

ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ КОГЕРЕНТНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИАПАЗОНА 1–5 МГц В ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ И НОЧНОМ МАГНИТОСЛОЕ

Д.А. Стуков, Н.В. Ягова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия,
sda@ifz.ru

COHERENCE TIMESCALES OF THE MAGNETIC FIELD PULSATIONS IN 1–5 MHz RANGE IN THE MAGNETOTAIL AND NIGHT MAGNETOSHEATH

D.A. Stukov, N.V. Yagova

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia,
sda@ifz.ru

Аннотация. Исследуются флуктуации магнитного поля в магнитослое и геомагнитных пульсаций в магнитосферном хвосте в диапазоне 1–5 МГц (Pc5/Pi3). По данным магнитометрических измерений на спутниках Cluster за 2016 г. рассматривается зависимость спектральной когерентности вариаций магнитного поля от длины интервала при различных расположениях спутников относительно магнитопаузы. Показано, что спад когерентности при увеличении длины интервала T примерно одинаков для магнитного хвоста и магнитослоя при $T \leq 64$ мин, а при больших значениях T когерентность в магнитослое спадает быстрее, чем в геомагнитном хвосте.

Ключевые слова: магнитосфера, геомагнитные пульсации, магнитосферный хвост

Abstract. This study investigates fluctuations of the magnetic field in the magnetosheath and geomagnetic pulsations in the magnetotail in the range of 1–5 mHz (Pc5/Pi3). According to the data of magnetic measurements on the Cluster satellites in 2016, the dependence of the spectral coherence of magnetic field variations on the length of the interval is considered for different locations of the satellites relative to the magnetopause. It is shown that the decrease in coherence with increasing interval length T is approximately the same for the magnetotail and the magnetosheath at $T \leq 64$ minutes, and at larger values of T , the coherence in the magnetosheath decreases faster than in the magnetotail.

Keywords: magnetosphere, geomagnetic pulsations, magnetotail

ВВЕДЕНИЕ

В геомагнитном хвосте возникают волны всех основных магнитогидродинамических (МГД) типов и специфические для хвоста изгибные колебания [Tsutomi, Teruki, 1976]. Экспериментальные исследования показали, что глобальные пульсации могут возникать на расстояниях до десятков радиусов Земли R_E [Saraforopoulos and Sarris, 1994]. Средняя амплитуда геомагнитных пульсаций диапазона Pc5 растёт с ростом флуктуаций динамического давления солнечного ветра [Wang et al., 2015]. При удалении от Земли частота пульсаций уменьшается, причем в дальнем хвосте преобладают бегущие волны, а в ближнем хвосте — стоячие [Zhang et al., 2018]. Настоящая работа является продолжением серии исследований [Nosikova et al., 2022; Ягова и др., 2022, Ягова и др., 2024]. В этих работах выявлено, что пространственных масштаб когерентности пульсаций в геомагнитном хвосте и их связь с вариациями геомагнитного поля в ночном магнитослое зависит от интенсивности внемагнитосферных флуктуаций в том же частотном диапазоне. При низком уровне флуктуаций динамического давления солнечного ветра и ММП перед ударной волной пульсации в долях геомагнитного хвоста демонстрируют высокую добротность и оказываются слабо связанными с флуктуациями поля в магнитослое. В этих работах все оценки когерентности выполнялись для одной длины спектрального интервала. В настоящей работе длина интервала T варьируется, что позволяет оценить не только абсолютные значения спектральной когерентности γ^2 для одного значения длины интервала T , но и характер зависимости $\gamma^2(T)$.

ДАнные И ОБРАБОТКА

Миссия Cluster представляет собой четыре спутника, расстояние между которыми меняется от 0.3 до 2.5 R_E . Магнитометрические измерения осуществлялись магнитонасыщенным (fluxgate) магнетометром с исходным временным шагом около 4 с [Escoubet et al., 2001]. Для анализа были использованы данные спутников Cluster2 и Cluster4 за 2016 г. Первичная обработка включала выбор положений спутников по данным SSCWEB [https://sscweb.gsfc.nasa.gov/], отбор данных без выбросов и поворот в систему координат по магнитному полю. Поворот осуществлялся с использованием данных собственных измерений спутника: для времени t_0 текущее значение вектора магнитного поля определялось в скользящем окне длительностью 20 мин ($t_0 \pm 10$ мин). Компонента B_t ориентирована вдоль главного магнитного поля, B_p перпендикулярна ей и лежит в плоскости, образованной касательной к линии поля и проходящей через центр Земли, а B_ϕ образует с ними правую тройку векторов. Для анализа отбираются интервалы длительности, превышающей заданный порог, для которых рассчитывается спектральная когерентность. Предварительный отбор выделил три варианта взаимного расположения спутников: оба спутника в доле хвоста (both in), пересечение магнитопаузы (MP crossing), оба спутника в магнитослое (both out). Обработка данных проводилась в среде Python с использованием библиотеки Scipy. Перед спектральным анализом выполнялась фильтрация в полосе 0.8–8.3 МГц и децимация к шагу

