

УДК 551.510; 533.93

Л. Козак^{1,2}, Б. Петренко¹, Е. Кронберг³,
Е. Григоренко⁴, Е. Луи⁵, С. Черемных²

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
ул. Владимирская 64/13, Киев, Украина, 01601

²Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины
Проспект Академика Глушкова 40, корп. 4/1, Киев, Украина, 03680

³Институт Макса Планка
Юстус-фон-Либиг-Вег 3, Геттинген, Германия, 37077

⁴Институт космических исследований Российской академии наук
ул. Профсоюзная 84/32, Москва, Российская Федерация, 117997

⁵Университет имени Джона Хопкинса
Лаурел, штат Мериленд, США, 11100

Спектры турбулентности в области диполяризации магнитного поля

Проанализировано наличие неоднородностей турбулентных процессов и получены спектры турбулентности в областях до и во время диполяризации магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли по измерениям четырех космических аппаратов миссии «Кластер-2» (событие 21 сентября 2005 г.). Спектральный и вейвлет-анализ были дополнены исследованиями эксцесса флуктуаций модуля магнитного поля. Получено, что в области диполяризации магнитного поля в хвосте магнитосферы наблюдаются: уменьшение горизонтальной составляющей магнитного поля в долях хвоста и увеличение вертикальной составляющей; изменение эксцесса; наличие мощных Pc5- и Pc4-пульсаций, а также прямых и обратных каскадов; излом в спектрах на частотах, меньших чем гирочастота протонов; изменение характера турбулентных движений на разных временных масштабах (на больших временных масштабах турбулентные течения соответствуют однородным моделям Колмогорова и Ирошникова — Крайчнана, а на меньших временных масштабах турбулентная среда описывается моделью электрон-магнитогидродинамической турбулентности). Используя измерения на разных космических аппаратах, удалось оценить скорость течения плазмы в хвостовом направлении.

Ключевые слова: турбулентные процессы, хвост магнитосферы Земли, Pc-пульсации, спектры турбулентности.

ВВЕДЕНИЕ

Хвост магнитосферы Земли — самосогласованная крупномасштабная токовая структура, параметры которой определяются как плазмой солнечного ветра, так и внутренними процессами. Он состоит из северной и южной долей, в которых магнитные поля имеют противоположные направления. За счет того что нормальная составляющая магнитного поля поддерживается земным магнитным диполем, а B_x -составляющая создается током хвоста, в нейтральном слое B_x -составляющая обращается в нуль, в то время как B_z -составляющая непрерывна и положительна. С удалением от Земли влияние геомагнитного диполя ослабевает, и B_z стремится к нулю, а плотность плазмы увеличивается (плазменный слой) [6, 22]. Плазменный слой по сути является тангенциальным разрывом, в котором может происходить трансформация электромагнитной энергии в кинетическую энергию потоков плазмы, за счет которой возможно перераспределение системы токов и полей как в магнитосфере, так и в ионосфере Земли.

Динамика частиц в хвосте магнитосферы определяется соотношением между ларморовским радиусом частицы (r_L) и масштабом неоднородности магнитного поля (R_c — минимальный радиус кривизны магнитной силовой линии). При этом в области, где гирорадиус вращения частиц сопоставим с радиусом кривизны магнитных силовых линий (или даже больше него), динамика частиц является неадиабатической — заряженные частицы в центре токового слоя размагничиваются и движутся по петляющим орбитам, попеременно пересекая то северную, то южную доли хвоста. Другая динамика частиц возможна при сильно вытянутой конфигурации магнитосферного хвоста во время суббури, а также в отдаленных областях хвоста, где нормальная составляющая магнитного поля намного меньше тангенциальной. Интересно, что в токовом слое с $L \sim r_L \sim R_c$ движение электронов и ионов могут быть разными — электроны замагничены, а ионы нет [30, 39].

Развитие суббури характеризуется тремя фазами: предварительная (фаза подготовки), взрывная и восстановительная [28]. При этом конфигурация магнитосферы претерпевает существенные изменения: в период предварительной фазы суббури наблюдается постепенное уменьшение вертикальной составляющей магнитного поля и рост горизонтальной составляющей, т. е. происходит увеличение наклона — «вытягивание» силовых линий в хвост магнитосферы за счет накопления магнитного потока в долях хвоста магнитосферы [12, 36]; во время взрывной фазы происходит резкая «диполяризация» магнитного поля — уменьшение горизонтальной составляющей магнитного поля в долях хвоста и увеличение вертикальной составляющей [17].

Диполяризация магнитного поля в ближней к Земле области магнитосферы сопровождается потоками плазмы из хвоста магнитосферы в направлении Земли [16]. Конвективная скорость таких потоков может достигать нескольких сотен км/с [31, 37].

При анализе взрывной фазы суббури в «среднем» хвосте магнитосферы (от $15R_E$ до $30R_E$) зарегистрированы потоки плазмы направленные от Земли в хвост магнитосферы. При этом можно наблюдать смену направления потока плазмы — наличие области магнитного пересоединения (модель магнитного пересоединения) [10, 42]. Следует отметить, что наблюдение отрицательных значений B_z в плазменном слое может быть объяснено и без привлечения пересоединения (спутник, находящийся в области распада тока, оказывается в турбулентной среде и измеряет сильно флуктуирующее магнитное поле (модель распада тока) [32, 33]). В рамках модели распада тока можно объяснить и наблюдаемые потоки плазмы к Земле. Они являются следствием волны разрежения, распространяющейся в хвост магнитосферы, в соответствии с движением в хвост области распада тока [28].

Кроме того, что две феномологические модели (распада тока и магнитного пересоединения) существенно разнесены в пространстве, они отличаются разными физическими механизмами их описания. Для объяснения пересоединения используют главным образом механизм разрывной неустойчивости (характеризуется низкочастотной модой), разбивающей токовый слой на магнитные волокна. Распад тока объясняется неустойчивостью текущего поперек хвоста магнитосферы тока, которая зависит от соотношения дрейфовой и тепловой скоростей ионов и характеризуется широким спектром частот [31, 34, 35]. Важно, что неустойчивость тока поперек хвоста имеет порог существенно ниже порога разрывной неустойчивости, и поэтому ее развитие может служить причиной генерации аномального сопротивления, необходимого для начала магнитного пересоединения.

Развитие неустойчивостей, как в первом, так и во втором сценарии суббури, приводит к возникновению турбулизованной области в хвосте магнитосферы Земли [13]. Фрактальная топология позволяет описать самые общие свойства системы без излишнего внимания к ее деталям. При этом предполагается, что система обладает самоподобием — ее можно рассматривать как физический фрактал с характерным размером, равным эффективному ларморовскому радиусу частиц.

Параметры турбулентности плазмы зависят как от кинетического (Re), так и от магнитного числа Рейнольдса Re_m [1]. При небольших значениях Re , $Re_m < 10^3 \dots 10^4$ и влиянии границ в плазме может наблюдаться «перемежаемость» — активные области сосуществуют с пассивными, в которых поток квазиламинарный. В таком процессе параметры плазмы наблюдаются как случайные изменения с негауссовой функцией распределения, когда турбулентные пульсации большой амплитуды представлены в процессе с вероятностью, намного большей, нежели предполагается гауссовым законом [14].

