

УДК 533.95

РОЛЬ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ ТОКОВЫХ СТРУКТУР И НЕИДЕАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВО ВНЕШНЕЙ ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ

© 2024 г. М. В. Леоненко^{1,2, *}, Е. Е. Григоренко¹, Л. М. Зелёный¹¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия²Московский физико-технический институт, (Московская обл.) Долгопрудный, Россия

*e-mail: makarleonen@gmail.com

Поступила в редакцию 03.03.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 01.05.2024 г.

В работе сообщается об обнаружении продольных ускоренных электронных пучков во внешнем ($|B_x| \sim (10 - 20) \text{ нТ}$) Плазменном слое (ПС) геомагнитного хвоста. В этот момент спутники *MMS* находились с земной стороны от *X*-линии магнитного пересоединения, в Быстром плазменном потоке (БПП), на фазе накопления суббури. Показано, что продольные электронные пучки создаются сверхтепловой популяцией электронов с энергией $\sim (1 - 5) \text{ кэВ}$. Сформировавшись, ускоренные интенсивные электронные пучки являются гиротропными. В процессе эволюции пучков развивается их негиротропия. Это приводит к образованию интенсивных (до $\sim 80 \text{ нА / м}^2$) продольных электронных токовых структур. Наблюдения демонстрируют, что ускорение электронов происходит импульсно, на протяжении времени $< 5 \text{ с}$. Распространение быстрого электронного пучка во внешней плазме приводит к развитию неустойчивостей и генерации интенсивных ($\sim 50 \text{ мВ/м}$) неидеальных (в системе связанной с потоком электронов) электрических полей с частотами менее электронной гирочастоты ω_{ce} . Эти поля являются электростатическими, имеют линейную поляризацию. Появление таких полей приводит к нарушению вмерзновенности электронной плазмы и диссипации энергии. Объемная плотность трансформации энергии достигает $\sim -1000 \text{ пВт/м}^3$. В спектре неидеального электрического поля обнаружено выполаживание в частотном диапазоне между ионной плазменной ω_{pi} и электронной циклотронной ω_{ce} частотами, что свидетельствует о передаче энергии от частиц к волне в данном диапазоне. Изученные явления могут вносить значительный вклад в развитие турбулентности на электронных кинетических масштабах во внешней области ПС.

DOI: 10.31857/S0023420624060066, EDN: IGCUNS

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы накопления и высвобождения энергии являются ключевыми составляющими магнитоплазменной динамики, так как они управляют генерацией и распадом плазменных структур, ускорением и нагревом плазмы. Считается, что в хвосте земной магнитосферы наибольшая энергия накапливается в поперечном Токовом слое (ТС) хвоста в процессе его утоньшения [1]. Эта энергия может затем

высвобождаться, в том числе и взрывным образом посредством магнитного пересоединения [2]. В хвосте Земной магнитосферы магнитное пересоединение может приводить к генерации различных магнитоплазменных структур и процессов: Быстрых плазменных потоков (БПП), диполизаций, магнитных островов, возмущений ТС, продольных токов, ускорения плазмы и т.д. [см., например, 3–7]. БПП в процессе их движения из области пересоединения также способны вызывать локальные возмущения ТС [4–8].

Запуск многоспутниковой миссии *Magnetospheric Multiscale Mission (MMS)* [9] впервые позволил наблюдать процессы, происходящие в плазме на субионных и электронных кинетических масштабах. Впервые напрямую был обнаружен и исследован Сверхтонкий токовый слой (СТС), вложенный в поперечный ТС хвоста [10–12]. Толщина СТС составляет порядка нескольких электронных гирорадиусов r_e , а ток часто может переноситься размагниченной популяцией электронов [12].

Пограничный плазменный слой (ППС) представляет собой область вблизи магнитной сепаратрисы, разделяющей замкнутые и открытые силовые линии магнитного поля. Сепаратриса формируется при развитии магнитного пересоединения и проецируется в область магнитного пересоединения. В ППС миссиями *Geotail*, *Cluster*, *ARTEMIS* и др. обнаружены параллельные внешнему магнитному полю ТС ионных масштабов, в генерацию которых существенный вклад вносили ускоренные продольные электронные пучки, движущиеся в присепаратрисном слое из области пересоединения [например 13–17]. Наблюдения *MMS* впервые позволили обнаружить в ППС короткоживущие продольные токовые слои на электронных кинетических масштабах [18]. В работе [19] было показано, что подобные структуры, генерируемые ускоренными продольными электронными пучками, также могут наблюдаться не только в ППС, но и во внешней области Плазменного слоя (ПС), где силовые линии магнитного поля замкнуты.

Малая толщина СТС приводит к размагничиванию электронов, что, в свою очередь, может приводить к усилению тока в слое и возбуждению неустойчивостей, в частности, быстрой электронной тиринг-моды на размагниченных электронах [20]. Все эти процессы могут сопровождаться генерацией сильных индукционных электрических полей. Кроме того, ускоренные электронные пучки, генерирующие продольные СТС, также являются источником сильных электрических полей. О наблюдении сильных электрических полей совместно с распространением ускоренных частиц сообщалось, например, в исследовании [21]. В работе демонстрируется наблюдение электрического поля напряженностью до 500 мВ/м в области распространения БПП, представляющее из себя одно из самых интенсивных электрических полей когда-либо наблюдаемых в хвосте магнитосферы. В работе [22] сообщается о наблюдении интенсивных

(до 50 мВ/м) электростатических волн одновременно с ускоренным электронным пучком на сепаратрисе, которая проецируется в область магнитного пересоединения.

Электростатические солитонные волны были обнаружены во многих областях магнитосферы: на магнитопаузе [23–24], в БПП хвоста магнитосферы [25], в ППС [26]. В работах [27–28] демонстрируется, что электростатические поля распространяются вдоль сепаратрис совместно с ускоренными электронными пучками. Также было показано, что электростатические поля могут быть результатом развития пучковой неустойчивости [29]. Нестабильность электронного пучка вблизи диффузионной области обсуждалась в работе [30].