60 с. Далее для вариаций магнитного поля после фильтрации используется обозначение b с соответствующим индексом, чтобы отличить их от исходных значений магнитного поля B . Спектральный анализ выполнялся для интервалов от 48 до 96 мин. Для расчёта спектральной плотности мощности (PSD) и когерентности применялись функции *Periodogram* и *Coherence* библиотеки *Scipy.signal* со следующими параметрами: *window* = 'blackman', *nperseg* = 32, *noverlap* = 24, *nfft* = 128. Параметры окна Блэкмана: ширина окна — 16 мин, перекрытие окон — 4 мин. Так как осредненный спектр PSD в геомагнитном хвосте может быть аппроксимирован обратностепенной зависимостью PSD от частоты [Ягова и др, 2022], для отбора событий использовалось условие на спектр мощности

$$P_{max} \cdot f_{max}^{\alpha} > P_b \quad (1)$$

в полосе 1–5 МГц при $\alpha = 1.5$, $P_b = 5$, где f_{max} — частота максимума, $P_{max} = \max(P(f))$. Использованный порог соответствует уровню амплитуд в несколько десятых нТл, для которых в геомагнитном хвосте регистрировались когерентные пульсации [Nosikova et al., 2022]. Когерентности для пары компонент рассчитывались, если условие (1) было выполнено для хотя бы одной из них.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Количество интервалов, позволяющее выполнить статистический анализ зависимости $\gamma^2(T)$, оказалось достаточным для расположений «both in» и «both out» для пар компонент, включающих продольную компоненту b_z . Для всех отобранных интервалов и пар компонент вычислялись спектры когерентности $\gamma^2(f)$ и максимальное значение γ^2_{max} в полосе 1–5 МГц. Результаты представлены на рис 1–3 в виде зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$, где $\langle \gamma^2_{max} \rangle$ — среднее по всем интервалам заданной длины значение γ^2_{max} , а T — длина интервала. Для всех рассмотренных случаев среднее по диапазону изменений T значения γ^2_{max} для положения «both in» превышает значения «both out». При этом характер зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ и разность значений γ^2_{max} отличается для случая компоненты b_z на обоих спутниках и пар, составленных из продольной и поперечной компонент. В первом случае (рис. 1) когерентность в геомагнитном хвосте выше, чем в магнитослое для всех значений T . Для положения «both in» при $T = 80$ мин спад сменяется плато, в отличие от «both out», где $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ убывает во всем диапазоне T . В случае разных компонент независимо от расположения спутников при $T \leq 64$ мин наблюдается практически одинаковый спад когерентности, а при больших значениях T спад замедляется для положения «both in» и сохраняется для положения «both out». В результате в магнитосферном хвосте когерентность при $T = 96$ мин оказывается примерно в 1.5 раза выше, чем в магнитослое, где она опускается ниже 0.5.

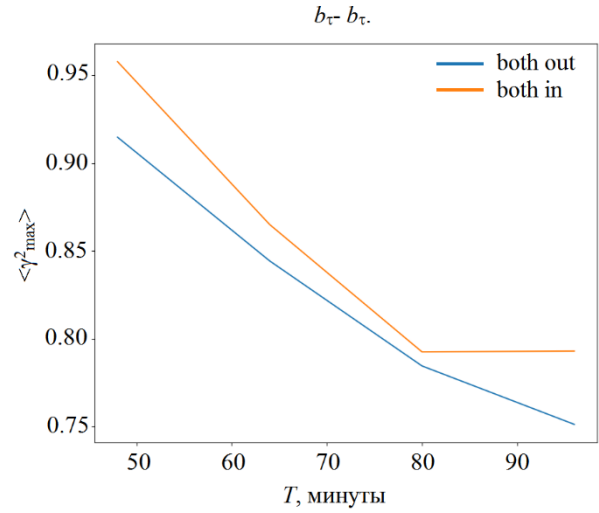


Рис. 1. Зависимость средних по всем интервалам с заданным положением спутников значений γ^2_{max} от длины интервала для пары компонент b_z - b_z

