5/Pi3 frequency range // Ann. Geophysicae. 2010. V. 28. P. 1761–1775.
9. 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.
<https://doi.org/10.7868/S0016794015010149>
10. 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. V. 40. P. 151–165.
<https://doi.org/10.5194/angeo-40-151-2022>