В работе [31] было установлено, что в области распространения БПП в ПС плазма является турбулентной, что приводит к генерации электрических полей, ускорению частиц и интенсивной диссипации энергии. В настоящей работе, используя наблюдения *MMS*, будет показано, что параллельные ускоренные электронные пучки, движущиеся из удаленного источника, ответственны за генерацию продольных СТС во внешней области ПС, т.е. на замкнутых силовых линиях. Аналогично электронным пучкам в ППС, во внешнем ПС совместно с электронными пучками наблюдаются флуктуации электрического поля электростатической природы. Наличие таких электрических полей приводит к интенсивной диссипации энергии, наблюдаемой спутниками *MMS* на краю электронного пучка.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

2.1 Ускоренные электронные пучки

В работе исследуется интервал наблюдений миссии *MMS* в burst mode (данные высокого временного разрешения) с 15:51:55 по 15:53:46 UT 6 июля 2017 г. Спутниковый квартет *MMS* находился в ПС геомагнитного хвоста Земли и имел координаты $\sim [-24, 0.5, 4.7] R_E$ в системе координат *GSE*, где R_E — радиус Земли. Данный интервал соответствует фазе накопления суббури [12]. В работе используются магнитные данные экспериментов FGM [32] и SCM [33] с временным разрешением 128 Гц и 8192 Гц, соответственно; наблюдения электрического поля экспериментом EDP [34] с временным разрешением 8192 Гц. Для изучения характеристик электронных пучков используются данные трехмерных функций распределения (ϕ , p) ионов и электронов по

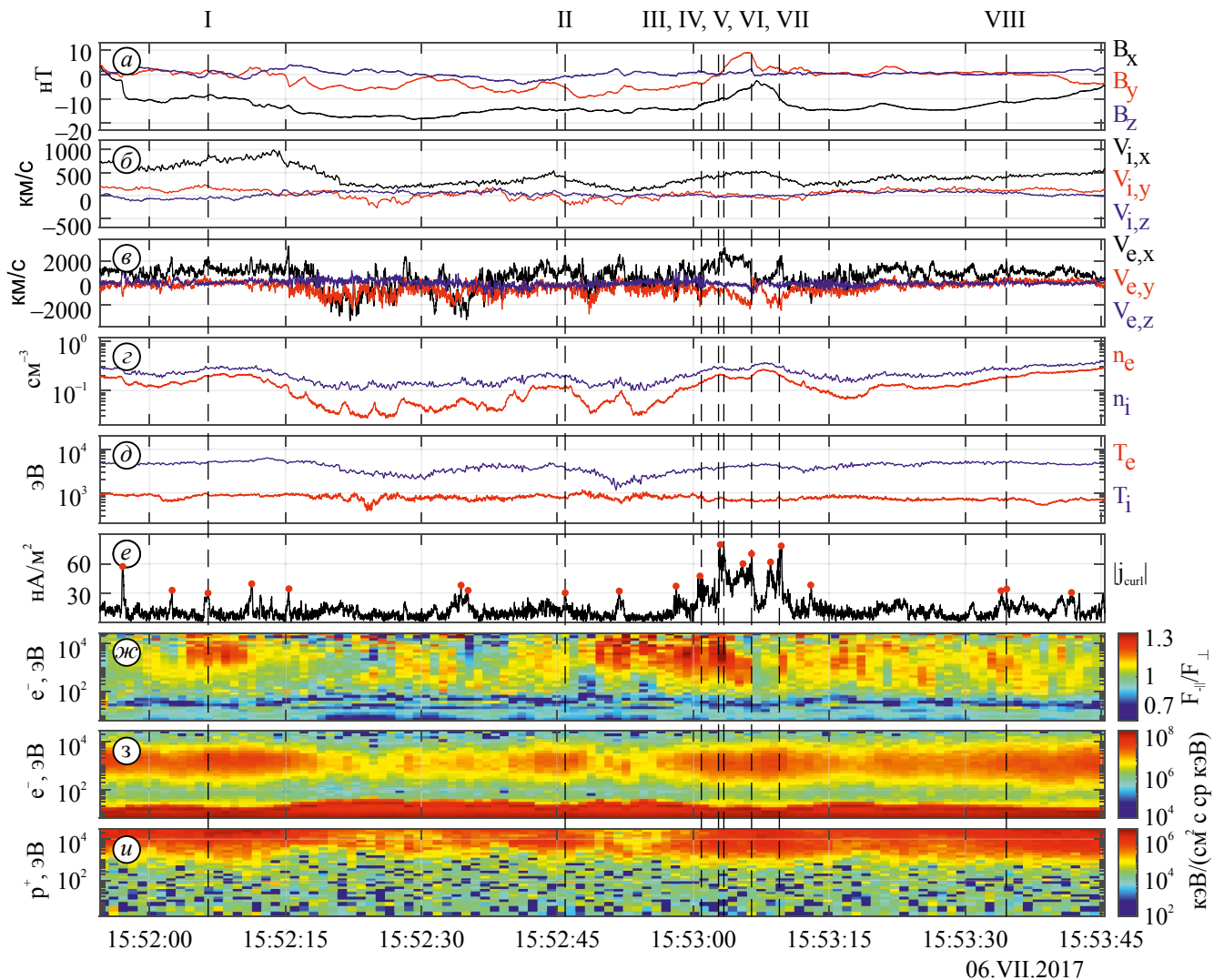


Рис. 1. Обзорный график наблюдений *MMS* 6 июля 2017 г. Сверху вниз: три компоненты (а) магнитного поля $\mathbf{B}$, (б) ионной $\mathbf{V}_i$ и (в) электронной $\mathbf{V}_e$ потоковых скоростей; электронная n_e и ионная n_i (г) концентрация частиц и (д) температура; (е) плотность электрического тока $|j_{curl}|$; энерго-временные спектрограммы (ж) отношения антипараллельного и перпендикулярного магнитному полю потоков электронов $F_{\parallel}/F_{\perp}$, энергии (з) электронов и (и) ионов. Данные приведены в системе координат *GSE*. Вертикальными пунктирными линиями выделены моменты времени, в которые были построены электронные ф. р.

скоростям эксперимента FPI [35] с временным разрешением в 150 мс и 30 мс соответственно.

На рис. 1 показан обзор исследуемого интервала. Спутники находятся во внешней области ПС на $B_x \sim -(10-20)$ нТ большую часть времени (см. рис. 1а). В интервале с 15:53:03 по 15:53:10 UT спутники *MMS* перемещаются в центральную область ПС, приближаясь к нейтральной плоскости, но не пересекая ее. Энерго-временные спектрограммы потоков электронов и ионов на рис. 1з,и свидетельствуют о том, что спутники находятся внутри ПС весь исследуемый интервал.

На протяжении интервала наблюдается БПП, направленный к Земле, X -компонента скорости которого достигает $V_{i,x} \sim 1000$ км/с (см. рис. 1б). Это показывает, что спутники *MMS* находятся с земной стороны от X -линии магнитного пересоединения. Ионный поток почти исчезает около 15:52:30 и 15:52:50 UT, что может быть связано с некорректно измеренными ф. р. ионов (см. рис. 1и) из-за того, что энергия большей части ионной популяции превысила верхний энергетический порог прибора FPI (30 кэВ). За исключением интервалов некорректного измерения ф. р., концентрации электронов и ионов

составляют $\sim (0.2-0.3)\text{см}^{-3}$; температура находится в пределах $\sim (0.7-1.0)\text{кэВ}$ и $(4.0-5.0)\text{кэВ}$, соответственно (см. рис. 1г,д).