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ пульсаций диапазона первых миллигерц (Pc5/Pi3) в геомагнитном хвосте и ночном магнитослое на двух спутниках Cluster показал, что не только абсолютные значения, но и характер зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ отличается в магнитосферном хвосте и в магнитослое. Характер зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ позволяет выделить две области масштабов с границей около 1 ч. На меньших временах отличие между когерентностями вне- и внутримангитосферных пульсаций мало, а на больших временах они становятся существенными. Смена режима при $T = 64$ мин особенно явно проявляется для пар, включающих нормальные к главному магнитному полю компоненты (рис. 2–3). Для продольной компоненты отличие сохраняется во всем диапазоне изменения T , а граница режимов сдвинута к большим длительностям, причем для геомагнитного хвоста при $T = 80$ мин зависимость выполаживается. Полученные результаты показывают необходимость учитывать при анализе низкочастотных

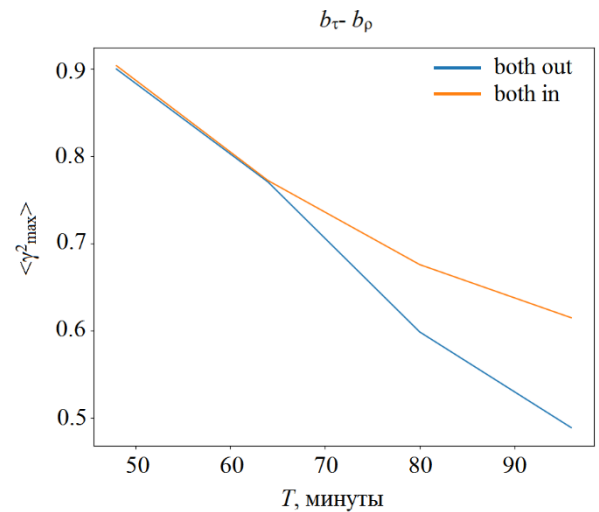


Рис. 2. То же для пары компонент b_z - b_p

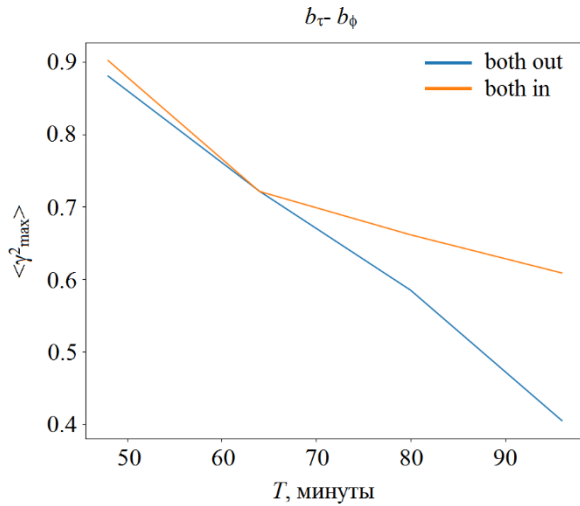


Рис. 3. То же для пары компонент b_{τ} - b_{ϕ}

геомагнитных пульсаций, типичных для внешних областей магнитосферы, геомагнитного хвоста и магнитослоя, не только абсолютное значение спектральной когерентности, но и характер его зависимости от длины интервала.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Р. 84–91.

Ягова Н.В., Евсина Н.С. Геомагнитные пульсации диапазона 1–4 мГц (Pc5/Pi3) в магнитосферном хвосте. Вне и внутримангитосферные источники // *Космические исследования*. 2024. Т. 62 (в печати)

Escoubet C.P., Fehringer M., Goldstein M. The Cluster mission // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. P. 1197–1200. DOI: 10.5194/angeo-19-1197-2001

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. DOI: 10.5194/angeo-40-151-2022.

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

Tsutomu T., Teruki M. Flapping motions of the tail plasma sheet induced by the interplanetary magnetic field variations // *Planetary and Space Sci.* 1976. V. 24. P. 147–159. DOI: 10.1016/0032-0633(76)90102-1.

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. V. 120. P. 9281–9293, DOI: 10.1002/2015JA021584.

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

URL: <https://sscweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 24.04.2024).