Один из самых важных параметров, которые можно получить из анализа экспериментальных данных турбулентных потоков, — это фурье-спектр плотности или флуктуаций магнитного поля в различных областях токового слоя магнитосферного хвоста. При этом нужно

рассматривать характеристики на масштабах, превышающих эффективный ларморовский радиус частиц во флуктуирующем магнитном поле. И несмотря на то что измерение фурье-спектров — это по сути довольно грубый способ изучения физических процессов, которые происходят в таких нелинейных системах, он позволяет охарактеризовать особенности турбулентных областей, не вникая во всю цепочку взаимодействий.

В статье проанализировано наличие неоднородностей и получены спектры турбулентности в разных областях хвоста магнитосферы Земли по измерениям четырех космических аппаратов за 21 сентября 2005 г.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ

Случайные пульсации в среде с перемежаемостью имеют функцию распределения, которая отличается от распределения Гаусса. Исследование статистических симметрий турбулентности, самоподобных (автомодельных) и фрактальных свойств среды позволяет получить информацию о характере зависимости структурных функций от времени или пространства (скейлингах), не прибегая к детальному рассмотрению конкретных условий ее возбуждения. Рассмотрение автомодельных свойств турбулентности привело к созданию нескольких моделей развитой турбулентности гидродинамических систем: ϵ -модель, p -модель, лог-пуассоновская модель и другие [3, 8, 9].

Следует отметить, что для описания плазмы в сильном магнитном поле используется подход, когда динамика в плоскости поперек магнитного поля может рассматриваться в рамках двумерной модели. Примером данной модели является двумерная модель МГД-турбулентности Ирошникова — Крейчнана [25, 26], которая очень часто рассматривается для интерпретации свойств турбулентности краевой плазмы.

Несмотря на то что в теории турбулентности аналитические методы довольно развиты, они все еще не достигают такой же степени детальности и точности, как полуэмпирические каскадные модели, которые базируются на статистических методах.

Особенно это касается описания турбулентности с перемежаемостью, поскольку перемежаемость является не только результатом неоднородной турбулентности, но и сама неоднородность также распределена хаотично.

Для определения наличия перемежаемости можно проводить как анализ функции плотности вариаций анализируемых параметров [2, 4, 14, 23, 24] так и анализ значения эксцесса (kurtosis). Данный параметр определяется через моменты второго и четвертого порядка формулой [43]

$$\gamma(\tau) = \frac{S_q(\tau)}{(S_4(\tau))^2} \approx 3,$$

где $S_q(\tau) = \overline{|X(t+\tau) - X(t)|^q}$ — усредненная по времени структурная функция q -го порядка, τ — временной масштаб (сдвиг по времени), $X(t)$ — исследуемый параметр. Для нормального распределения $\gamma(\tau) = 0$.

Распределение с более острой вершиной имеет положительное значение $\gamma(\tau)$, а более плоское, чем нормальное распределение, характеризуется отрицательным значением $\gamma(\tau)$.

Обычно различают два типа возможных отклонений от нормального распределения [43]:

— одна из ниспадающих ветвей удлинена, распределение асимметрично;

— максимум расположен выше или ниже, чем у нормального распределения.

Величина эксцесса является одним из способов отображения характера перемежаемости, который, однако, не позволяет сделать количественного сравнения степени и механизма перемежаемости процесса. Если значение эксцесса на разных временных масштабах остается постоянным, то это указывает на отсутствие перемежаемости.

Основным предположением при статистическом рассмотрении является стационарность сигнала, характерные времена которого не изменяются в пределах рассматриваемого интервала. Однако для очень динамичной ситуации нестационарность сигнала не может быть исключена, поэтому был проведен спектральный и вейвлет-анализ.

Определить тип турбулентных процессов можно из анализа спектрального индекса, который характеризует изменение спектральной мощности в инерционном интервале. Инерционный интервал ограничен снизу крупномасштабными источниками энергии и сверху частотами, которые отвечают маломасштабным диссипативным (кинетическим) процессам.

При анализе спектральной плотности мощности (PSD) сигнала для серии N измерений X_n было использовано дискретное фурье-преобразование в виде [38]

$$PSD = \frac{2N}{f_s} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp \left(\frac{2\pi i n j}{N} \right),$$

где $n = 0, 1, \dots, N-1, j = 0, 1, \dots, N/2$.

Анализ степенной зависимости PSD от частоты «открывает путь» для выбора подходящей модели описания наблюдаемой турбулентности. В частности, для однородной изотропной 3D-модели Колмогорова $E_k \propto k^{-5/3}$ [5], для замагниченной двумерной среды (модель Ирошника — Крайчнана [25, 26]) $E_{ИК}(k) \propto k^{-3/2}$, а для электромагнитогидродинамической турбулентности (ЕМНД) $E_E \propto k^{-7/3} \dots k^{-11/3}$ [11, 40]. При этом в модели Крайчнана, по сравнению с колмого-

ровским спектром, значительно уменьшается уровень передачи энергии на малых масштабах и увеличивается время передачи энергии, а ЕМНД-теория описывает поведение плазмы с высоким параметром на временных масштабах, меньших чем ионно-циклотронный период, и на пространственных масштабах, меньших чем ионная инерционная длина, где большая часть динамики плазмы регулируется электронами.

В рамках вейвлет-анализа для серии измерений X_n ($n = 0, \dots, N-1$) со сдвигом Δt было использовано вейвлет-преобразование Морле с огибающей гауссианой [27, 41]:

$$\psi_0(\omega) = \omega^{-1/4} \exp(i \phi_0) \exp(-\omega^2/2),$$

где ω_0 — безразмерная частота, ϕ_0 — безразмерный «временной» параметр.

Непрерывное вейвлет-преобразование дискретного сигнала X_n определяется как свертка материнского вейвлета, аргумент которого масштабируют и транслируют с сигналом [15, 19, 21, 27]:

$$W_n(s) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n * \frac{(n - n_0) \Delta t}{s}$$

где звездочкой обозначено комплексное сопряжение, $|W_n(s)|^2$ — спектр вейвлет-мощности сигнала, s — вейвлет-шкала. Индекс «0» функции n_0 указывает, что эта функция нормирована.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе проанализированы данные магнитного поля, полученные космическими аппаратами (КА) миссии «Кластер-2» в близком геомагнитном хвосте 21 сентября 2005 г. во время диполяризации магнитного поля [18]. Данные представлены с частотой дискретизации 22.5 Гц. Проанализированы особенности флуктуаций магнитного поля для двух интервалов: интервал 1 — 13:30...13:55 UT — до момента диполяризации (относительный уровень флуктуаций порядка 0.1...0.2), интервал 2 — 14:13...14:24 UT — диполяризационный интервал с высокоамплитудными флуктуациями (относительный уровень флуктуаций порядка 0.5...1) (рис. 1). КА миссии находились на геоцентрическом расстоянии $(15...16)R_E$ в антисолнечном направлении и в дополуночном секторе (табл. 1). Интервал 1 выбирался таким образом, чтобы он непосредственно предшествовал началу прохождения диполяризационного фронта, а угол инклинации (угол между $|\mathbf{B}|$ и плоскостью $X_{GSE} Y_{GSE}$) не превышал 30° для КА C11 и C12 и 20° для КА C13 и C14. В этом промежутке значение $|\mathbf{B}|$ немонотонно уменьшается на 10...15 нТл с наличием 5-мин пульсаций, что особенно хорошо видно для аппарата C13. Во время начала магнитной диполяризации изменения угла инклинации, регистрируемые аппаратами C13, C14, ко-