Потоковая скорость электронов достигает $\sim 3000\text{км/с}$, и направлена преимущественно вдоль оси X (см. рис. 1в). В связи с нахождением спутников *MMS* на больших величинах X -компоненты магнитного поля, наблюдаемые потоки электронов являются преимущественно антипараллельными внешнему магнитному полю. Значительные (больше ионной потоковой скорости) всплески потоковой скорости электронов приводят к возникновению интенсивных токовых структур. На рис. 1е представлен модуль плотности электрического тока $|j_{\text{curl}}|$, вычисленного по методу Curlometer [36] с использованием магнитных данных. Красными точками на рис. 1е отмечены всплески $|j_{\text{curl}}| > 30\text{нА/м}^2$. В исследуемом интервале наблюдается 20 подобных событий. В некоторых всплесках тока, $|j_{\text{curl}}|$ достигает $\sim 80\text{нА/м}^2$.

На рис. 1ж представлена энерго-временная спектрограмма отношения антипараллельного и перпендикулярного магнитному полю потоков электронов $F_{\parallel}/F_{\perp}$. Наблюдается присутствие параллельной электронной анизотропии на энергиях $> 1\text{кэВ}$. Анизотропия потока достигает $\sim (30-50)\%$ вблизи 15:52:06 и 15:53:00 UT. Это означает, что наблюдаемый электронный поток (см. рис. 1в) является антипараллельным и создается сверхтепловой популяцией электронов.

Для моментов времени (“I–VIII”), выделенных вертикальными пунктирными линиями на рис. 1, были построены двумерные ф. р. f^{2D} , полученные путем интегрирования трехмерных ф. р. предоставляемых экспериментом FPI. Для ф. р. используется система координат $(V_{\parallel}, V_{\perp,1}, V_{\perp,2}) \propto (B, [E \times B], [B \times [E \times B]])$. Ф. р. электронов в плоскостях $(V_{\parallel}, V_{\perp,1})$ и $(V_{\parallel}, V_{\perp,2})$ почти совпадают в исследуемые моменты времени.

На рис. 2 представлены двумерные ф. р. в плоскостях $(V_{\parallel}, V_{\perp,1})$ и $(V_{\perp,1}, V_{\perp,2})$, построенные в моменты времени, отмеченные на рис. 1. В момент времени I (см. рис. 2а) наблюдается ускоренный антипараллельный пучок электронов, движущийся со скоростью $\sim -(15000-30000)\text{км/с}$, что эквивалентно энергии $\sim (1-5)\text{кэВ}$, на $B_x = -8.6\text{нТ}$. Также наблюдается встречный пучок меньшей интенсивности. Ф. р. на рис. 2б демонстрирует

наличие негиротропии электронного пучка, что свидетельствует о размагничивании электронной популяции пучка. Присутствие такого интенсивного пучка, движущегося вдоль силовых линий магнитного поля к Земле (т.е. в том же направлении, что и БПП), свидетельствует о сильном ускорении электронов, которое может происходить в удаленной X -линии.

В момент времени II (см. рис. 2в,г) также наблюдается негиротропный антипараллельный электронный пучок, однако меньшей энергии ($\sim (1-2)\text{кэВ}$), чем в момент времени I. Это может быть связано с времяпролетным эффектом, свидетельствующим о транзитном (ограниченном во времени) ускорении электронов в источнике (см., например, [7]). Времяпролетным эффектом называют разделенное во времени наблюдение частиц разной скорости, что связано с временем, требуемым для прохождения одного и того же расстояния: быстрые частицы прилетают первыми, медленные запаздывают.

При данном расположении спутников *MMS* в геомагнитном хвосте, пучок электронов со скоростью $\sim -(15000-30000)\text{км/с}$ достигнет Земли и, отразившись, вернется обратно за время $\sim (10-20)\text{с}$. В момент времени III наблюдается параллельный негиротропный пучок ($\sim (1-5)\text{кэВ}$) электронов (см. рис. 2д,е) на $B_x = -12.6\text{нТ}$. Нерегулярная (малый угол раствора и наблюдение в разных угловых секторах) структура пучка показывает, что он уже живет значительное время, возможно, испытав многократные отражения в сильном магнитном поле вблизи Земли.

Моменты времени IV, V, VI, VII относятся к наиболее интенсивной в исследуемом интервале токовой структуре ($\sim 15:53:03-15:53:10\text{UT}$). На рис. 2ж,з показана ф. р. встречных пучков электронов. Антипараллельный и параллельный пучки имеют идентичную структуру, однако отличаются по энергии: антипараллельный — порядка $(1-5)\text{кэВ}$, параллельный — порядка $(1-2)\text{кэВ}$. Затем на протяжении $\sim 2\text{с}$, наблюдается значительно ускоренный антипараллельный электронный пучок с энергией порядка $(1-5)\text{кэВ}$. На рис. 2и,к представлена ф. р. в момент наблюдения наиболее интенсивного пучка. Подобное кратковременное наблюдение интенсивного ускоренного пучка указывает на возникновение нового удаленного транзитного источника ускорения электронов. При этом, в отличие от пучка, наблюдаемого в момент времени I, не наблюдается значительной негиротропии пучка.

