

НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКАМИ MMS МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ И ТОКОВЫХ СТРУКТУР ВО ВРЕМЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ ДИПОЛИЗАЦИЙ В БЛИЖНЕМ ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ

© 2021 г. А. Ю. Мальхин^{а,*}, Е. Е. Григоренко^{а,**}

^а Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: anmaurdreg@gmail.com

**e-mail: elenagrigorenko2003@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.10.2020 г.

После доработки 22.12.2020 г.

Принята к публикации 23.12.2020 г.

Представлены наблюдения и выполнен анализ двух последовательных продолжительных диполизаций в геомагнитном хвосте (на расстоянии $X \sim -18.3R_E$ от Земли, R_E – радиус Земли) по данным миссии MMS. Во время данных диполизаций было выделено 8 диполизационных фронтов (ДФ), для которых были определены скорости распространения и их пространственный масштаб. Скорости движения ДФ находились в диапазоне 130–360 км/с. Пространственный масштаб квазиизолированных ДФ вдоль направления их движения, наблюдаемых в начале первой диполизации, составлял $\sim 1\rho_i$ (где ρ_i – ионный гиррорadius), в то время как пространственный масштаб ДФ, наблюдаемых в зоне накопления магнитного потока, составлял $\sim 5\rho_i$. Используя методы многоступенчатых наблюдений, определены плотности электрических токов, связанных с ДФ, на субионных масштабах. Показано, что одновременно с ДФ наблюдались тонкие ($\leq 0.4\rho_i$), интенсивные электронные токовые структуры, с амплитудой плотности тока от 10 до 60 нА/м², образующие сложную многомасштабную трехмерную конфигурацию.

DOI: 10.31857/S0367292121050061

1. ВВЕДЕНИЕ

Космическое пространство в солнечной системе заполнено плазмой солнечного ветра, который переносит замороженное в него межпланетное магнитное поле (ММП). В свою очередь, Земля имеет собственное магнитное поле, и в результате его взаимодействия с солнечным ветром в нем формируется кометоподобная полость – магнитосфера Земли. Постоянное взаимодействие магнитного поля Земли с солнечным ветром сопровождается поступлением энергии солнечного ветра внутрь магнитосферы. Так, на дневной стороне магнитосферы происходят процессы пересоединения между ММП и магнитным полем Земли. Силовые линии, образованные в результате такого пересоединения, переносятся солнечным ветром на ночную сторону, формируя вытянутую структуру – геомагнитный хвост (см. рис. 1а). В результате этого процесса в хвосте магнитосферы Земли происходит постоянное накопление магнитного потока, и, соответственно, магнитной энергии. При этом,

стабильность такой вытянутой магнитной конфигурации поддерживается поперечным электрическим током, текущим в экваториальной плоскости геомагнитного хвоста. Конечно, энергия не может запасаться в хвосте магнитосферы бесконечно, и может спонтанно высвобождаться в токовом слое, например, в результате магнитного пересоединения, при котором магнитная энергия трансформируется в тепловую и кинетическую энергию плазмы [1].

Высвобождение магнитной энергии в токовом слое хвоста приводит к возмущению тока в слое и изменению токовой структуры, в результате которого формируется система противоположно направленных продольных токов, которые вдоль силовых линий магнитного поля текут к Земле (от Земли) и замыкаются в ионосфере посредством аврорального электроджета. Такая токовая конфигурация, как правило, связана с развитием суббури [2, 3] (рис. 1б, в). В данной работе нас будут интересовать процессы, происходящие в геомагнитном хвосте и являющиеся последствиями маг-

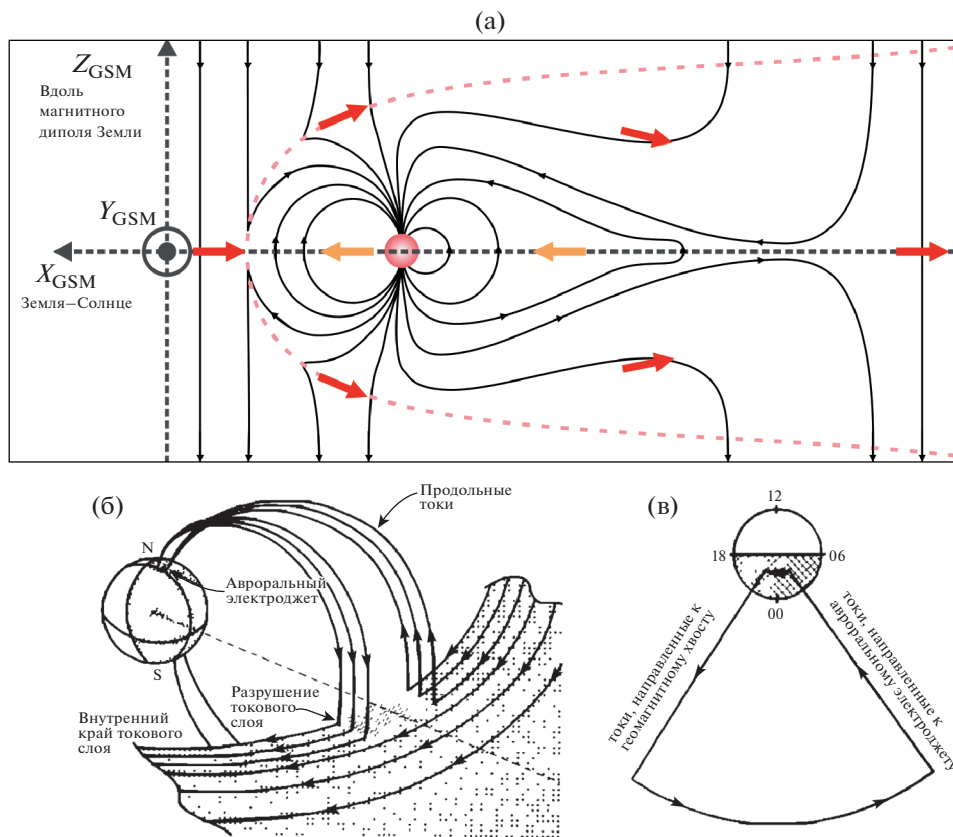


Рис. 1. (Цветной онлайн.) Схематичное изображение магнитосферы Земли и направления осей GSM системы координат (а); схематичное изображение возмущения хвостового тока, отображающее структуру системы электрических токов суббуревого токового клина и формирования аврального электроджета [3]; (б) – в перспективе и (в) – проекция на плоскость XY .

нитного пересоединения. А именно, в результате пересоединения образуются силовые линии, замкнутые на приполярные области Земли, которые движутся к Земле вместе с ускоренным потоком плазмы [1]. В такой магнитной конфигурации усилена дипольная компонента магнитного поля (B_z).

Одним из ключевых процессов в динамике геомагнитного хвоста является магнитная диполизация, проявляющаяся в быстром, локальном увеличении дипольной составляющей магнитного поля (B_z). Спутниковые наблюдения показали, что быстрое усиление поля B_z вызвано распространением пространственных магнитопазменных структур – диполизационных фронтов (ДФ), которые, обычно, наблюдаются одновременно с движущимися к Земле ускоренными потоками [4–6]. Такие потоки вместе с ДФ переносят энергию и массу от удаленного источника, находящегося в хвосте, к околоземному плазменному слою, где высокоскоростные потоки замедляются и отклоняются (см. [7, 8] и ссылки там). Эта, так называемая, область торможения потока распо-

ложена в хвосте магнитосферы на радиальных расстояниях от Земли $\sim(7-20)R_E$ [9].

Явления реконфигурации магнитных силовых линий активно изучаются в течение последних десятилетий. Было показано, что процессы диполизации имеют два различных временных масштаба: 1) распространяющиеся изолированные ДФ, наблюдаемые в течение <3 мин (см., например, [5, 6, 10, 11]); 2) так называемые “вторичные”, продолжительные диполизации, связанные с торможением ускоренных потоков и накоплением магнитного потока в околоземном хвосте (см., например, [12–14]). Вторичные диполизации наблюдаются в течение гораздо более длительных периодов времени (до нескольких часов) и обычно связаны с формированием суббуревого токового клина [3, 15, 16]. В работе [17] было показано, что во время формирования суббуревого токового клина и роста давления плазмы, наблюдалось торможение и отклонение в азимутальном направлении ускоренных потоков в околоземном плазменном слое. Результаты моделирования, а также многоспутниковые наблюдения

показали, что область торможения ускоренных потоков локализована в пространстве, в то время как связанное с этим увеличение магнитного поля B_z (диполизация) развивается в более широкой пространственной области, распространяясь как азимутально, так и радиально (см., например, [17–20]). Многоспутниковые наблюдения показали, что суббуревой токовый клин может состоять из множества более мелкомасштабных структур (так называемых, “wedgelets” в англоязычной литературе: см, например, [21]).