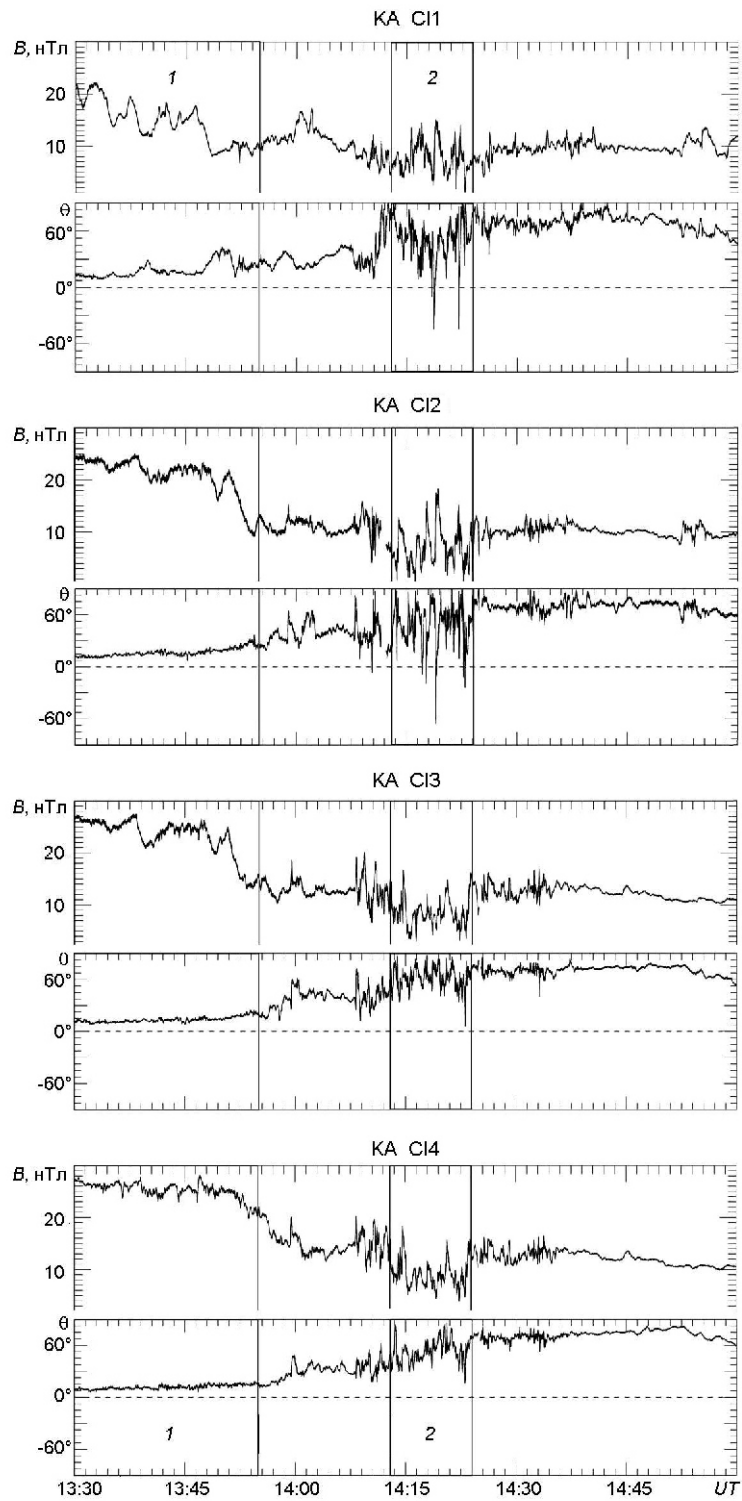


Рис. 1. Проанализированные изменения модуля магнитного поля и угла инклинации для космических аппаратов C11, C12, C13, C14 миссии «Кластер-2»

Таблица 1. Координаты космических аппаратов в системе GSE

КА	13:30:00			14:00:00			14:30:00		
	X_{GSE}/R_E	Y_{GSE}/R_E	Z_{GSE}/R_E	X_{GSE}/R_E	Y_{GSE}/R_E	Z_{GSE}/R_E	X_{GSE}/R_E	Y_{GSE}/R_E	Z_{GSE}/R_E
C11	-15.6405	0.8120	2.1233	-15.9124	1.0095	1.8175	-16.1650	1.2058	1.5095
C12	-15.9209	2.3137	2.6835	-16.1678	2.5045	2.3837	-16.3967	2.6926	2.0812
C13	-14.1696	1.4345	2.6340	-14.5018	1.6516	2.3110	-14.8114	1.8664	1.9844
C14	-14.0196	1.3428	2.7712	-14.3617	1.5610	2.4500	-14.6809	1.7768	2.1249

торые находились ближе к Земле, были близки к 30°, что в 1.5...2 раза меньше, чем для более удаленных КА C11, C12. При этом для последних угол принимает и отрицательные значения. Как упоминалось во введении, магнитная диполяризация характеризуется преобладанием значения составляющей B_z над B_x и B_y . Это справедливо для нашего события, но с некоторыми оговорками. Для рассматриваемого интервала два условия $|B_z| > |B_x|$ и $|B_z| > |B_y|$ выполняются только для измерений КА C13, C14. Для них значения абсолютных флуктуаций составляющих поля составляют $B_x = 5...10$ нТл, $B_y = 5...10$ нТл, $B_z = 5...10$ нТл. В свою очередь, флуктуации для C11 составляют $B_x = 5...20$ нТл, $B_y = 5$ нТл, $B_z = 10...15$ нТл; для C12 — $B_x = 5...15$ нТл, $B_y = 10$ нТл, $B_z = 10$ нТл; и условие $|B_z| > |B_x|$ и $|B_z| > |B_y|$ для них выполняется только после 14:22...14:24 UT (под конец фазы диполяризации).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ эксцесса. Для определения наличия перемежаемости в интервалах 1 и 2 анализировались статистические свойства абсолютных значений вариаций магнитного поля $dB = B(t + \tau) - B(t)$, где сдвиг по времени τ кратный дискретности измерений 0.0445 с. При определении значения эксцесса флуктуаций магнитного поля строились зависимости функции $K(\tau) = \langle (dB)^2 \rangle / [S_4(\tau)]^2$ от масштабного параметра τ . Значение эксцессов для разных КА миссии представлены на рис. 2. Из графиков отчетливо видно, что для интервала 1 для всех четырех КА значение $K(\tau)$ колеблется около 4 (в интервале от 5 до 3), что близко к нормальному распределению. Для области диполяризации (интервал 2) функция $K(\tau)$ на малых масштабах варьирует от 26 (КА C14) до 11 (КА C12).