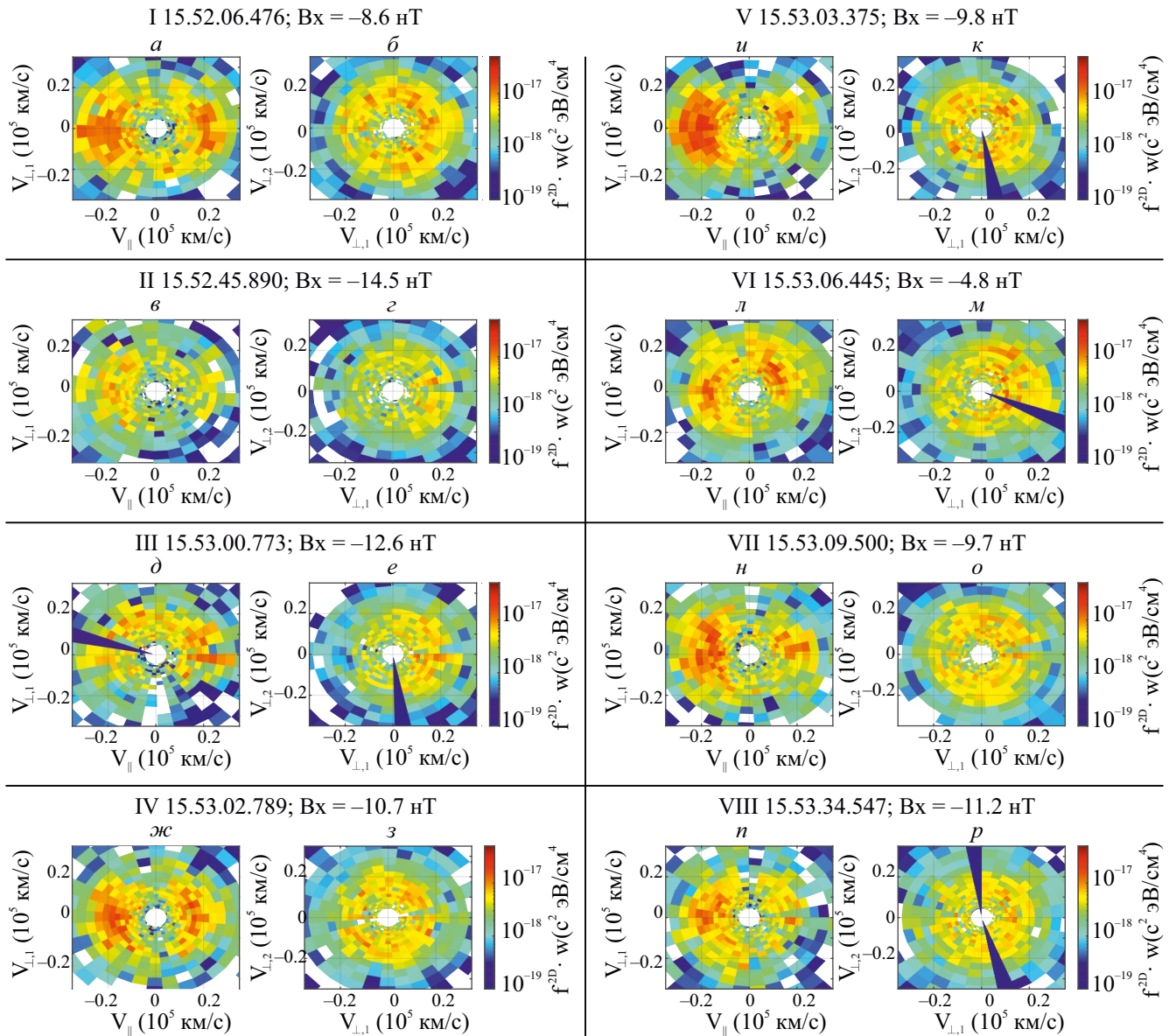


Рис. 2. Двумерные ф. р. f^{2D} электронов в плоскостях $(V_{||}, V_{\perp,1})$ и $(V_{||}, V_{\perp,2})$ в моменты времени (а,б) I, (в,г) II, (д,е) III, (ж,з) IV, (и,к) V, (л,м) VI, (н,о) VII, (п,р) VIII.

Интенсивный ускоренный пучок, показанный на рис. 2и,к наблюдается на $B_x \sim -(9-10)$ нТ. Из-за характера движения плазменного слоя относительно группы спутников *MMS* (см. рис. 1а), область $B_x \sim -(9-10)$ нТ (т.е. спутники находятся примерно в той же области ПС) в следующий раз наблюдается примерно через ~ 5 с, в момент времени VII. Ускоренный электронный пучок в момент времени VII (см. рис. 2н,о) уже более слабый и менее регулярный по сравнению с пучком в момент времени V. Это свидетельствует о том, что процесс активного ускорения частиц закончился или ослаб. Ослабленные антипараллельные пучки

электронов также наблюдаются на протяжении оставшейся части интервала, например, в момент времени VIII (см. рис. 2п,р).

Вблизи момента времени VI спутники *MMS* находятся наиболее близко к нейтральной плоскости с $B_x = -4.8$ нТ. В данный момент наблюдаются встречные пучки электронов с энергиями $(1-2)$ кэВ. В ф. р. также присутствует значительная перпендикулярная компонента. Наблюдаемая ф. р. негиротропна. Появление перпендикулярной компоненты может быть связано с дрейфом замагниченной части электронной популяции (см. рис. 1а).

По результатам проведенного анализа, можно наблюдать наличие транзитно ускоренных (до $\sim 5 \text{ кэВ}$) электронов во внешней области плазменного слоя, распространяющихся к Земле (антипараллельно магнитному полю). В исследуемом интервале спутники *MMS* находятся в южной доле хвоста с земной стороны от X -линии [12]. Таким образом, ускорение наблюдаемых пучков может происходить в области магнитного пересоединения.

Пучки электронов создают интенсивные СТС с амплитудой тока до $\sim 80 \text{ нА/м}^2$, причем, как было показано в работе [12], основной вклад в ток в таких интенсивных токовых структурах вносит размагниченная электронная популяция. Развитие неустойчивостей на электронных пучках [37] может приводить к генерации интенсивных электрических полей, наблюдение которых будет рассмотрено в следующем разделе.

2.2 Неидеальные электрические поля и диссипация энергии

Критерием вмороженности плазмы является $E = -[\mathbf{v}_e \times \mathbf{B}]$, где $\mathbf{v}_e$ — потоковая скорость электронов. В системе координат связанной с потоком электронов может присутствовать электрическое поле $E' = E + [\mathbf{v}_e \times \mathbf{B}]$, которое называют неидеальным. Ненулевое неидеальное электрическое поле приводит к нарушению вмороженности, ускорению частиц и трансформации энергии в плазме.

На протяжении исследуемого интервала наблюдается электрическое поле, усиливающееся во внешней области ПС ($\sim (15:52:15 - 15:53:00 \text{ UT})$ и $\sim (15:53:15 - 15:53:30 \text{ UT})$). На рис. 3в показаны модули наблюдаемого электрического поля $|\mathbf{E}|$, и полей конвекции $|\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}|$ и $|\mathbf{V}_i \times \mathbf{B}|$, где $\mathbf{V}_e$ и $\mathbf{V}_i$ — потоковая скорость электронов и ионов, соответственно. Наблюдается нарушение вмороженности ионов во внешней области ПС. Вмороженность электронов также локально нарушается. Неидеальное электрическое поле, вызывающее нарушение вмороженности: $E' = E + [\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}]$ достигает $\sim 50 \text{ мВ/м}$ по модулю.

Частотно-временная спектрограмма модуля неидеального электрического поля представлена на рис. 3г. Наблюдается усиление флуктуаций электрического поля в области внешнего ПС на частотах до $\sim 100 \text{ Гц}$. Циклотронная частота электронов показана черной кривой на рис. 3г и составляет порядка $(400 - 500) \text{ Гц}$ во внешнем плазменном слое.