До недавнего времени изучение магнитной структуры как изолированных ДФ, так и области крупномасштабной диполизации на субионных масштабах было невозможным, в силу недостаточного пространственного разрешения спутниковых наблюдений. Так, многоспутниковые наблюдения Cluster позволили исследовать пространственную структуру ДФ только на ионных масштабах. Было показано, что толщина фронта составляет порядка гирорадиуса тепловых ионов (ρ_i) [6, 7, 22]. В 2013 г. спутниковая конфигурация Cluster была таковой, что расстояния между парой спутников составляли несколько десятков километров, что значительно меньше гирорадиуса тепловых ионов. Благодаря такой конфигурации, на основе анализа градиентов магнитного поля в работе [13] впервые было показано, что с ДФ связаны интенсивные токовые структуры, локализованные на электронных масштабах. Однако наблюдения лишь с двух спутников не позволяли вычислить трехмерную плотность тока. После запуска миссии Magnetospheric Multiscale (MMS) [23], четыре спутника которой образуют в пространстве тетраэдр с характерным масштабом $(1-2)\rho_e$ (ρ_e – гирорадиус тепловых электронов), эти результаты были подтверждены наблюдениями [24]. Важность исследования мелкомасштабной токовой структуры зоны диполизации обусловлена тем, что она может быть частью мелкомасштабной структуры суббуревого токового клина [21]. Кроме того, мелкомасштабная токовая структура обусловлена наличием сильных локализованных градиентов магнитного поля, которые могут быть источником волновой активности. Последняя может приводить к дополнительному рассеянию электронов в конус потерь и их высыпанию в авроральной области [14, 25, 26].

В данной работе, используя преимущества наблюдений MMS с высоким временным и пространственным разрешением, мы исследовали многомасштабную магнитную и токовую структуру ДФ, наблюдаемую во время двух последовательных продолжительных диполизаций, связанных с торможением и накоплением магнитного потока в ближнем хвосте магнитосферы Земли.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе использованы данные феррозондовых магнитометров Analog Flux-Gate (AFG) и Digital Flux-Gate (DFG), которые представляют собой блок магнитометров fluxgate magnetometer (FGM), входящих в состав эксперимента FIELDS [27, 28]. Комплекс этих приборов позволяет измерять магнитное поле с временным разрешением от 0.125 с до 7.8125 мс.

Данные о параметрах плазмы были получены комплексом Fast Plasma Investigation (FPI). FPI представляет собой комплекс ионных и электронных спектрометров, позволяющих измерять 3D функции распределения ионов и электронов с максимальным временным разрешением 150 и 30 мс соответственно, в диапазоне энергий от ~ 10 эВ до 30 кэВ [29]. Наблюдения FPI с высоким временным разрешением позволяют вычислить величину плотности электрических токов по измеренному потоковому скоростям заряженных частиц (электронов и ионов) и их концентрациям.

Везде в работе используется солнечно-магнитосферная геоцентрическая система координат (GSM). В данной системе координат ось X направлена вдоль линии Земля–Солнце. Направление оси Y определяется как векторное произведение направления X и оси магнитного диполя Земли. Ось Z определяется как векторное произведение осей X и Y .

3. НАБЛЮДЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ ДИПОЛИЗАЦИЙ 06.07.2017 В 01.37–01.55 UT

На рис. 1 представлен интервал наблюдения продолжительных диполизаций магнитного поля, наблюдаемых в полуночном секторе геомагнитного хвоста спутниками MMS (приведены данные со спутника MMS-1) 06.07.2017 в 01.37–01.55 UT на радиальном расстоянии от Земли $\sim 18.9R_E$ (R_E – радиус Земли). Координаты MMS приведены в нижней части рис. 2.

На рис. 2а–в представлены измерения компонент магнитного поля B_x , B_y , B_z соответственно. Из представленных данных видно, что во время наблюдения диполизаций спутники находились вблизи нейтральной плоскости, так как абсолютная величина B_x компоненты магнитного поля не превышала 10 нТл. Двумя оттенками серого цвета выделены интервалы (I и II) наблюдения двух продолжительных диполизаций, наблюдаемых во время осциллирующий ускоренного потока плазмы (рис. 2е) [25]. Вертикальные штриховые линии отмечают моменты времени наблюдения ДФ, которые проявляются в резких возрастаниях B_z -компоненты магнитного поля с амплитудой $\Delta B_z > 5$ нТл на временном интервале ≤ 30 с (см., например, [6]).

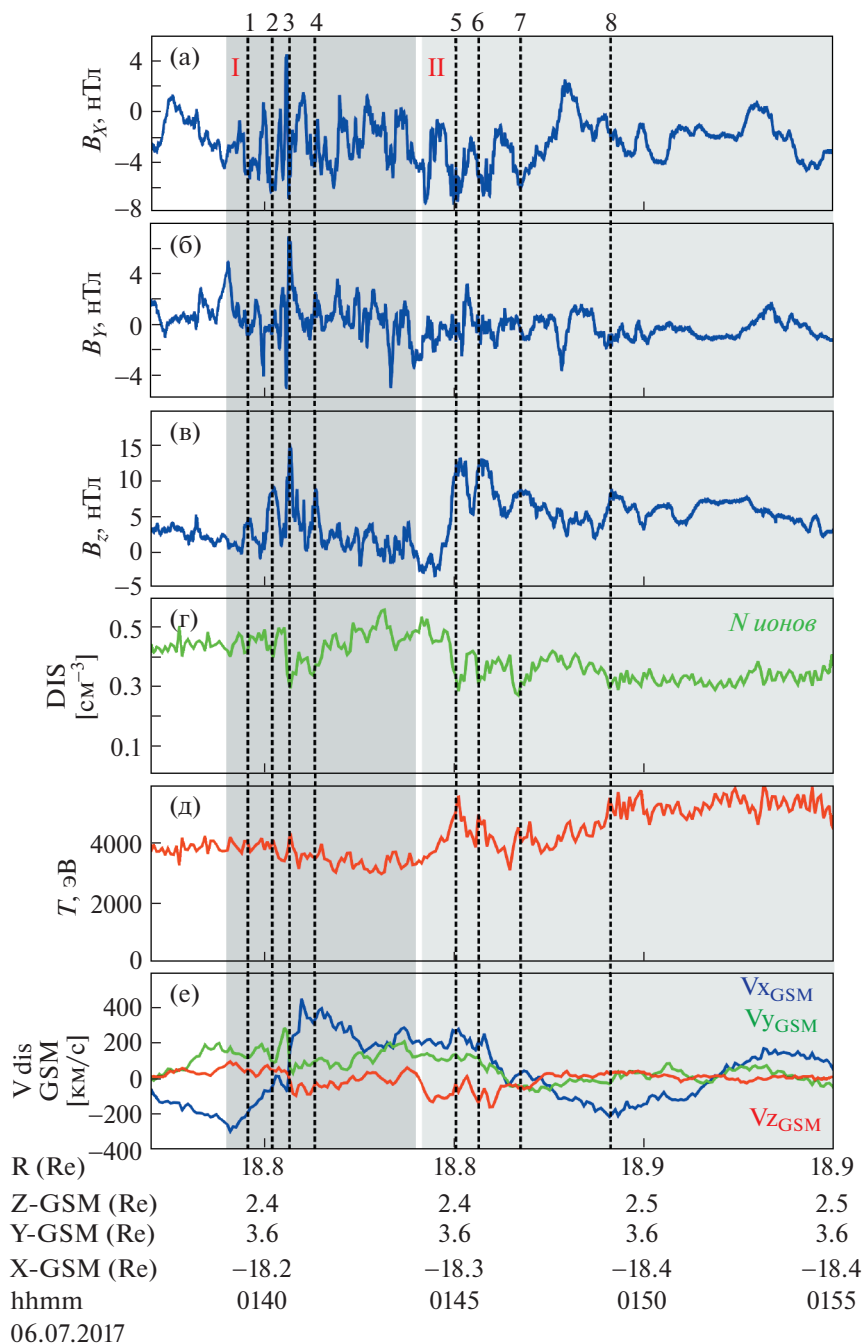


Рис. 2. (Цветной онлайн.) Наблюдения двух продолжительных диполизаций магнитного поля (I и II), выделены серым цветом, по данным спутника MMS-1 06.07.2017 в 01.37–01.55 UT. Вертикальными штриховыми линиями обозначены ДФ, исследуемые в данной работе. Номер ДФ указан над верхней панелью. Сверху вниз показаны: временной ход B_x (а), B_y (б) и B_z (в) компоненты магнитного поля; временные профили концентрации (г) и температуры ионов (д) по данным FPI; три компоненты потоковой скорости ионов (е); под нижней компонентой представлены радиальные расстояния от Земли и координаты спутника в GSM системе координат в соответствующие моменты времени.