Для КА C11 и C12, которые находятся на расстояниях более $15.5R_E$, при $\tau = 1$ с эксцесс резко уменьшается и выходит на значение порядка 5. Для КА C13 и C14, которые находятся на $1.5R_E$ ближе, ситуация существенно отличается. Значения эксцесса уменьшаются медленнее в диапазоне от 1 до 5 с.

«Завал» значений для интервала 2 при очень малых t можно объяснить инструментальной погрешностью наблюдений.

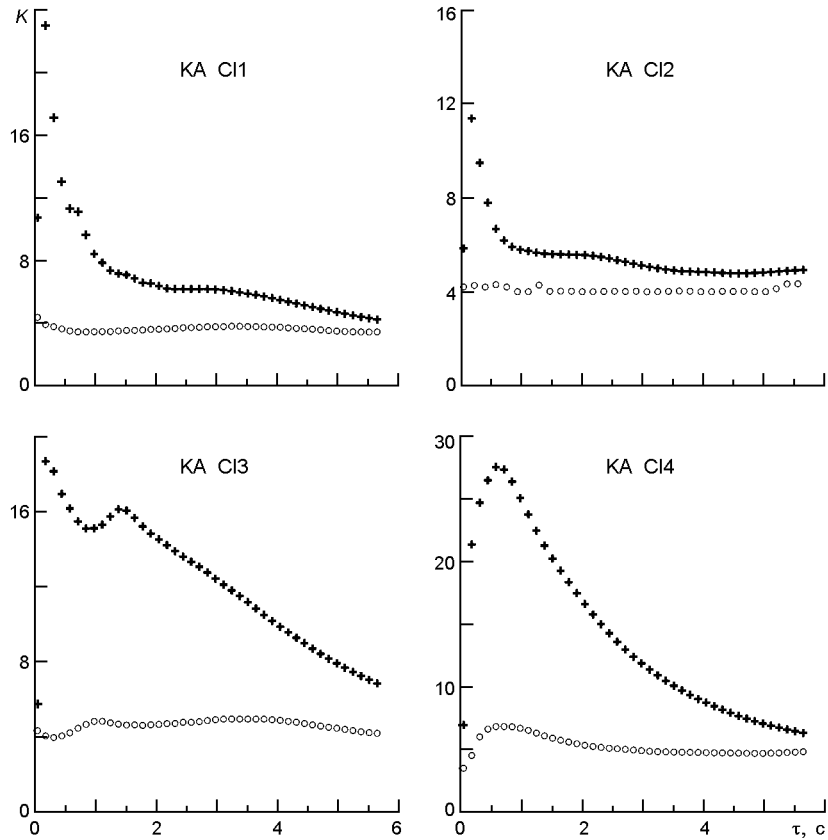


Рис. 2. Зависимость эксцессов K от сдвига по времени для разных КА (C11, C12, C13, C14). Кружки — область до диполяризации магнитного поля (интервал 1), крестики — момент диполяризации (интервал 2)

Таким образом, для области диполяризации на малых временных масштабах мы имеем распределение с более острой вершиной и широкими крыльями (значение эксцесса больше 3), чем у нормального распределения.

Спектральный анализ. В рамках спектрального анализа были построены зависимости спектральной плотности мощности PSD (power spectral density) от частоты f и определена степенная зависимость $PSD(f) \sim f^{-\alpha}$. Для нахождения точек излома и наклона спектра мы использовали кусочно-линейную аппроксимацию $\lg PSD$ от $\lg f$ в диапазоне частот 0.005...1.0 Гц для интервала 1 и 0.01...1.0 Гц для интервала 2. Ограничение частот сверху объясняется наличием инструментального шума, а снизу — объемом выборки данных и краевым эффектом процедуры сглаживания. Значения PSD для абсолютного значения магнитного поля представлены на рис. 3. Практически для всех спектров частота излома меньше или близка к среднему значению гирочастоты протонов (табл. 2). Частота излома определяет характерную частоту изменения типа (скорости передачи энергии) турбулентного каскада в инерционном диапазоне. То, что излом наблюдается на частоте