Присутствие неидеального электрического поля может вызывать диссипацию энергии в плазме, характеризующуюся параметром $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$. Максимальное значение объемной мощности трансформации энергии достигает $\sim -1000 \text{ пВт/м}^3$ вблизи момента времени III. Также значительная диссипация энергии порядка $\sim 200 \text{ пВт/м}^3$ наблюдается во всей внешней области ПС. Частотно-временная спектрограмма параметра $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$ (см. рис. 3е) примерно повторяет спектрограмму неидеального электрического поля, что свидетельствует, что величина параметра $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$ контролируется преимущественно значением неидеального электрического поля. Кроме того временное разрешение магнитных данных, а соответственно и плотности электрического тока, составляет всего 128 Гц . Это не позволяет наблюдать гармоники выше 64 Гц в частотном спектре плотности электрического тока.

Подобные высокочастотные осцилляции электрического поля могут быть проявлениями электростатических волн. Для проверки данного предположения на рис. 3ж,з представлены модуль магнитного поля по данным эксперимента SCM (8192 Гц) и его частотно-временная спектрограмма. В отличие от спектрограммы неидеального электрического поля, в магнитном поле не наблюдается высокочастотных колебаний, а также усиления спектра во внешней области плазменного слоя. На рис. 3и представлена частотно-временная спектрограмма отношения энергий электрического и магнитного полей:

$$\frac{W_{E',\omega}}{W_{B,\omega}} = \frac{\epsilon_0 E_{\omega}'^2 / 2}{B_{\omega}^2 / 2\mu_0},$$

где E_{ω}' и B_{ω} получены в результате преобразования Фурье неидеального электрического и магнитного полей. Во внешнем плазменном слое наблюдается увеличение отношения $W_{E',\omega} / W_{B,\omega}$ выше 1, что свидетельствует об электростатической природе наблюдаемого неидеального электрического поля.

На рис. 3к,л показаны частотные спектры спектральной плотности амплитуды флуктуаций E' и $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$ в момент времени III. В этот момент также наблюдается наибольшая диссипация энергии. Спектрограммы величин E' и $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$ в моменты времени V и VI представлены на рис. 3м,н и рис. 3о,п, соответственно. У всех показанных спектров наблюдается степенной ($\propto f^{-\alpha}$) хвост в частотном диапазоне выше электронной циклотронной частоты ω_{ce} . Показатель степени варьируется в диапазоне $(1.3 - 1.9)$.

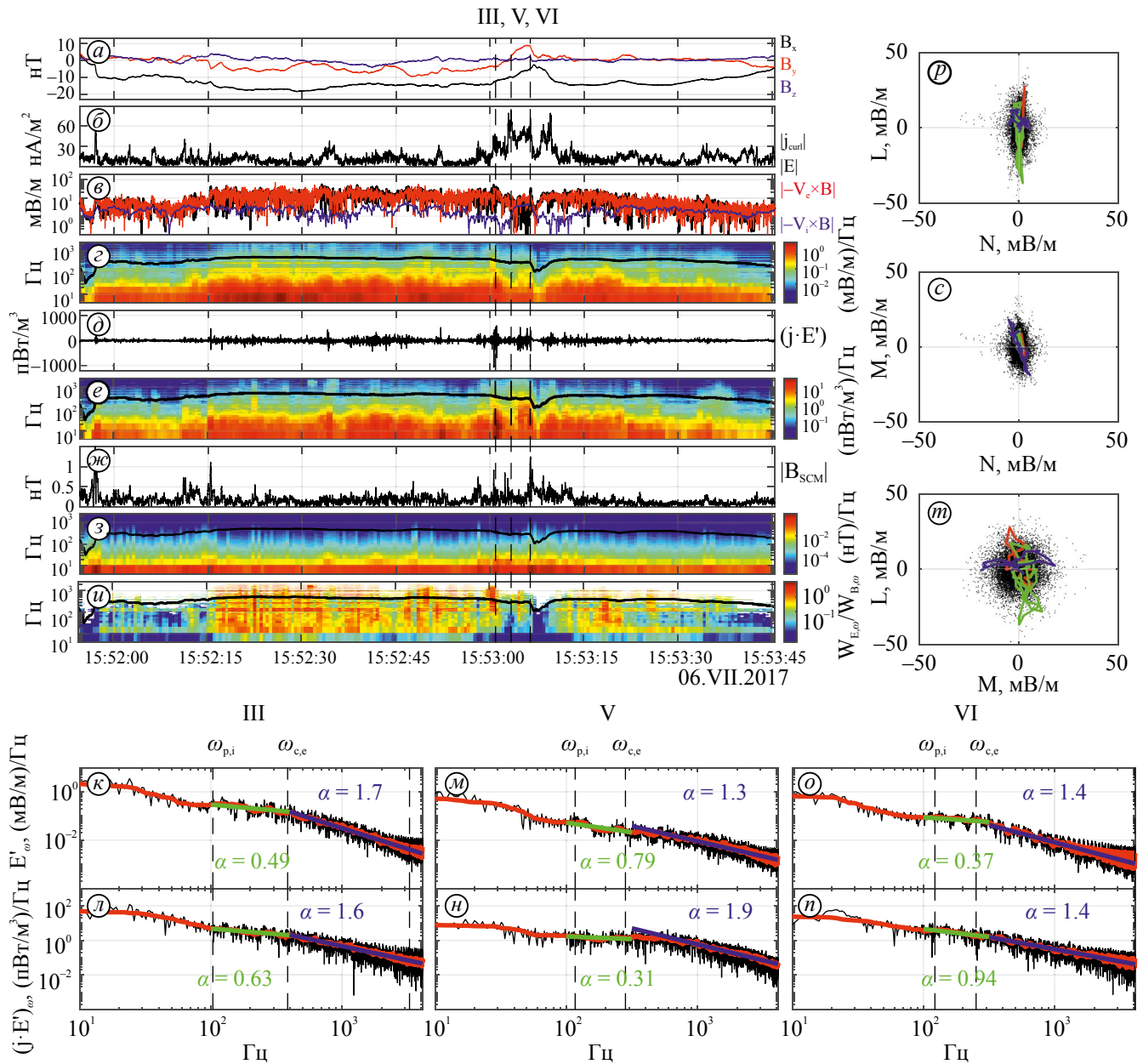


Рис. 3. Обзорный график волновых характеристик. Сверху вниз: три компоненты (а) магнитного поля $\mathbf{B}$; (б) плотность электрического тока $|j_{curl}|$; (в) модули электрического $|\mathbf{E}|$ поля и полей конвекции $|\mathbf{-V}_e \times \mathbf{B}|$ и $|\mathbf{-V}_i \times \mathbf{B}|$; (г) энерго-временная спектрограмма флуктуаций неидеального электрического поля $\mathbf{E}_\omega$; (д) величина параметра $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$; (е) энерго-временная спектрограмма флуктуаций параметра $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')_\omega$; (ж) модуль магнитного поля $|\mathbf{B}_{SCM}|$ прибора SCM (8192 Гц); (з) энерго-временная спектрограмма флуктуаций магнитного поля $\mathbf{B}_{SCM,\omega}$; (и) энерго-временная спектрограмма отношения спектральных энергий электрического и магнитного полей $W_{E,\omega}/W_{B,\omega}$. Временные спектры флуктуаций $\mathbf{E}_\omega$ и $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')_\omega$ в моменты времени (к,л) III, (м,н) V, (о,п) VI. Годографы за весь интервал (показаны черным цветом), а также для несколько случайно выбранных осцилляций $\mathbf{E}'$ в плоскостях (р) NL , (с) NM и (т) ML системы координат LMN .