Первая диполизация (интервал I) наблюдаемая в ~ 01.39 – 01.44 UT включает в себя 4 ДФ. За каждым ДФ наблюдалось уменьшение плотности ионов и локальное возрастание их температуры (рис. 2г, д). Такое поведение плазменных пара-

метров согласуется с представлением о том, что ДФ является границей между горячей и разряженной плазмой, связанной с ускоренным потоком, и более плотной и холодной плазмой невозмущенного плазменного слоя [6].

Помимо четырех ДФ в данном событии наблюдается тенденция медленного возрастания величины B_Z -компоненты магнитного поля, и ее последующая релаксация (на интервале ~ 5 мин). Таким образом, в рассматриваемом интервале наблюдается продолжительная диполизация, включающая в себя несколько ДФ. О таком явлении сообщалось ранее в работе [24], в которой оно было классифицировано как вторичная диполизация, связанная с торможением быстрого потока плазмы и накоплением магнитного потока в ближнем хвосте.

Следующая продолжительная диполизация (интервал II) наблюдалась в ~ 01.44 – 01.55 UT. В этой диполизации, в отличие от предыдущей, ДФ не так ярко выражены. В данном событии можно выделить фазу быстрого роста B_Z -компоненты магнитного поля, которая ассоциируется с головным ДФ (№ 5), фазу плавного роста, на которой наблюдаются фронты № 6–8, и фазу релаксации диполизации, которая продолжается и за пределами выделенного интервала. Также как и в первом интервале, на каждом ДФ наблюдаются уменьшения концентрации заряженных частиц и возрастание температуры (рис. 2г).

Для определения направления движения и ориентации ДФ № 1–8 был использован метод анализа минимальной и максимальной вариации магнитного поля (Minimum and Maximum Variance Analysis – MVA [30]). Для каждого ДФ был выделен интервал времени его наблюдения, внутри которого определялись моменты времени, соответствующие минимуму и максимуму B_Z -компоненты магнитного поля. В дальнейшем, используя временной ряд измерений вектора магнитного поля \mathbf{V} , в пределах этого интервала, был проведен MVA-анализ. В результате были определены направление максимальной вариации магнитного поля – L -направление; направление, вдоль которого вариация магнитного поля имела среднюю амплитуду – M -направление и направление минимальной вариации – N -направление. В случае, если фронт имеет плоскую структуру, N -направление совпадает с направлением нормали к фронту. Таким образом, мы определили локальную систему координат, связанную с исследуемой нами магнитоплазменной структурой. В такой системе координат можно выполнить более детальный анализ магнитной структуры ДФ. Направления осей системы координат LMN полученные отдельно для каждого ДФ приведены в табл. 1.

На рис. 3 и 4 представлены интервалы наблюдений выделенных ДФ. Нумерация панелей на рисунках соответствует номеру ДФ, буквенные индексы идентичны для каждой диполизации. На панелях Ха и Хб рис. 3 и 4 (где Х – номер ДФ), представлены временные профили B_Z - и B_T -ком-

понент магнитного поля. На примере ДФ 3 и 7, хорошо видны отличия между профилями B_Z и B_T . Таким образом, переход в LMN-систему координат позволяет более точно определить моменты времени, когда наблюдается минимум (t_{start}) и максимум (t_{stop}) вариации B_T -компоненты магнитного поля, связанного с ДФ, и, соответственно, определить продолжительность $\Delta t = t_{\text{stop}} - t_{\text{start}}$ наблюдения фронта (см. табл. 1). На рис. 3 и 4 интервал Δt выделен серым цветом.

Благодаря малому разведению спутников MMS, $\Delta d \sim 23$ км (см. рис. 5), можно с большой вероятностью утверждать, что при прохождении ДФ космические аппараты наблюдают одну и ту же пространственную структуру, в которой за время ее наблюдения изменение магнитной конфигурации во времени незначительно. Временные профили магнитного поля ДФ с четырех спутников практически идентичны, однако наблюдаются незначительные задержки, связанные с распространением ДФ (см. Ха и Хб на рис. 3 и 4). Зная задержки во времени наблюдения магнитной структуры ДФ разными спутниками MMS и расстояния между спутниками, можно с помощью метода “тайминга” [31] определить вектор скорости V_i распространения ДФ.

В связи с тем, что временные задержки (dt) очень малы, для их определения использовался метод кросс-корреляционного анализа. Затем, решая следующее уравнение в векторной форме $(d\mathbf{r} \cdot \mathbf{V}_i) / |\mathbf{V}_i|^2 = dt$, для каждого ДФ были получены V_i и $\mathbf{v} = \mathbf{V}_i / |\mathbf{V}_i|$ – вектор скорости ДФ и единичный вектор направления распространения наблюдаемой структуры соответственно. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Зная, скорость и время наблюдения ДФ можно определить масштаб наблюдаемой структуры в направлении ее пересечения спутниками MMS ($\Delta L_f = |\mathbf{V}_i| \cdot \Delta t$). Результаты вычисления пространственных масштабов ДФ также представлены в табл. 1.

Спутниковая конфигурация в форме тетраэдра позволяет определить вектор градиента магнитного поля (∇B) и вычислить три компоненты плотности электрического тока (\mathbf{J}) [30]. Данный метод (“курлометр”), как и другие методы многоспутникового анализа были разработаны для миссии CLUSTER. Спутниковая конфигурация MMS аналогична спутниковой конфигурации CLUSTER, однако малые расстояния между спутниками MMS позволяют обнаружить наличие мелкомасштабных (субионных) токовых структур, которые было невозможно наблюдать на спутниках CLUSTER, и с хорошей точностью определить три компоненты плотности тока в них.

На панелях Хв и Хг рис. 3 и 4 представлены временные профили компонент \mathbf{J} и ∇B , парал-

Таблица 1.