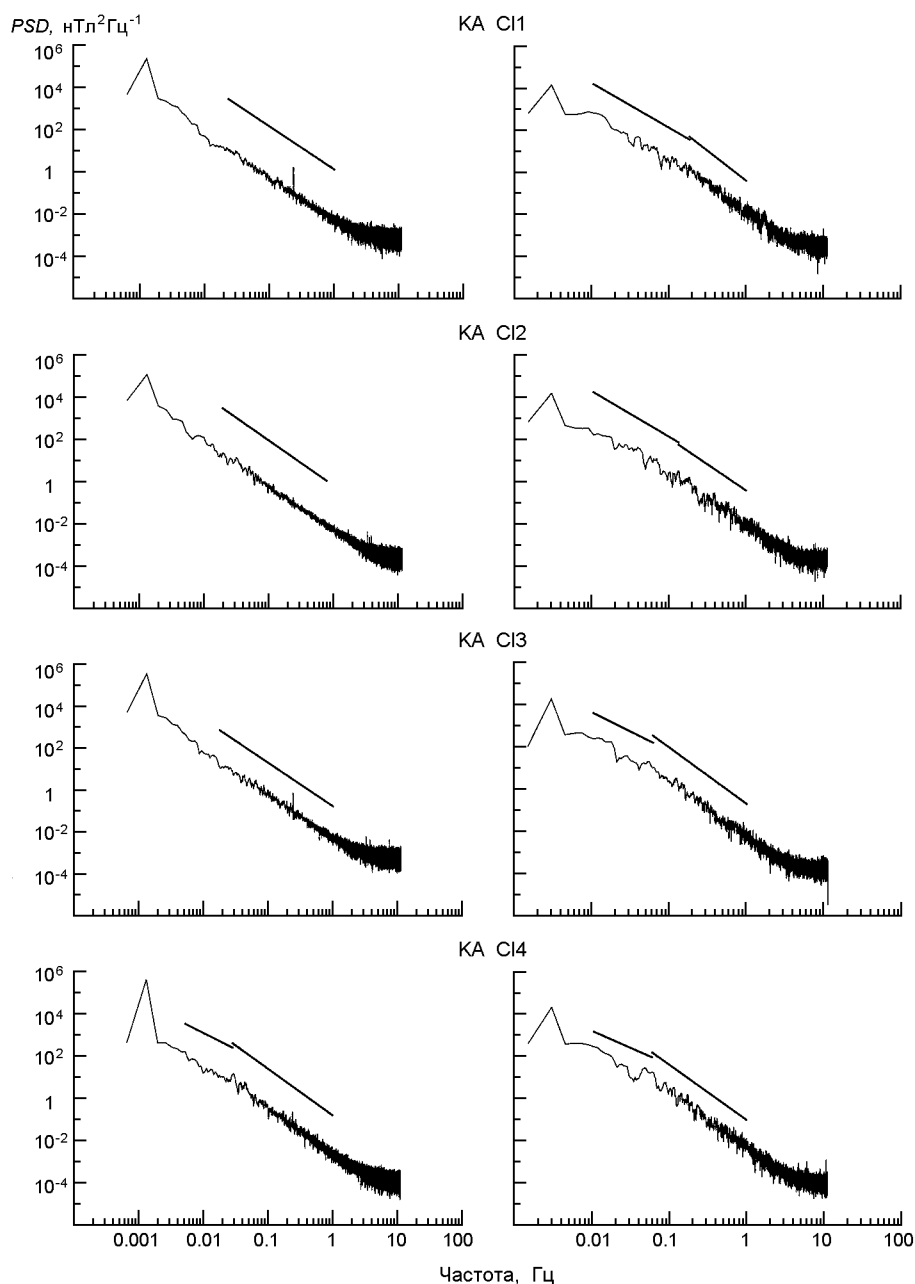


Рис. 3. Спектральная плотность мощности для абсолютных значений магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли по данным четырех космических аппаратов миссии «Кластер-2» (слева — для интервалов времени до диполяризации, справа — во время диполяризации). Параметры аппроксимирующих прямых см. в табл. 2

тах, меньших чем гирочастота протонов, указывает на существенное влияние тяжелых ионов на рассматриваемых расстояниях. Также наличие излома в интервале I для КА C14 и степенная зависимость, близкая к $-3/2$, указывает на наличие квазидипольной структуры в области измерения КА и на сильно замагниченную двумерную среду (модель ИК). В области измерений КА C11, C12, C13 не наблюдается резкого из-

Таблица 2. Параметры аппроксимирующих прямых спектральной плотности мощности PSD (f_{cp} — среднее значение гирочастоты протона, f^* — точка излома, $s1$ — показатель степени до точки излома, $s2$ — показатель степени после точки излома)

КА	f_{cp} , Гц	f^* , Гц	$s1$	$s2$
До диполяризации (интервал 1, 13:30...13:55 UT), диапазон аппроксимации 0.005...1.0 Гц				
C11	0.32	Излома нет	-2.045±0.025	
C12	0.22	Излома нет	-2.135±0.018	
C13	0.36	Излома нет	-2.070±0.009	
C14	0.39	0.029 ^{0.005} _{0.004}	-1.536±0.111	-2.204±0.012
Во время диполяризации (интервал 2, 14:13...14:24 UT), диапазон аппроксимации 0.01...1.0 Гц				
C11	0.11	0.185 ^{0.045} _{0.036}	-2.124±0.058	-2.853±0.040
C12	0.12	0.133 ^{0.052} _{0.037}	-2.166±0.089	-2.491±0.042
C13	0.13	0.062 ^{0.012} _{0.010}	-1.828±0.153	-2.683±0.029
C14	0.14	0.061 ^{0.009} _{0.008}	-1.616±0.221	-2.624±0.029

менения степенной зависимости PSD (показатель степени варьирует в диапазоне от -2.135 до -2.045). Для интервала 2 (область диполяризации) ситуация существенно отличается. Наблюдается увеличение «крутизны» (величины $s2$) для частот, больших частоты излома, что означает более эффективную передачу энергии от больших к меньшим масштабам. Значения спектрального индекса изменяются на разных временных масштабах (значение $s1$ и $s2$): на больших временных масштабах спектральный индекс составляет 1.616...2.124, а на меньших — 2.491...2.853. Наименьший перепад в спектрах на масштабах $s1$ и $s2$ наблюдается для КА C12, который находится на наибольшем расстоянии от Земли. Наибольшее отличие на разных временных масштабах наблюдается для КА C13 и C14, которые находятся на расстояниях меньше $15R_E$: для КА C13 ($14.6R_E$) изменение близко к 0.9, а для КА C14 ($14.4R_E$) изменение равно 1. При этом до частоты излома для КА C13 и C14 спектральные индексы равны -1.616 и -1.828, что близко соответственно к модели Ирошникова — Крайчнана и к модели Колмогорова.

Вейвлет-анализ. Результаты проведенного непрерывного вейвлет-преобразования модуля магнитного поля в интервале 14:05...14:30 UT представлены на рис. 4 и 5. Временной диапазон был выбран с целью включения интервала начала диполяризации — интервала 2 с некоторым запасом для исключения влияния краевых эффектов вейвлет-преобразования. Верхняя граница преобразования ограничена частотой Найквиста и охватывает 14 октав, каждая из которых включает 16 субоктав. На графиках отчетливо видно, что интенсивные пульсации для измерений КА C13, C14 появляются раньше, чем для КА C11, C12. В частности, низкочастотные возмущения порядка 0.01 Гц