На всех построенных частотных спектрах величин $\mathbf{E}'$ и $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$ наблюдается значительное выполаживание в диапазоне между плазменной ионной $\omega_{p,i}$ и электронной циклотронной $\omega_{c,e}$

частотами. Такое поведение спектра свидетельствует о значительной накачке энергии в волну в данном диапазоне частот. В горячей плазме ПС в данном диапазоне частот обычно наблюдаются

свистовые волны [см., например, [38–39] и ссылки там]. Однако в этих, и в большинстве других работ по наблюдению свистов в ПС проводились исследования квазипараллельных электромагнитных мод свистовых волн. В данном интервале в настоящей работе наблюдаются так называемые электростатические свисты, распространяющиеся под углом к внешнему магнитному полю. Энергия этих волн сосредоточена в основном в электрической компоненте волны. Действительно, как видно из рис. 3и в данном диапазоне частот энергия электрического поля флуктуаций существенно превышает магнитную энергию. Так как данные флуктуации наблюдаются одновременно с ускоренными электронными пучками, и в их частотном диапазоне наблюдается выполаживание в спектре амплитуды флуктуаций, то можно предположить, что данные волны возбуждаются неустойчивостью, связанной с распространением электронного пучка через фоновую плазму. При этом усиление волн происходит за счет передачи энергии от резонансных электронов пучка волне.

На рис. 3р,с,т представлены годографы неидеального электрического поля в системе координат LMN . LMN система координат была определена при помощи метода MVA [40] примененного к наблюдениям неидеального электрического поля во внешнем ПС (с 15:52:15 по 15:53:30 UT). Полученная система координат примерно совпадает с системой координат GSE . Направление нормали к фронту N почти совпадает с направлением X_{GSE} (во внешнем ПС магнитное поле также преимущественно направлено вдоль X_{GSE}). Отношение собственных чисел составило $\lambda_{\min} / \lambda_{\text{mid}} \sim 6$, $\lambda_{\max} / \lambda_{\text{mid}} \sim 2$. Это свидетельствует о корректности определения направления нормали и о том, что наблюдаемые электрические поля преимущественно имеют L - и M -компоненты.

Для наблюдения поляризации неидеальных электрических полей на рис. 3р,с,т показаны годографы в соответствующих плоскостях системы координат LMN за весь интервал (показаны черным цветом), а также для несколько случайно выбранных осцилляций E' , с целью более точного определения типа поляризации (показаны разными цветами). Видно, что поляризация отдельных колебаний, в основном линейная, но каждая волна имеет свою ось поляризации, которая находится в плоскости близкой, но не совпадающей, с плоскостью перпендикулярной магнитному полю. Таким образом, измеряемое неидеальное

электрическое поле состоит из набора волн, имеющих линейную поляризацию, но с различной ориентацией осей поляризации.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Продольные электрические токи часто наблюдаются вблизи сепаратрис магнитного пересоединения, которые разделяют пересоединенные и открытые силовые линии магнитного поля вблизи внешней границы ППС [14–15]. Данные высокого временного разрешения миссии *MMS* позволили впервые оценить толщину продольных токовых структур в ППС и показали, что она составляет порядка нескольких электронных инерционных длин [18].

В настоящей работе представлены наблюдения интенсивных продольных токовых структур внутри ПС, т.е. на замкнутых силовых линиях и показано, что их генерация связана с ускоренными электронными пучками, движущимися вдоль силовых линий магнитного поля. Антипараллельные ускоренные электронные пучки наблюдаются как внутри ПС, так и в его внешних областях ($B_x \sim -(10-20)$ нТ). Наблюдаемые пучки имеют энергии $\sim (1-5)$ кэВ и создают значительные электронные токи, достигающие ~ 80 нА/м².

В разделе 2.1 было показано, что ускорение электронных пучков происходило на протяжении ~ 5 с, после чего оно ослабевало или прекращалось. Так как в течение данного интервала времени ионный поток был стационарным, то можно предположить, наличие дополнительных, возможно множественных удаленных спорадически “вспыхивающих” источников ускорения электронов. На рис. 4 представлена иллюстрация такой конфигурации. В каждую область ускорения электронов проецируются разные силовые линии. Таким образом, пересекая внешнюю область ПС, спутники *MMS* детектируют ускоренные электронные пучки разных энергий и на разных этапах их эволюции. Ранее похожая конфигурация обсуждалась для сценария ускорения ионных пучков в дальних областях токового слоя и формирования мультиплетной ионной структуры в ППС [16].

Распространение ускоренного пучка в плазме может приводить к развитию различных типов неустойчивостей. В работе [30] показано, что негиротропный пучок неустойчив. В работе [29] демонстрируется, что распад пучка может генерировать электростатические волны.

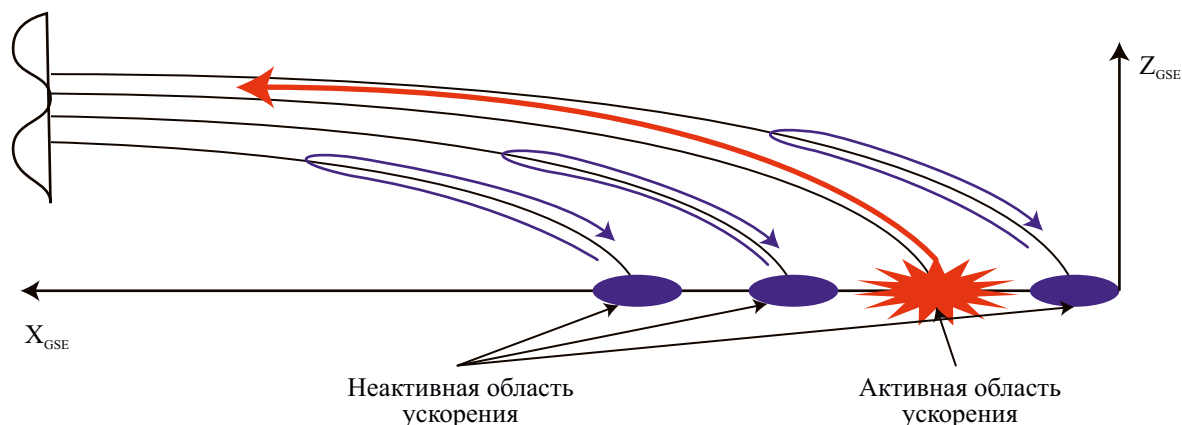


Рис. 4. Иллюстрация конфигурации с множественными источниками ускорения электронов. В каждую область ускорения электронов проецируются разные силовые линии. Разные области ускорения могут импульсно «вспыхивать», ускоряя новые частицы.