ДФ №	Дата Время начала <u>Время конца</u> Δt ΔL_f	Результаты MVA LMN координаты в GSM			Скорости по задержкам между спутников	
		l_x l_y l_z	m_x m_y m_z	n_x n_y n_z	V_x V_y V_z	v_x v_y v_z
		собственные значения матрицы ковариации:			$ V $, км/с	
		λ_l	λ_m	λ_n	азимут склонение	
		λ_l/λ_m	λ_m/λ_n			
1	06.07.2017 01:39:24.851 01:39:29.413 4.5626 с 971.5 км/0.7р _i	-0.2875 0.2739 0.9178	-0.9521 -0.1857 -0.2428	0.1040 -0.9436 0.3142	-145.1244 99.1415 -120.2071	-0.6816 0.4656 -0.5645
		1.2526	0.1606	0.0096	212.9316	
		7.7981	16.7325		-34.3389	-53.8312
2	06.07.2017 01:40:01.226 01:40:06.976 5.7501 с 793.5 км/0.4р _i	-0.7101 0.0052 0.7041	0.6960 -0.1462 0.7030	0.1066 0.9892 0.1002	43.5367 118.9670 54.7392	0.3155 0.8621 0.3967
		7.8350	0.0982	0.0082	138.0036	
		79.7544	11.9622		69.8996	40.8333
3	06.07.2017 01:40:35.351 01:40:39.914 4.5626 с 953.3 км/1.3р _i	-0.6347 0.6726 0.3804	-0.3494 0.1894 -0.9177	-0.6893 -0.7153 0.1148	124.9762 167.4388 -1.0970	0.5981 0.8014 -0.0053
		43.2972	5.0246	0.1273	208.9402	
		8.6171	39.4584		53.2624	-0.6016
4	06.07.2017 01:41:07.727 01:41:21.790 14.063 с 5088.8 км/3.2р _i	-0.1860 0.2812 0.9414	-0.5819 0.7405 -0.3362	-0.7917 -0.6104 0.0259	216.1906 257.5768 133.6599	0.5974 0.7118 0.3694
		5.9939	0.5369	0.1240	361.8689	
		11.1641	4.3305		49.9924	38.4823
5	06.07.2017 01:44:36.730 01:45:09.543 32.813 с 5746.2 км/4.3р _i	-0.3480 -0.0091 0.9374	-0.9344 -0.0782 -0.3476	0.0765 -0.9969 0.0187	31.4651 166.0467 45.8887	0.1797 0.9482 0.2620
		25.6582	1.0518	0.1454	175.1209	
		24.3953	7.2350		79.2699	28.5045
6	06.07.2017 01:45:29.980 01:45:43.981 14.000 с 2421.6318 км/3.0р _i	-0.3717 -0.0608 0.9263	0.1938 -0.9810 0.0133	0.9079 0.1845 0.3764	140.7063 87.0464 50.4436	0.8135 0.5032 0.2916
		6.8700	0.1776	0.0370	172.9737	
		38.6842	4.7968		31.7425	31.3730
7	06.07.2017 01:46:23.044 01:46:45.606 22.56 с 4556.5 км/7.0р _i	-0.7153 -0.1019 0.6914	-0.5572 -0.5140 -0.6522	0.4218 -0.8517 0.3109	-25.2070 -200.3566 1.8595	-0.1248 -0.9921 0.0092
		3.0429	0.1377	0.0654	201.9446	
		22.0995	2.1055		82.8293	1.0551

ДФ №	Дата Время начала <u>Время конца</u> Δt ΔL_f	Результаты MVA LMN координаты в GSM			Скорости по задержкам между спутников	
		l_x	m_x	n_x	V_x	v_x
		l_y	m_y	n_y	V_y	v_y
		l_z	m_z	n_z	V_z	v_z
		собственные значения матрицы ковариации:			$ V $, км/с	
		λ_l	λ_m	λ_n	азимут склонение	
		λ_l/λ_m	λ_m/λ_n			
8	06.07.2017 01:48:42.420 01:49:08.671 26.25 с 5188.9 км/5.0р _i	-0.1021	0.9419	0.3199	-131.4118	-0.6648
		-0.1664	-0.3332	0.9281	-131.5691	-0.6656
		0.9808	0.0415	0.1908	-67.0413	-0.3392
		3.1942	0.2647	0.0637	197.6715	
		12.0667	4.1577		45.0343	-35.7933

лельных магнитному полю, и модулей перпендикулярных компонент соответственно. Штриховыми линиями выделены моменты возрастных значений ∇B_{\perp} . Видно, что временные профили модулей перпендикулярных компонент J_{\perp} и ∇B_{\perp} имеют локальные максимумы, связанные с началом и окончанием наблюдения ДФ. Возрастания ∇B_{\perp} наиболее четко выражены для трех головных ДФ (№ 1–3) первой диполизации (интервал I). В зоне накопления магнитного потока (ДФ № 4) амплитуда ∇B_{\perp} уменьшается, и магнитная структура ДФ становится более сложной и нерегулярной.

Из представленных наблюдений плотности тока видно, что ДФ имеют сложную многомасштабную пространственно-временную токовую структуру. Так вблизи границ ДФ, наблюдаются периодические вариации продольной компоненты плотности электрического тока J_{\parallel} . При подробном анализе временных профилей J_{\parallel} , видно, что перед ДФ № 1 наблюдаются слабые биполярные вариации амплитудой $|J_{\parallel}| < 5$ нА/м², тогда как на самом ДФ, и за ним, в зоне накопления потока, амплитуда $|J_{\parallel}|$ начинает превышать 10 нА/м². На последующих ДФ (№ 2 и 3) плотность параллельных токов усиливается до пика амплитуды $|J_{\parallel}| \sim 38$ нА/м², и на ДФ № 4 наблюдается релаксация J_{\parallel} до 10 нА/м² по модулю, однако наличие биполярных вариаций сохраняется. Также, стоит отметить, что ДФ № 4 более продолжительный и может представлять более нерегулярную структуру, относящуюся к формированию вторичной, продолжительной диполизации в зоне накопления магнитного потока.

Аналогичная картина наблюдается и во время второй диполизации (интервала II, ДФ № 5–8). Однако, в данной диполизации ДФ имеют боль-

шую длительность, чем головные ДФ первой диполизации, и нерегулярную пространственную структуру, аналогичную ДФ № 4.

ДФ № 5–8 также имеют сложную токовую структуру. Аналогично первой диполизации наблюдаются биполярные вариации плотности J_{\parallel} , как перед ДФ, так и на самих фронтах. Причем амплитуда этих вариаций максимальна на фронте и за фронтом. Так на ДФ № 5, 6 амплитуда J_{\parallel} перед фронтом не превышала 10 нА/м², а на фронте достигала ~ 40 нА/м² (см. рис. 4, панели 5в и 6в). К концу второй диполизации (на ДФ № 8) наблюдается падение плотности параллельного электрического тока до 5–10 нА/м².

На рис. 3 панелях Хв хорошо видно, что на головных ДФ первой диполизации наблюдаются сильные всплески J_{\perp} с амплитудой до ~ 45 нА/м², которые можно ассоциировать с минимумом и максимумом B_i компоненты магнитного поля, т.е. с границами ДФ. При этом видно, что амплитуда всплесков J_{\perp} последовательно возрастает на ДФ № 1–3. Так на ДФ № 1 амплитуда плотностей токов J_{\perp} составляет ~ 10 –20 нА/м², в то время как на ДФ № 2 и 3 она увеличивается с ~ 30 нА/м² до ~ 45 нА/м² соответственно.

В дальнейшем, на ДФ № 4, в зоне накопления магнитного потока, наблюдается уменьшение амплитуды J_{\perp} до 10–20 нА/м², а также более сложная, нерегулярная структура токов J_{\perp} . Стоит отметить, что перед ДФ № 4 (в $\sim 01.41.00$ UT) наблюдается незначительное увеличение B_i -компоненты магнитного поля с амплитудой < 5 нТл, которое не удовлетворяет нашему критерию идентификации ДФ. Однако, с этим возрастанием B_i связаны значительные возрастания плотности токов J_{\perp} с амплитудой ~ 17 –28 нА/м², аналогичные тем, которые наблюдаются на ДФ № 1–3.