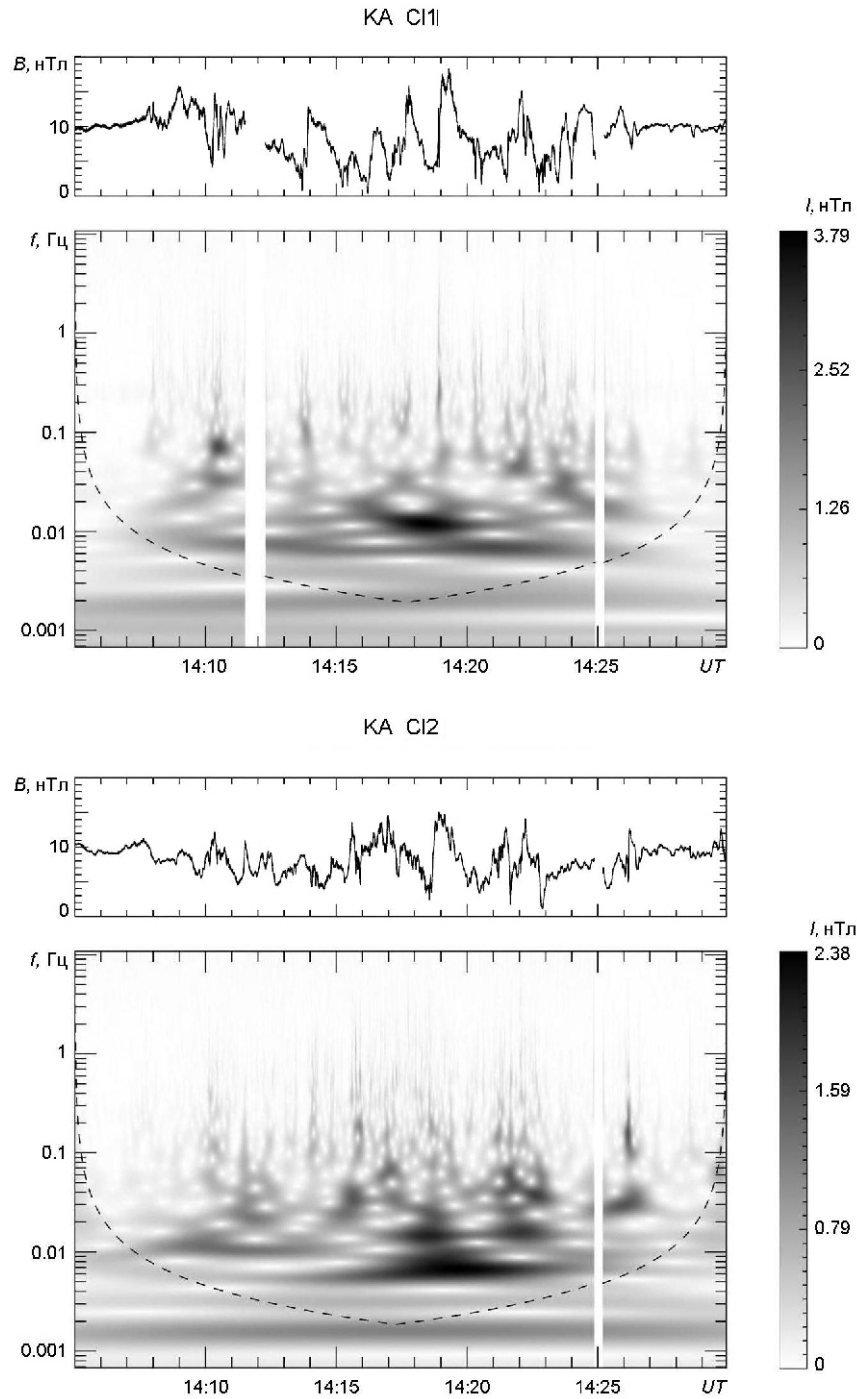


Рис. 4. Вейвлет-преобразование модуля магнитного поля по данным КА C11 и C12 в момент диполяризации

для КА C14 появляются в 14:13:30 UT, а для КА C11 — в 14:18:30. Временная задержка составляет 5 мин. Учитывая локализацию КА в разные моменты времени, удалось оценить скорость данного возмущения (Pc4-пульсация) — около 33 км/с.

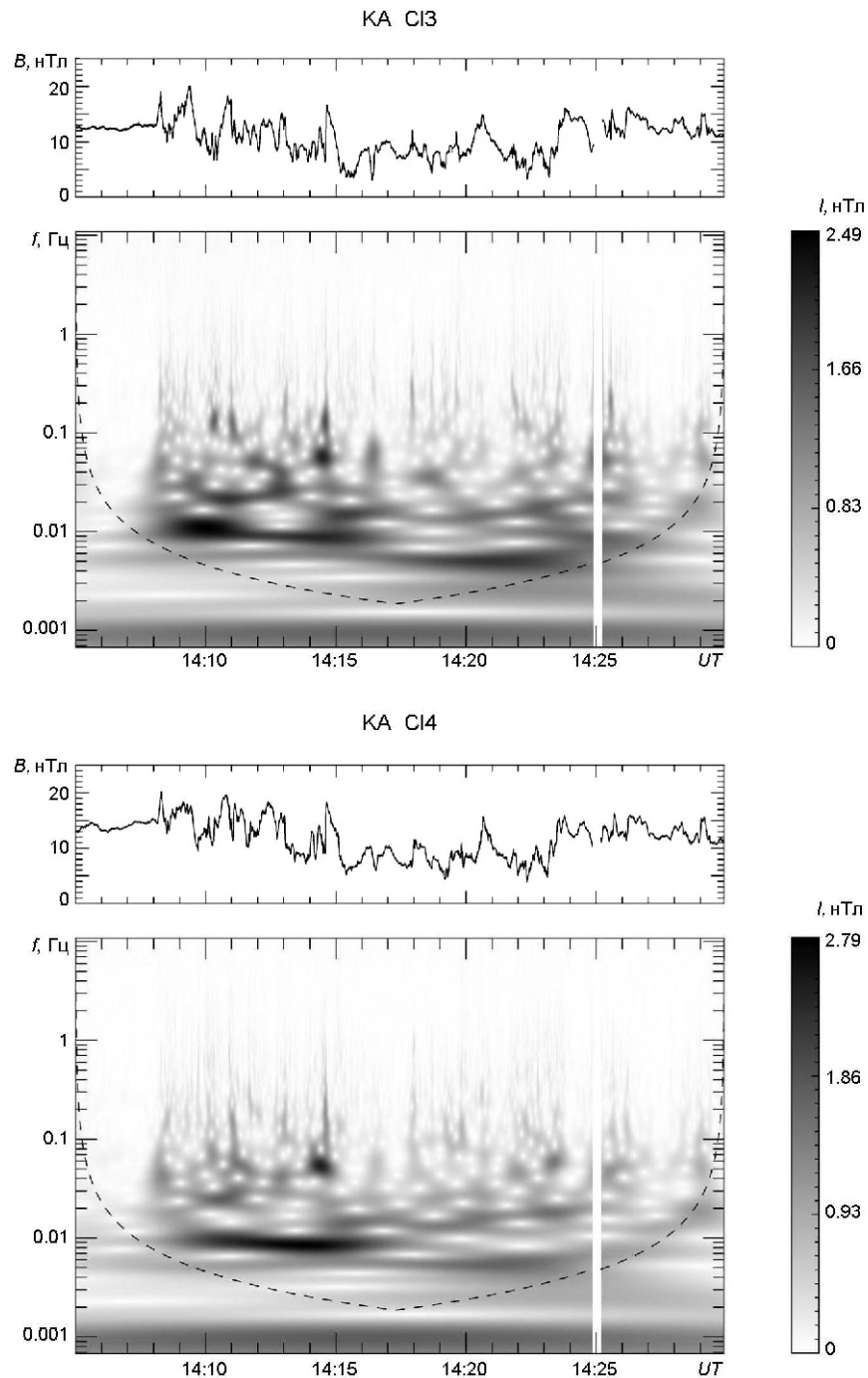


Рис. 5. То же для КА C13 и C14

Таким образом, мы можем констатировать наличие движения плазмы в хвостовом направлении со скоростью порядка 30 км/с. Кроме частот 0.01 Гц в измерениях есть и другие низкочастотные возмущения, а также прямые и обратные каскады. Для КА C11 можно выделить основные составляющие: 0.006 Гц в интервале 14:08...14:27 UT и

«плавный» обратный каскад 0.02...0.01 Гц в 14:16...14:21 UT интенсивностью примерно в 4 нТл; для C12: 0.006 Гц в 14:15...14:24 UT, 0.015 Гц в 14:17...14:19 UT и 14:21...14:23 UT, прямые каскады — продолжительностью около 2 мин с 14:25 UT и 1 мин. с 14:15 UT с 0.025 по 0.04 Гц, смешанный каскад — взаимодействие обратного с прямым длительностью две минуты с 14:21 UT на 0.04...0.07 Гц. Для измерений аппарата C13: низкочастотные составляющие — 0.004 Гц в 14:17...14:25 UT, 0.005 Гц в 14:09...14:25 UT, 0.01...0.015 Гц с 14:08 UT до 14:17 UT, группа прямых и обратных каскадов с 14:09...14:14 на частотном интервале 0.02...0.05 Гц; для C14: низкочастотные составляющие — 0.005...0.006 Гц на промежутке 14:09...14:24 UT, 0.008...0.01 Гц с 14:09 UT до 14:17 UT, прямой и обратные каскады на промежутке 14:10...14:15 UT на частотах 0.025...0.07 Гц.