Вновь ускоренные интенсивные электронные пучки являются гиротропными. В процессе дальнейшей эволюции пучка происходит его ослабление и появляется негиротропия, что может приводить к развитию неустойчивостей с последующей генерацией электростатических флуктуаций.

Неидеальные электрические поля, которые являются причиной нарушения вмерзновенности электронов, были обнаружены во внешнем ПС. Показано, что такие поля имеют электростатическую природу. В спектре флуктуаций электрического поля обнаружено выполаживание, что свидетельствует о перекачке энергии от частиц к волнам в диапазоне частот между $\omega_{p,i}$ и $\omega_{c,e}$, который соответствует частотному диапазону свистовых волн в ПС. Как было показано в данной работе, наблюдаемые волны имеют линейную поляризацию. Линейную поляризацию имеет и квази-электростатическая мода свистовых волн, вектор поляризации которой совпадает с волновым вектором волны. Такие волны распространяются на частотах, близких к резонансной частоте $\omega_{c,e} \cdot \cos\theta$, где θ — угол между внешним магнитным полем и волновым вектором. Обнаруженные в настоящей работе электростатические волны, в предположении, что это электростатические свистовые волны, распространяются под углами к внешнему магнитному полю близкими к 90° . Это может объяснить, почему наблюдаемые колебания имеют частоты < 100 Гц, при электронной циклотронной частоте в $(400 - 500)$ Гц.

Присутствие неидеальных электрических полей в области электрических токов приводит к значительной диссипации энергии. Было

обнаружено, что параметр $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$ может достигать 1000 пВт/м^3 . Обнаруженная величина объемной мощности трансформации энергии по порядку величины совпадает с наблюдаемой в электронной диффузионной области пересоединения [41].

Обнаруженные ускоренные электронные пучки внутри ПС, а также связанные с ними электрические токи, неидеальные электрические поля и диссипация энергии, могут давать вклад в развитие турбулентности на электронных кинетических масштабах во внешней области ПС. Неизвестным остается источник ускорения электронных пучков. Предположительно, это может быть диффузионная область вторичного (возможно множественного) магнитного пересоединения в ТС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа авторов выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант РНФ № 23-12-00031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zelenyi L.M., Artemyev A.V., Malova K.V et al. Metastability of current sheets // *Physics-Uspekhi*. 2010. V. 53. Iss. 9. P. 933–941. DOI:10.3367/UFNe.0180.201009g.0973
2. Angelopoulos V., McFadden J.P., Larson D. et al. Tail reconnection triggering substorm onset // *Science*. 2008. V. 321. Iss. 5891. P. 931–935. DOI:10.1126/science.1160495
3. Angelopoulos V., Baumjohann W., Kennel C.F et al. Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet //

- J. Geophysical Research: Space Physics. 1992. V. 97. Iss. A4. P. 4027–4039.
DOI:10.1029/91JA02701
4. *Sergeev V., Runov A., Baumjohann W. et al.* Current sheet flapping motion and structure observed by Cluster // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. Iss. 6. P. 601–604.
DOI:10.1029/2002GL016500
5. *Runov A., Nakamura R., Baumjohann W. et al.* Current sheet structure near magnetic X-line observed by Cluster // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. Iss. 11. P. 331–334.
DOI:10.1029/2002GL016730
6. *Runov A., Angelopoulos V., Sitnov M.I et al.* THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. Iss. 14. P. 1–7.
DOI:10.1029/2009GL038980
7. *Sharma A.S., Nakamura R., Runov A. et al.* Transient and localized processes in the magnetotail: A review // *Annales Geophysicae*. 2008. V. 26. Iss. 4. P. 955–1006.
DOI:10.5194/angeo-26-955-2008
8. *Grigorenko E.E., Sauvaud J.A., Palin L. et al.* THEMIS observations of the current sheet dynamics in response to the intrusion of the high-velocity plasma flow into the near-Earth magnetotail // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2014. V. 119. Iss. 8. P. 6553–6568.
DOI:10.1002/2013JA019729
9. *Burch J., Moore T., Torbert R., Giles B.* Magnetospheric multiscale overview and science objectives // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. Iss. 1. P. 5–21.
DOI:10.1007/s11214-015-0164-9
10. *Phan T.D., Eastwood J.P., Cassak P.A. et al.* MMS observations of electron-scale filamentary currents in the reconnection exhaust and near the X line // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. Iss. 12. P. 6060–6069.
DOI:10.1002/2016GL069212
11. *Wang R., Lu Q., Nakamura R. et al.* An electron-scale current sheet without bursty reconnection signatures observed in the near-Earth tail // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. Iss. 10. P. 4542–4549.
DOI:10.1002/2017GL076330
12. *Leonenko M.V., Grigorenko E.E., Zelenyi L.M. et al.* MMS Observations of Super Thin Electron-Scale Current Sheets in the Earth's Magnetotail // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2021. V. 126. Iss. 11. Art.ID. e2021JA029641.
DOI:10.1029/2021JA029641
13. *Eastman, T.E., Frank L.A., Peterson W.K. et al.* The plasma sheet boundary layer // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 1984. V. 89. Iss. A3. P. 1553–1572.
DOI:10.1029/JA089iA03p01553
14. *Fujimoto M., Nagai T., Yokokawa N. et al.* Tailward electrons at the lobe-plasma sheet interface detected upon dipolarizations // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2001. V. 106. Iss. A10. P. 21255–21262.
DOI:10.1029/2001JA900011
15. *Nakamura R., Baumjohann W., Nagai T. et al.* Flow shear near the boundary of the plasma sheet observed by Cluster and Geotail // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2004. V. 109. Iss. A5. Art/ID. A05204.
DOI:10.1029/2003JA010174
16. *Grigorenko E.E., Zelenyi L.M., Dolgonosov M.S. et al.* Non-adiabatic ion acceleration in the Earth magnetotail and its various manifestations in the plasma sheet boundary layer // *Space science reviews*. 2011. V. 164. Iss. 1. P. 133–181.
DOI:10.1007/s11214-011-9858-9
17. *Grigorenko E.E., Runov A., Angelopoulos V., Zelenyi L.M.* Particle beams in the vicinity of magnetic separatrix according to near-lunar ARTEMIS observations // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2019. V. 124. Iss. 3. P. 1883–1903.
DOI:10.1029/2018JA026160
18. *Nakamura R., Sergeev V.A., Baumjohann W. et al.* Transient, small-scale field-aligned currents in the plasma sheet boundary layer during storm time substorms // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. Iss. 10. P. 4841–4849.
DOI:10.1002/2016GL068768
19. *Leonenko M. V., Grigorenko E. E., Zelenyi L. M.* Strong Nonideal Electric Fields and Energy Dissipation Observed by MMS within Field-Aligned Current Layers in the Plasma Sheet of the Earth's Magnetotail // *Atmosphere*. 2023. V. 14. Iss. 4.
DOI:10.3390/atmos14040722
20. *Tsareva O.O., Leonenko M.V., Grigorenko E.E. et al.* Fast tearing mode driven by demagnetized electrons // *Geophysical Research Letters*. 2024. V. 51. Iss. 8. Art. ID e2023GL106867.
DOI:10.1029/2023GL106867
21. *Ergun R.E., Goodrich K.A., Stawarz J.E. et al.* Large-amplitude electric fields associated with bursty bulk flow braking in the Earth's plasma sheet // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. Iss. 3. P. 1832–1844.
DOI:10.1002/2014JA020165
22. *Holmes J.C., Nakamura R., Schmid D. et al.* Wave activity in a dynamically evolving reconnection separatrix // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2021. V. 126. Iss. 7. Art.ID. e2020JA028520.
DOI:10.1029/2020JA028520
23. *Graham D. B., Khotyaintsev Yu.V., Vaivads A., Andre M.* Electrostatic solitary waves and electrostatic waves at the magnetopause // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 121. Iss. 4. P. 3069–3092.
DOI:10.1002/2015JA021527
24. *Zhou M., Ashour-Adballa M., Berchem J. et al.* Observation of high-frequency electrostatic waves in the vicinity of the reconnection ion diffusion region by the spacecraft of the Magnetospheric Multiscale (MMS)