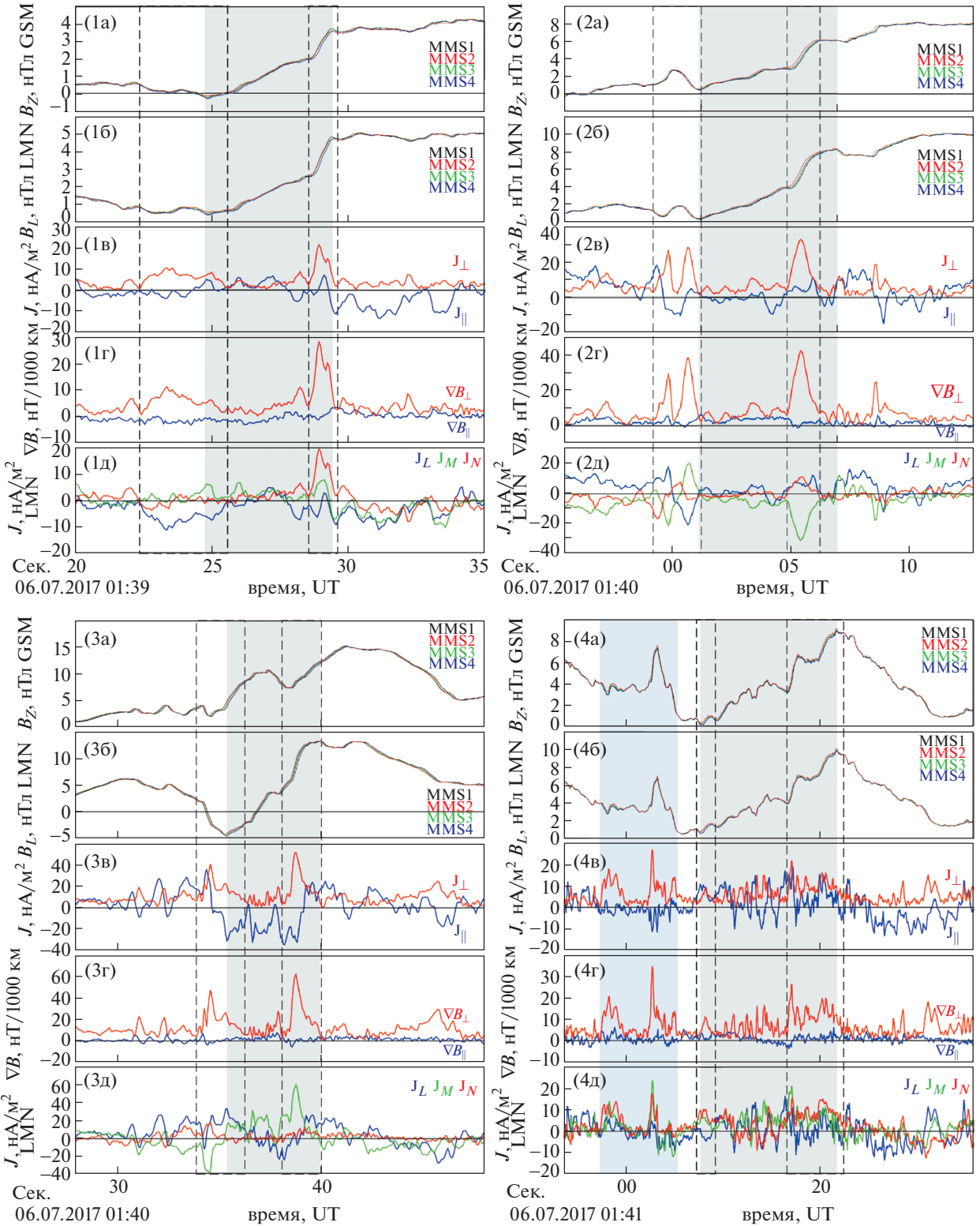


Рис. 3. (Цветной онлайн.) Наблюдения ДФ № 1–4 во время первой диполизации (1 на рис. 2). Вертикальными штриховыми линиями выделены моменты наблюдения сильных перпендикулярных градиентов магнитного поля. Подписи к панелям представлены в формате X_z , где литера “X” обозначает номер диполизации, а литера “z” панели со следующими наблюдениями: временные профили B_z (a) и B_l (б) компоненты магнитного поля с четырех спутников MMS; временной ход перпендикулярной (J_{\perp}) и параллельной (J_{\parallel}) магнитному полю компонент плотности электрического тока (в); временной ход перпендикулярной (∇B_{\perp}) и параллельной (∇B_{\parallel}) магнитному полю компонент вектора градиента магнитного поля (г); три компоненты вектора плотности электрического тока в LMN системе координат (д).

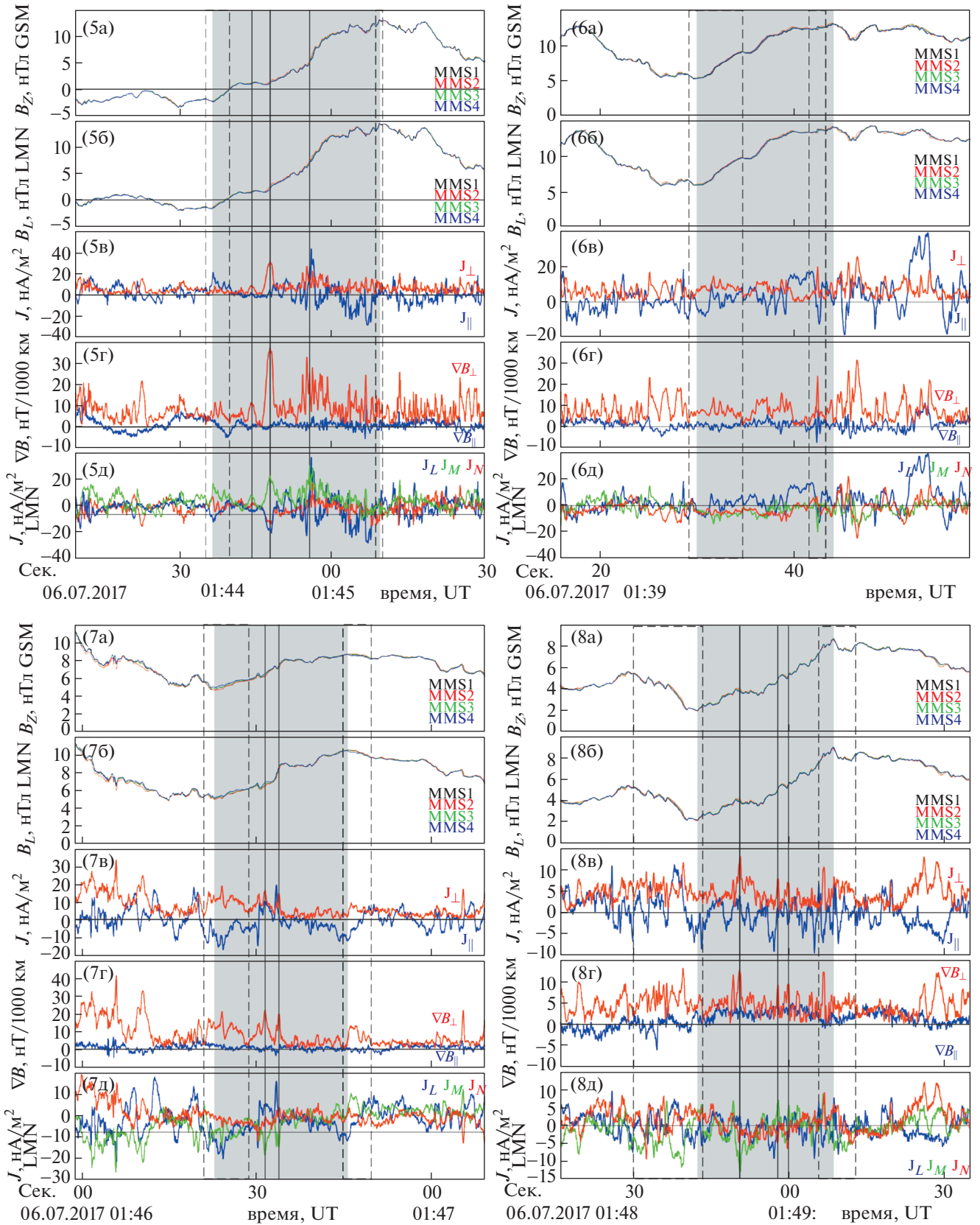


Рис. 4. (Цветной онлайн.) Наблюдения ДФ № 5–8 во время второй диполизации (II на рис. 2). Формат рисунка аналогичен формату рис. 3.

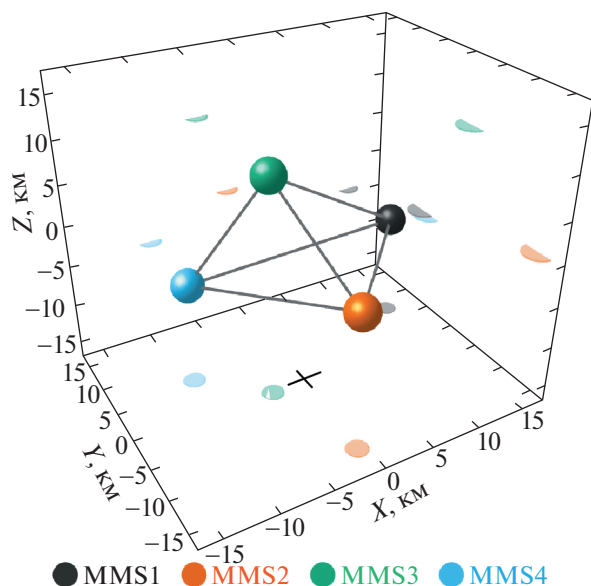


Рис. 5. (Цветной онлайн.) Тетраэдрическая конфигурация четырех спутников MMS 06.07.2017 в 01 : 49 : 30 UT и ее проекция на плоскости XY ; XZ и YZ в GSM системе координат.