Таким образом, во время диполяризации магнитометры всех КА зафиксировали мощные сигналы с периодами 66, 83, 100, 166, 200 с, которые соответствуют пульсациям Pc4 (45...150 с) и Pc5 (150...600 с [7]), а также прямые и обратные каскадные процессы. Наличие обратных каскадных процессов указывает, что вместе с распадом вихревых структур имеет место и самоорганизация — вихри меньших размеров группируются в вихри больших размеров.

Также следует отметить, что Pc-пульсации фиксируются на всех КА — в пространственном диапазоне $(14...16.8)R_E$. Наибольшее количество каскадных процессов зафиксировано на расстоянии $(15...16)R_E$, а наибольшее количество обратных каскадов — в диапазоне $(14.5...15)R_E$ (ближе к Земле и области инициирования суббури).

ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа флуктуаций магнитного поля в хвосте магнитосферы в области диполяризации получено:

— уменьшение горизонтальной составляющей магнитного поля в долях хвоста и увеличение вертикальной составляющей;

— изменения эксцесса (для области диполяризации на малых временных масштабах функция распределения характеризуется более острой вершиной и широкими крыльями (значение эксцесса больше 3), для додиполяризационной области значение эксцесса близко к гауссовому распределению на всех рассмотренных масштабах);

— излом в спектрах PSD наблюдается для области диполяризации на частотах, меньших чем гирочастота протонов, что указывает на существенную роль тяжелых ионов на расстояниях около $15R_E$;

— во время диполяризации изменяется тип турбулентных движений: на больших временных масштабах турбулентные течение близко к однородным моделям Колмогорова и Ирошникова — Крайчнана (спектральный индекс 1.616...1.828 (КА C13 и КА C14)), а на меньших временных масштабах турбулентное течение описывается моделью

электрон-магнитогидродинамической турбулентности (спектральный индекс 2.491...2.853);

— наименьший скачок в спектрах на разных масштабах наблюдается для КА, который находится на наибольшем расстоянии от Земли (КА C12) (изменение 0.3), а наибольшее изменение (~ 1) — для КА, который находится ближе всего к планете;

— мощные сигналы с периодами 1, 1.4, 1.6, 2.8 и 3.3 мин, которые соответствуют Pc4- и Pc5-пульсациям, а также прямые и обратные каскады. Наибольшее количество обратных каскадов наблюдается ближе к Земле, а их наличие указывает на процессы самоорганизации;

— по наблюдаемым Pc-пульсациям скорость движения плазмы в направлении от Земли (хвостовом направлении) составляет 30 км/с.

Работа выполнялась в соответствии с Целевой комплексной программой НАН Украины по физике плазмы. При поддержке образовательной программы Министерства образования и науки Украины № 2201250 «Образование, обучение студентов, аспирантов, научных и педагогических кадров за рубежом» (стажировка в лаборатории прикладной физики университета имени Джона Хопкинса, Мэриленд, США), гранта 90312 фонда Фольксваген («VW- Stiftung») и Международного института космических исследований ISSI-BJ, Пекин, Китай.

1. Баренблатт Г. И. Турбулентные пограничные слои при очень больших числах Рейнольдса. *Успехи мат. наук.* 2004. 59, № 1. С. 45—62.
2. Козак Л. В., Савин С. П., Будаев В. П., Лежен Л. А., Пилипенко В. А. Характер турбулентности в пограничных областях магнитосферы Земли. *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2012. 52, № 4. С. 470—481.
3. Козак Л. В. Методи і підходи визначення характеристик турбулентного середовища. *Космічна наука і технологія.* 2016. 22, № 2(99). С. 60—77.
4. Козак Л. В., Пилипенко В. А., Чугунова О. М., Козак П. Н. Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя Земли. *Космич. исслед.* 2011. 49, № 3. С. 202—212.
5. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. *Докл. АН СССР.* 1941. 30, № 4. С. 299—303.
6. Космическая геогеофизика / под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. М. : Физматлит, 2008. Том 1. 624 с.
7. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М. : Мир, 1980. 300 с.
8. Фрик П. Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. Ч. II. 136 с.
9. Фриш У. Турбулентность: Наследие А. Н. Колмогорова. М. : Фазис, 1998. 343 с.
10. Bieber J. W., Stone E. C., Hones E. W., et al. Plasma behavior during energetic electron streaming events: Further evidence for substorm-associated magnetic reconnection. *Geophys. Res. Lett.* 1982. 9. P. 664—667.
11. Biskamp D., Schwarz E., Drake J. F. Two-dimensional electron magnetohydrodynamic turbulence. *Phys. Rev. Lett.* 1996. 76. P. 1264—1272.
12. Saan M. N., McPherron R. L., Russell C. T. The statistical magnetic signatures of magnetospheric substorms. *Planet. and Space Sci.* 1978. 26. P. 269—279.

13. Chang T. Self-organized criticality, multi-fractal spectra, sporadic localized recon-
nections and intermittent turbulence in the magnetotail. *Phys. Plasmas*. 1999. 6,
P. 4137—4149.
14. Consolini G., Kretzschmar M., Lui A. T. Y., Zimbardo G., Macek W. M. On the mag-
netic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical ap-
proach. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2005. 110, N A7. P. 1—12.
15. Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annu. Rev. Fluid
Mech.* 1992. 24, № 1. P. 395—458.
16. Fairfield D. H., Mukai T., Brittnacher M., et al. Earthward flow bursts in the inner mag-
netosphere and their relation to auroral brightenings, AKR intensifications,
geosynchronous particle injections and magnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1999.
104. P. 355—370.
17. Frank L. A., Paterson W. R., Sigwarth J. B., Kokubun S. Observations of magnetic
field dipolarization during auroral substorm onset. *J. Geophys. Res.* 2000. 105.
P. 15897—15912.
18. Grigorenko E. E., Kronberg E. A., Daly P. W., Ganushkina N. Y., Lavraud B., Sauvaud
J.-A., Zelenyi L. M. Origin of low proton-to-electron temperature ratio in the Earth's
plasma sheet. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. 121. doi:10.1002/2016JA022874.
19. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and
wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Process. Geophys.* 2004.
11, N 5/6. P. 561—566.
20. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment // Eds Kamide Y., Chian A. Berlin,
Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2007. 539 p.
21. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. Influence of the Arctic Oscillation and El
Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet
approach. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2003. 108, N D21. P. 4677—4708.
22. Jonathan Rae I., Mann I. R., Angelopoulos V., Murphy K. R., Milling D. K., Kale A.,
Frey H. U., Rostoker G., Russell C. T., Watt C. E. J., Engebretson M. J., Mold-
win M. B., Mende S. B., Singer H. J., Donovan E. F. Near-Earth initiation of a terres-
trial substorm. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2009. 114, N 7. P. 2156—2202.
23. Kozak L. V., Prokhorenkov A. S., Savin S. P. Statistical analysis of the magnetic fluctu-
ations in boundary layers of Earth's magnetosphere. *Adv. Space Res.* 2015. 56, N 10.
P. 2091—2096.
24. Kozak L. V., Lui A. T. Y., Kronberg E. A., Prokhorenkov A. S. Turbulent processes in
Earth's magnetosheath by Cluster mission measurements. *J. Atmos. Solar-
Terrestrial Phys.* 2017. 154. P. 115—126.
25. Kraichnan R. H. Convergents to turbulence functions. *J. Fluid Mech.* 1970. 41, N 1.
P. 189—217.
26. Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at very high Reynolds numbers.
J. Fluid Mech. 1959. 5. P. 497—543.
27. Kronberg E. A., Grigorenko E. E., Turner D. L., Daly P. W., Khotyaintsev Y., Kozak L.
Comparing and contrasting dispersionless injections at geosynchronous orbit during
a substorm event. *J. Geophys. Res.* 2017. 122, 10. 1002/2016JA023551
28. Lopez R. E. Magnetospheric substorms. *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* 1990. 11.
P. 264—271.
29. Lui A. T. Y. Extended consideration of a synthesis model for magnetospheric sub-
storm. Magnetospheric substorms. Geophysical monograph. 64 / Eds. J. Kan et al.
Washington: AGU. 1991. P. 43—60.
30. Lui A. T. Y. Inferring global characteristics of current sheet from local measurements.
J. Geophys. Res. 1993. 98. P. 13423—13427.