- mission // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. Iss. 10. P. 4808–4815.
DOI:10.1002/2016GL069010
25. *Lakhina G. S., Singh S. V., Rubia R.* A mechanism for electrostatic solitary waves observed in the reconnection jet region of the Earth's magnetotail // *Advances in Space Research*. 2021. V. 68. Iss. 4. P. 1864–1875.
DOI:10.1016/j.asr.2021.04.026
 26. *Matsumoto H., Kojima H., Miyatake T. et al.* Electrostatic solitary waves (ESW) in the magnetotail: BEN wave forms observed by GEOTAIL // *Geophysical Research Letters*. 1994. V. 21. Iss. 25. P. 2915–2918.
DOI:10.1029/94GL01284
 27. *Omura Y., Kojima H., Miki N., Matsumoto H.* Two-dimensional electrostatic solitary waves observed by Geotail in the magnetotail // *Advances in Space Research*. 1999. V. 24. Iss. 1. P. 55–58.
DOI:10.1016/S0273-1177(99)00423-8
 28. *Omura Y., Kojima H., Miki N. et al.* Electrostatic solitary waves carried by diffused electron beams observed by the Geotail spacecraft // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 1999. V. 104. Iss. A7. P. 14627–14637.
DOI:10.1029/1999JA900103
 29. *Omura Y., Matsumoto H., Miyake T., Kojima H.* Electron beam instabilities as generation mechanism of electrostatic solitary waves in the magnetotail // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 1996. V. 101. Iss. A2. P. 2685–2697.
DOI:10.1029/95JA03145
 30. *Graham D.B., Khotyaintsev Y.V., Vaivads A. et al.* Instability of agyrotropic electron beams near the electron diffusion region // *Physical Review Letters*. 2017. V. 119. Iss. 2. Art.ID. 025101.
DOI:10.1103/PhysRevLett.119.025101
 31. *Ergun R.E., Goodrich K.A., Wilder F.D. et al.* Magnetic reconnection, turbulence, and particle acceleration: Observations in the Earth's magnetotail // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. Iss. 8. P. 3338–3347.
DOI:10.1002/2018GL076993
 32. *Russell C.T., Anderson B.J., Baumjohann W. et al.* The magnetospheric multiscale magnetometers // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. Iss. 1. P. 189–256.
DOI:10.1007/s11214-014-0057-3
 33. *Le Contel O., Leroy P., Roux A. et al.* The search-coil magnetometer for MMS // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. Iss. 1. P. 257–282.
DOI:10.1007/s11214-014-0096-9
 34. *Lindqvist P.A., Olsson G., Torbert R.B. et al.* The spin-plane double probe electric field instrument for MMS // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. Iss. 1. P. 137–165.
DOI:10.1007/s11214-014-0116-9
 35. *Pollock C., Moore T., Jacques A. et al.* Fast plasma investigation for magnetospheric multiscale // *Space Science Reviews*. 2016. V. 199. Iss. 1. P. 331–406.
DOI:10.1007/s11214-016-0245-4
 36. *Robert P., Dunlop M.W., Roux A., Chanteur G.* Accuracy of current density determination // *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*. Ed. Pashmann G., Daly P.W. / ISSI Scientific Report SR-001. Bern. 1998. P. 395–418.
 37. *Зеленый Л.М., Веселовский И.С.* Плазменная гелиогеофизика // М.: Физмалит, 2008.
 38. *Le Contel O., Roux A., Jacquety C. et al.* Quasi-parallel whistler mode waves observed by THEMIS during near-earth dipolarizations // *Annales Geophysicae*. 2009. V. 27. Iss. 6. P. 2259–2275.
DOI:10.5194/angeo-27-2259-2009
 39. *Grigorenko E.E., Malykhin A.Y., Shklyar D.R. et al.* Investigation of electron distribution functions associated with whistler waves at dipolarization fronts in the Earth's magnetotail: MMS observations // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2020. V. 125. Iss. 9. Art.ID. e2020JA028268.
DOI:10.1029/2020JA028268
 40. *Sönnnerup B.U.Ö., Scheible M.* Minimum and Maximum Variance Analysis // *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*. Ed. Pashmann G., Daly P.W. / ISSI Scientific Report SR-001. Bern. 1998. P. 185–220.
 41. *Li X., Wang R., Lu Q. et al.* Three-dimensional network of filamentary currents and super-thermal electrons during magnetotail magnetic reconnection // *Nature Communications*. 2022. V. 13. Iss. 1. Art.ID. 3241.
DOI:10.1038/s41467-022-31025-9