Временные профили J_{\perp} , наблюдаемые во время первой диполизации (интервал I), демонстрируют наличие регулярных токовых структур на ДФ № 1–3, в то время как в зоне накопления магнитного потока наблюдается стохастизация токовых структур (ДФ № 4). Временные профили J_{\perp} , наблюдаемые во время второй диполизации (интервал II), также демонстрируют нарушение регулярности токовой структуры. При этом, все еще остается возможным, отождествить всплески J_{\perp} с границами ДФ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе выполнен анализ двух диполизаций, наблюдаемых спутниками MMS 06.07.2017 в 01.37–01.55 UT, длительность которых превышает 5 мин. Во время этих диполизаций наблюдались осцилляции ускоренного плазменного потока, которые обычно связаны с торможением ускоренных потоков в ближнем хвосте [25]. Во время данных диполизаций наблюдались серии ДФ (ДФ № 1–4 и ДФ № 5–8 во время интервалов I и II соответственно). Конфигурация спутников MMS в форме тетраэдра, позволяет использовать методы многоспутниковых наблюдений для определения пространственных масштабов магнитной и токовой конфигурации ДФ. Эти методы широко применялись для анализа наблюдений предыдущей миссии Cluster. Однако в отличие от данных Cluster, благодаря малому разнесению космических аппаратов миссии MMS

(~23 км), возможно более детальное изучение динамики и структуры ДФ на субионных масштабах. Также, малые расстояния между спутниками позволяют более точно разделить пространственные и временные эффекты, выявить наличие очень тонких токовых структур, связанных с ДФ.

Используя методы “тайминг” и MVA-анализа, для каждого ДФ были определены величина и направление скорости их распространения, и установлено, что направления скоростей, полученных в результате “тайминг”-анализа, достаточно хорошо согласуются с направлениями нормалей к ДФ, вычисленных по методу MVA (см. табл. 1). Данное соответствие свидетельствует о том, что на пространственном масштабе спутникового тетраэдра MMS ДФ можно считать плоскими магнитоплазменными структурами.

Средняя продолжительность наблюдений ДФ составила ~15.6 с, а характерный пространственный размер варьировал от ~800 до ~6000 км, что составляло от ~0.7 r_i до 7 r_i . Вне зависимости от того, на какой фазе рассматриваемых диполизаций наблюдались ДФ, их скорость распространения варьировалась от 130 до 360 км/с.

Во время двух последовательных продолжительных диполизаций помимо величины скорости ДФ, также изменялось направление их движения. На верхней панели рис. 6 схематично показаны направления скоростей распространения каждого ДФ из табл. 1 в плоскости XU (красные стрелки), и направления нормалей к ДФ (синие стрелки). На рис. 6 видно, что в большинстве случаев спутники MMS пересекают фронтальную границу ДФ (вдоль нормали к поверхности). ДФ, наблюдаемые во время первой диполизации, движутся в основном к Земле, за исключением ДФ № 1. Кроме этого, они имеют значительную составляющую скорости, направленную к вечернему флангу. О такой динамике ДФ в ближнем хвосте ранее сообщалось в работах [8, 17, 32]. Однако движение ДФ, наблюдаемых во время второй диполизации, более хаотично. Так, например, ДФ № 5 движется преимущественно в направлении вечернего фланга, в то время как ДФ № 7, 8 движутся в сторону утреннего фланга. Также хорошо видно, что направление распространения ДФ слабо коррелирует с направлением ускоренных плазменных потоков. Это свидетельствует о том, что в зоне торможения/осцилляции ускоренных потоков ДФ, скорее всего, не переносятся ускоренным потоком, а движутся в нем.

Из представленных данных видно, что головные ДФ, наблюдаемые во время первой диполизации (ДФ № 1–3), имеют более короткую длительность, чем ДФ, регистрируемые в области накопления магнитного потока (ДФ № 4–8). При этом, отличаются и их пространственный масштаб. Так, средний масштаб для ДФ № 1–3 со-

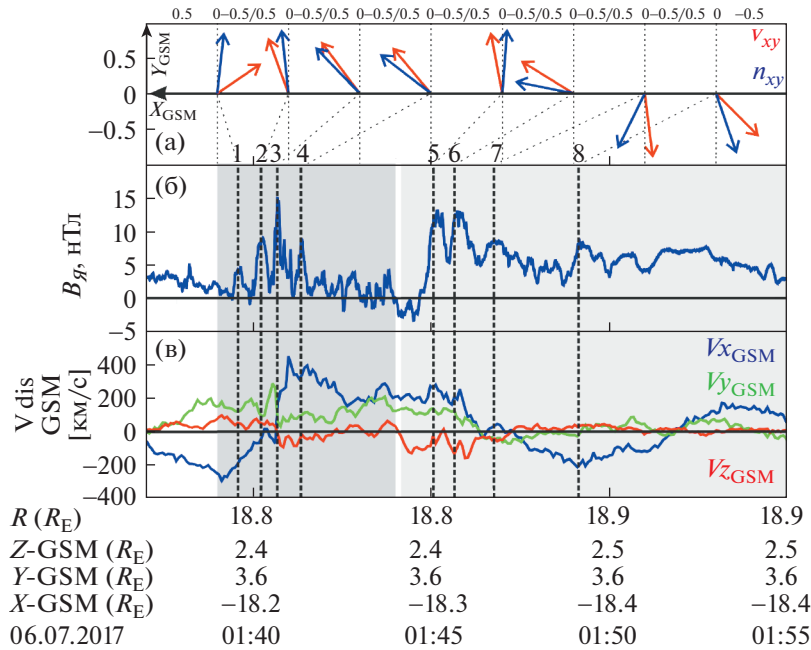


Рис. 6. (Цветной онлайн.) Проекции на плоскость XY направления векторов нормалей к ДФ (n_{xy}), определенных по MVA методом, и направления скорости распространения ДФ (v_{xy}) (а). Вектор n_{xy} берется с таким знаком, чтобы скалярное произведение ($n_{xy} \cdot v_{xy}$) было положительным. Временные профили B_z -компоненты магнитного поля (б) и трех компонент потоковой скорости ионов (в) аналогично панелям (в) и (е) рис. 2.

ставляет ~ 900 км, что соответствует $\sim 0.8r_i$, в то время как ДФ № 4–8 имеют средний масштаб ~ 4600 км, что соответствует $\sim 4.5r_i$.

Используя метод “курлометра”, были вычислены плотности токов, протекающих внутри объема тетраэдра MMS. Установлено, что в начале и в конце ДФ наблюдаются тонкие интенсивные токовые структуры, образованные токами, текущими либо преимущественно параллельно (J_{\parallel}), либо перпендикулярно (J_{\perp}) магнитному полю. Плотность тока в таких структурах варьировала от ~ 10 нА/м² до ~ 60 нА/м². Данные наблюдения согласуются с предыдущими оценками, полученными миссией Cluster [13] и наблюдениями MMS в ближнем хвосте [24]. Характерная продолжительность наблюдения этих токов составляет $\sim 0.7\text{--}2.3$ с. Предполагая, что эти токовые структуры связаны с ДФ и распространяются вместе с ними, можно оценить их характерные пространственные масштабы, которые составили $\sim 150\text{--}470$ км, что существенно меньше гирорадиуса тепловых ионов ($\leq 0.4r_i$) (см. табл. 2).