31. Lui A. T. Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. *J. Geophys. Res.* 1996. 101. P. 13067—13088.
32. Lui A. T. Y., Lopez R. E., Anderson B. J., et al. Current disruptions in the near-Earth neutral sheet region. *J. Geophys. Res.* 1992. 97. P. 1461—1480.
33. Lui A. T. Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2002. 64, N 2. P. 125—143.
34. Lui A. T. Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets. *Space Sci. Rev.* 2004. 113, N 1-2. P. 127—206.
35. Lui A. T. Y., Zheng Y., Zhang Y., Livi S., Rème H., Dunlop M. W., Gustafsson G., Mende S. B., Mouikis C., Kistler L. M. Cluster observation of plasma flow reversal in the magnetotail during a substorm. *Ann. Geophys.* 2006. 24, N 7. P. 2005—2013.
36. McPherron R. L. Substorm related changes in the geomagnetic tail: the growth phase. *Planet. and Space Sci.* 1972. 20, N 9. P. 1521—1539.
37. Ohtani S., Shay M. A., Mukai T. Temporal structure of the fast convective flow in the plasma sheet: Comparison between observations and two-fluid simulations. *J. Geophys. Res.* 2004. 109. P. A03210. DOI:10. 1029/2003JA010002.
38. Paschmann G., Daly P. W. Spectral analysis, reprinted from analysis methods for multi-spacecraft data. *ISSI Scientific Report SR-001* (Electronic edition 1. 1). 2000. 491 p.
39. Sergeev V. A., Mitchell D. G., Russell C. T., Williams D. J. Structure of the tail plasma/current sheet at $11R_e$ and its changes in the course of a substorm. *J. Geophys. Res.* 1993. 98. P. 17345—17365.
40. THOR Exploring plasma energization in space turbulence. *Assessment Study Report ESA/SRE*. 2017. 109 p.
41. Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. 79, N 1. P. 61—78.
42. Yahnin A. G., Despirak I. V., Lubchich A. A., et al. Indirect mapping of the source of the oppositely directed fast plasma flows in the plasma sheet onto the auroral display. *Ann. Geophys.* 2006. 24. P. 679—687.
43. Zaks S. Theory of statistical inference (Probability & Mathematical Statistics). Published by John Wiley & Sons Inc., 1971. 582 p.

Статья поступила в редакцию 21.03.18

Л. Козак^{1,2}, Б. Петренко¹, Е. Кронберз³, Е. Григоренко⁴, Е. Луї⁵, С. Черемних²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Київ, Україна

³Інститут Макса Планка, Геттінген, Німеччина

⁴Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Російська Федерація

⁵Університет імені Джона Гопкінса, США

СПЕКТРИ ТУРБУЛЕНТНОСТІ В ОБЛАСТІ ДИПОЛЯРИЗАЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Проаналізовано наявність неоднорідностей турбулентних процесів і отримано спектри турбулентності в областях до і під час дипольризації магнітного поля у хвості магнітосфери Землі за вимірюваннями чотирьох космічних апаратів місії «Кластер-2» (подія 21 вересня 2005 року). Спектральний і вейвлет-аналіз були доповнені дослідженнями ексцесу флуктуацій модуля магнітного поля. Отримано, що в об-

ласті диполяризації магнітного поля у хвості магнітосфери спостерігаються: зменшення горизонтальної складової магнітного поля в частинах хвоста і збільшення вертикальної складової; зміна ексцесу; наявність потужних Pc5- і Pc4-пульсацій, а також прямих і зворотних каскадів; злам у спектрах на частотах, менших, ніж гірочастота протонів; зміна характеру турбулентних рухів на різних часових масштабах (на великих часових масштабах турбулентні потоки відповідають однорідним моделям Колмогорова та Ірошнікова — Крайчнана, а на менших часових масштабах турбулентність описується моделлю електрон-магнітогідродинамічної турбулентності). Використовуючи вимірювання на різних космічних апаратах, вдалося оцінити швидкість руху плазми у хвостовому напрямку.

Ключові слова: турбулентні процеси, хвіст магнітосфери Землі, Pc-пульсації, спектри турбулентності в хвості магнітосфери Землі.

L. Kozak^{1,2}, B. Petrenko¹, E. Kronberg³, E. Grigorenko⁴, E. Lui⁵, S. Cheremnykh²

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

²Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Max Planck Institute, Göttingen, Germany

⁴Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia

⁵Johns Hopkins University, USA

SPECTRA OF TURBULENCE DURING THE DIPOLARIZATION OF THE MAGNETIC FIELD

The presence of heterogeneity of turbulent processes has been analyzed, and spectra of the turbulence have been obtained for the regions before and during dipolarization of the magnetic field in the Earth's magnetosphere tail from the measurements of four space vehicles of Cluster-2 mission (the event on 21 September 2005). The spectral and wavelet analysis were supplemented by investigations of fluctuation kurtosis for magnetic field absolute value. In the region of dipolarization of magnetic field in the magnetosphere tail we have detected: decreasing horizontal component of magnetic field in parts of the tail and increasing the vertical component; kurtosis change; the presence of powerful Pc5 and Pc4 pulsations, and also direct and inverse cascades; the break in the spectra on frequencies lower than proton gyrofrequency; changing a character of turbulent motions on different time scales (at large time scales, the turbulent flow corresponds to the homogeneous models of Kolmogorov and Iroshnikov-Kraichnan, and at smaller time scales the turbulent flow is described by the electron-magnetohydrodynamic turbulence model). Using the measurements from different space vehicles we were able to estimate the velocity of plasma flow in the tail direction.

Keywords: turbulent processes, tail of the Earth's magnetosphere, substorm development models, Pc pulsations, turbulence spectra.