Наши наблюдения также показали, что токовая структура ДФ имеет сложную и, скорее всего, трехмерную конфигурацию. Об этом свидетельствуют наблюдения биполярных вариаций J_{\parallel} . Также на краях ДФ наблюдаются сильные всплески J_{\perp} , одновременно с которыми наблюда-

ются сильные перпендикулярные градиенты магнитного поля. Ранее было показано, что такие градиенты могут быть причиной бетатронного ускорения электронов как на изолированных ДФ, так и на ДФ, наблюдаемых во время продолжительных диполизаций (см., например, [33–35]). Таким образом, перпендикулярные градиенты магнитного поля, связанные с ДФ, могут способствовать формированию перпендикулярной анизотропии функции распределения электронов. В свою очередь, такая анизотропия может приводить к генерации всплесков узкополосных квазипараллельных вистлерных волн, которые

Таблица 2

ДФ №	Средняя продолжительность	Средний масштаб
1	~ 0.7 с	$0.1r_i$ (~ 150 км)
2	~ 1.2 с	$0.08r_i$ (~ 165 км)
3	~ 1.7 с	$0.5r_i$ (~ 355 км)
4	~ 1.3 с	$0.3r_i$ (~ 470 км)
5	~ 2.3 с	$0.2r_i$ (~ 402 км)
6	~ 1.6 с	$0.35r_i$ (~ 277 км)
7	~ 1.4 с	$0.43r_i$ (~ 321 км)
8	~ 1.8 с	$0.32r_i$ (~ 355 км)

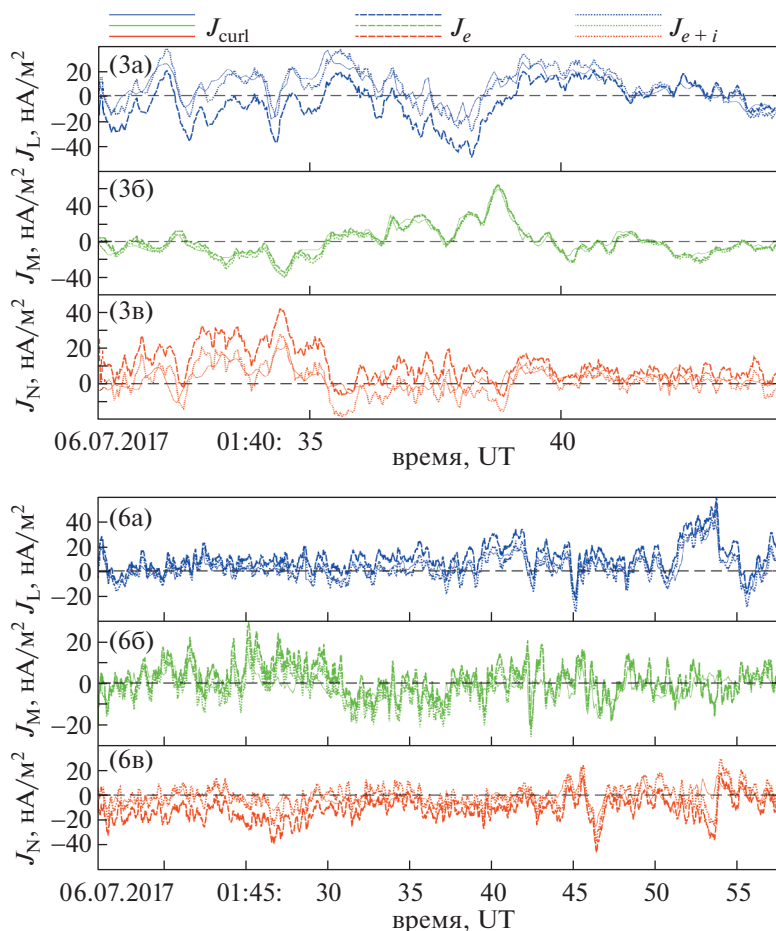


Рис. 7. (Цветной онлайн.) Сравнения временных профилей трех компонент плотности электрического тока: J_l (а), J_m (б) и J_n (в), вычисленные по методу “курлометра” (J_{curl}); вычисленные по потоковым скоростям электронов (J_e), и вычисленные по потоковым скоростям электронов и ионов (J_{e+i}).

часто наблюдаются в плазменном слое во время распространения ДФ [26, 33].

В локальной системе координат LMN, связанной с ДФ, временные профили плотности тока демонстрируют наличие биполярных вариаций во всех трех компонентах (см. рис. 3 и 4 панели Хд). Это является дополнительным свидетельством в пользу мелкомасштабной трехмерной токовой конфигурации ДФ.

Помимо малой дистанции между спутниками, еще одно преимущество миссии MMS – беспрецедентное временное разрешение плазменных измерений. Используя данные FPI, из моментов функции распределения были вычислены плотности электрических токов для ионов и электронов по формуле $J = enV$. На рис. 7 представлены временные профили плотностей токов, вычисленные как по методу “курлометра” (J_{curl}), так и из плазменных параметров: для электронов (J_e) и полного тока электронов и ионов (J_{e+i}) в системе координат LMN. Из рисунка видно, что, в целом,

динамика компонент J_{curl} и J_e совпадает, однако их амплитуды несколько различны. Такое отличие почти полностью исчезает при учете ионных токов (J_i).

Однако для мелкомасштабных интенсивных токовых структур, связанных с ДФ, наблюдается очень хорошее соответствие между J_{curl} и J_e (см. рис. 7). Таким образом, основной вклад в формирование мелкомасштабной токовой структуры, связанной с ДФ, вносит именно электронная компонента. Стоит отметить, что такое совпадение временных профилей плотностей токов J_{curl} и J_e выполняется не только на головных ДФ, наблюдаемых в интервале I, но и на ДФ, наблюдаемых в зоне накопления магнитного потока.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены наблюдения и выполнен анализ двух последовательных продолжительных диполизаций в геомагнитном хвосте

(на расстоянии $X \sim -18.3R_E$) по данным миссии MMS. С высокой точностью определены скорости распространения ДФ и их пространственный масштаб. Также, на субионных масштабах измерены плотности электрических токов, связанных с ДФ. В результате установлено следующее:

– В зоне торможения/осцилляции ускоренных потоков величина скорости распространения головных (квазиизолированных) ДФ и ДФ, наблюдаемых в зоне накопления магнитного потока, варьировалась от 130 до 360 км/с. Во время первой диполизации скорости ДФ были направлены, в основном, к Земле и в сторону вечернего фланга. Во время второй диполизации ДФ распространялись как в сторону вечернего, так и в сторону утреннего флангов. Последнее может быть связано с вихревыми движениями в зоне накопления и торможения потока.

– Существуют два различных пространственных масштаба ДФ: $\leq 1r_i$ для головных ДФ и $\geq 3r_i$ для ДФ, наблюдаемых в зоне накопления магнитного потока. Данные различия могут быть связаны с расширением/распадом ДФ в зоне торможения потока.

– С ДФ связаны тонкие ($\leq 0.4r_i$), интенсивные токовые структуры, с амплитудой плотности тока от 10 до 60 нА/м², которые формируются за счет электронных токов.

– Наблюдаемые токовые структуры образуют сложную многомасштабную трехмерную конфигурацию. На головных ДФ наблюдаются более регулярные токовые структуры. Однако с ДФ, наблюдаемыми в зоне накопления магнитного потока, связаны более сложные нерегулярные токовые структуры.

Работа А.Ю. Малыхина поддержана грантом РФФИ № 19-32-90009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плазменная гелиогеофизика. В 2 тт. Т. 1 / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008.
2. *Akasofu S.-I.* // *Planetary Space Sci.* 1964. V. 12. P. 273.
3. *McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.A.* // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. A. 3131.
4. *Angelopoulos V., Baumjohann W., Kennel C.F., Coroniti F.V., Kivelson M.G., Pellat R., Walker R.J., Lühr H., Paschmann G.* // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97(A4). P. 4027.
<https://doi.org/10.1029/91JA02701>
5. *Nakamura R., Baumjohann W., Klecker B., Bogdanova Y., Balogh A., Rème H., Bosqued J.M., Dandouras I., Sauvaud J.A., Glassmeier K.-H., Kistler L., Mouikis C., Zhang T.L., Eichelberger H., Runov A.* // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1942.
<https://doi.org/10.1029/2002GL015763>
6. *Runov A., Angelopoulos V., Sitnov M.I., Sergeev V.A., Bonnell J., McFadden J.P., Larson D., Glassmeier K.-H., Auster U.* // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L14106.
<https://doi.org/10.1029/2009GL038980>
7. *Sergeev V., Angelopoulos V., Apatenkov S., Bonnell J., Ergun R., Nakamura R., McFadden J., Larson D., Runov A.* // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L21105.
<https://doi.org/10.1029/2009GL040658>
8. *Ge Y.S., Raeder J., Angelopoulos V., Gilson M.L., Runov A.* // *J. Geophys. Res.* 2011. V. A00I23. P. 116.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015758>
9. *Shiokawa K., Miyashita Y., Sinozara I., Matsuoka A.* // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. A09219.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011144>
10. *Fu H.S., Khotyaintsev Y.V., André M., Vaivads A.* // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. P. L16104.
<https://doi.org/10.1029/2011GL048528>
11. *Schmid D., Volwerk M., Nakamura R., Baumjohann W., Heyn M.* // *Ann. Geophys.* 2011. V. 29. P. 1537.
<https://doi.org/10.5194/angeo-29-1537-2011>
12. *Nakamura R., Retinó A., Baumjohann W., Volwerk M., Erkaev B.K.N., Lucek E.A., Dandouras I., André M., Khotyaintsev Y.* // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1743.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-1743-2009>
13. *Grigorenko E.E., Dubyagin S., Malykhin A.Yu., Khotyaintsev Yu.V., Kronberg E.A., Lavraud B., Ganushkina N.Yu.* // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 602.
<https://doi.org/10.1002/2017GL076303>
14. *Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Koleva R., Ganushkina N.Y., Kozak L., Daly P.W.* // *Ann. Geophys.* 2018. V. 36. P. 741.
<https://doi.org/10.5194/angeo-36-741-2018>
15. *Sergeev V.A., Angelopoulos V., Nakamura R.* // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L05101.
<https://doi.org/10.1029/2012GL050859>
16. *Yao Z.H., Pu Z.Y., Fu S.Y., Angelopoulos V., Kubyshekina M., Xing X., Lyons L., Nishimura Y., Xie L., Wang X.G., Xiao C.J., Cao X., Liu J., Zhang H., Nowada M., Zong Q.G., Guo R.L., Zhong J., Li J.X.* // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L13102.
<https://doi.org/10.1029/2012GL052055>
17. *Birn J., Hesse M.* // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 3364.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50187>
18. *Nakamura R., Baumjohann W., Mouikis C.W., Kistler L.M., Runov A., Volwerk M., Asano Y., Vörös Z., Zhang T.L., Klecker B., Rème H., Balogh A.* // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L09804.
<https://doi.org/10.1029/2004GL019558>
19. *Forsyth C., Fazakerley A.N., Rae I.J., Watt C.E.J., Murphy K., Wild J.A., Karlsson T., Mutel R., Owen C.J., Ergun R., Masson A., Berthomier M., Donovan E., Frey H.U., Matzka J., Stolle C., Zhang Y.* // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 927.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019302>
20. *Kronberg E.A., Grigorenko E.E., Turner D.L., Daly P.W., Khotyaintsev Y., Kozak L.* // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 3055.
<https://doi.org/10.1002/2016JA023551>
21. *Liu J., Angelopoulos V., Runov A., Zhou X.Z.* // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2000.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50092>

22. Balikhin M.A., Runov A., Walker S.N., Gedalin M., Dandouras I., Hobaru Y., Fazakerley A. // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 6367.
<https://doi.org/10.1002/2014JA019908>
23. Burch J.L., Moore T.E., Torbert R.B., Giles B.L. // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 5.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0164-9>
24. Nakamura R., Varsani A., Genestreti K.J., Le Contel O., Nakamura T., Baumjohann W., Nagai T., Artemyev A., Birn J., Sergeev V.A., Robert S.A., Ergun E., Fuselier S.A., Gershman D.J., Giles B.J., Khotyaintsev Y.V., Lindqvist P.-A., Magnes W., Mauk B., Petrukovich A., Russell C.T., Stawarz J., Strangeway R.J., Anderson B., Burch J.L., Bromund K.R., Cohen I., Fischer D., Jaynes A., Kepko L., Le Ferdinand G., Geoff P., Howard R., Singer J., Slavin J.A., Torbert R.B., Turner D.L. // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* 2018. V. 123. P. 1260.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024686>
25. Panov E.V., Artemyev A.V., Baumjohann W., Nakamura R., Angelopoulos V. // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 3065.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50203>
26. Grigorenko E.E., Malykhin A.Yu., Shklyar D.R., Fadaneli S., Lavraud B., Panov E.V., Avonov L., Giles B., Le Contel O. // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028268>
27. Torbert R.B., Russell C.T., Magnes W., Ergun R.E., Lindqvist P.-A., LeContel O., Vaith H., Macri J., Myers S., Rau D., Needell J., King B., Granoff M., Chutter M., Dors I., Olsson G., Khotyaintsev Y.V., Eriksson A., Kletzing C.A., Bounds S., Anderson B., Baumjohann W., Steller M., Bromund K., Le Guan, Nakamura R., Strangeway R.J., Leinweber H.K., Tucker S., Westfall J., Fischer D., Plaschke F., Porter J., Lappalainen K. // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 105.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0109-8>
28. Russell C.T., Anderson B.J., Baumjohann W., Bromund K.R., Dearborn D., Fischer D., Le G., Leinweber H.K., Leneman D., Magnes W., Means J.D., Moldwin M.B., Nakamura R., Pierce D., Plaschke F., Rowe K.M., Slavin J.A., Strangeway R.J., Torbert R., Hagen C., Jernej I., Valavanoglou A., Richter I. // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 189.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0057-3>
29. Pollock C., Moore T., Jacques A., Burch J., Gliese U., Saito Y., Omoto T., Avonov L., Barrie A., Coffey V., Dorelli J., Gershman D., Giles B., Rosnack T., Salo C., Yokota S., Adrian M., Aoustin C., Auletta C., Aung S., Biggio V., Cao N., Chandler M., Chornay D., Christian K., Clark G., Collinson G., Corris T., De Los Santos A., Devlin R., Diaz T., Dickerson T., Dickson C., Diekmann A., Diggs F., Duncan C., Figueroa-Vinas A., Firman C., Freeman M., Galassi N., Garcia K., Goodhart G., Guerrero D., Hageman J., Hanley J., Hemminger E., Holland M., Hutchins M., James T., Jones W., Kreisler S., Kujawski J., Lavu V., Lobell J., LeCompte E., Lukemire A., MacDonald E., Mariano A., Mukai T., Narayanan K., Nguyen Q., Onizuka M., Paterson W., Persyn S., Piepgrass B., Cheney F., Rager A., Raghuram T., Ramil A., Reichenthal L., Rodriguez H., Rouzaud J., Rucker A., Saito Y., Samara M., Sauvaud J.-A., Schuster D., Shappirio M., Shelton K., Sher D., Smith D., Smith K., Smith S., Steinfeld D., Szymkiewicz R., Tanimoto K., Taylor J., Tucker C., Tull K., Uhl A., Vloet J., Walpole P., Weidner S., White D., Winkert G., Yeh P.-S., Zeuch M. // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 331.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4>
30. Sonnerup B.U.O., Scheible M. // *ISSI Scientific Report.* 1988. V. SR-001. P. 185.
31. Schwartz S.J. // *ISSI Scientific Report.* 1998. V. SR-001. P. 249.
32. Merkin V.G., Panov E.V., Sorathia K., Ukhorskiy A.Y. // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. V. 124. P. 8647.
<https://doi.org/10.1029/2019JA026872>
33. Fu H.S., Cao J.B., Cully C.M., Khotyaintsev Y.V., Vaivads A., Angelopoulos V., Zong Q.-G., Santolik O., Macušová E., André M., Liu W.L., Lu H.Y., Zhou M., Huang S.Y., Zhimaet Z. // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 9089.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020204>
34. Malykhin A.Yu., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Daly P.W. // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018. V. 58. P. 776.
<https://doi.org/10.1134/S0016793218060099>
35. Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Daly P.W., Kozak L.V. // *Ann. Geophys.* 2019. V. 37. P. 549.
<https://doi.org/10.5194/angeo-37-549-2019>