Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 1, с. 14 – 24

Электростатические солитоны в центральном плазменном слое геомагнитного хвоста Земли

М. В. Леоненко[+*1)], *Е. Е. Григоренко*[+], *Л. М. Зелёный*[+*], *Х. Фу*[×∘2)]

[+]*Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия,*

[*]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701 Долгопрудный, Россия*

[×]*School of Space and Earth Sciences, Beihang University, 100191 Beijing, China*

[∘]*Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing, Ministry of Industry and Information Technology, 100191 Beijing, China*

Поступила в редакцию 3 мая 2025 г.
После переработки 24 мая 2025 г.
Принята к публикации 27 мая 2025 г.

Используя спутниковые наблюдения MMS в хвосте магнитосферы Земли, мы показали, что в горячей бесстолкновительной плазме, турбулизованной за счет распространения быстрого плазменного потока из области первичного пересоединения, происходит формирование множественных вторичных источников ускорения электронов. Такими источниками могут быть области вторичных микропересоединений, происходящих на электронных кинетических масштабах. В данной работе исследуются наблюдаемые электростатические солитоны, выступающие в роли маркеров “вторичных магнитных сепаратрис”, вдоль которых распространяются пучки электронов, ускоренных до сверхтепловых энергий, аналогично солитонам вблизи сепаратрис первичного пересоединения.

DOI: 10.31857/S0370274X25070037, EDN: UDFKZS

1. Введение. Электростатические Уединенные Волны (ЭУВ – ESW – *Electrostatic Solitary Waves* – в англоязычной литературе) активно изучаются в течение последних десятилетий. ЭУВ наблюдаются в виде изолированных или последовательных импульсов электрического поля, которые имеют монополярную, биполярную или триполярную волновую форму [1]. ЭУВ были обнаружены во многих ключевых областях магнитосферы Земли, например, на магнитопаузе [2–4], в авроральной области [5–7], в магнитослое [8, 9] и в солнечном ветре [10, 11].

В хвосте магнитосферы Земли ЭУВ впервые были зарегистрированы спутником Geotail [12] в присепаратрисном слое, разделяющим “открытые” (еще не пересоединенные) магнитные силовые линии долей геомагнитного хвоста и уже пересоединенные замкнутые силовые линии плазменного слоя (ПС) [13]. Магнитные силовые линии из этой области проецируются в ближайшую окрестность области магнитного пересоединения. Многочисленные исследования показали, что ЭУВ наблюдаются в этой области одновременно с ускоренными электронными пучками, распространяющимися вдоль силовых линий магнитного поля [14].

Исходя из этого, различные пучковые неустойчивости (например, двухпотоковая электронная, бунемановская и электронно-ионная неустойчивости, а также электронная и ионная акустические неустойчивости) рассматриваются как возможные источники ЭУВ. С тех пор изучение ЭУВ активно продолжалось вблизи сепаратрис и в области магнитного пересоединения [15–18]. Было показано, что наличие ЭУВ в геомагнитном хвосте действительно является характерным для наблюдений вблизи магнитных сепаратрис [12, 19]. Типичные параметры ЭУВ в этих областях составляют: амплитуда до десятков мВ/м; длительность порядка 10 мс; пространственный размер порядка (1–10) λ_D, где λ_D – дебаевская длина; фазовые скорости от десятков до тысяч км/с. Обычно амплитуда таких ЭУВ не превышает 10 мВ/м, однако в некоторых случаях сообщается о наблюдении ЭУВ с амплитудой до 500 мВ/м [20].

ЭУВ обычно связывают с ионными и электронными “дырами” в фазовом пространстве [1], которые соответствуют ЭУВ с биполярной волновой формой. Напротив, монополярные ЭУВ могут быть результатом двойных слоев с перепадом потенци-

[1)]e-mail: makarleonen@gmail.com
[2)]H. Fu.

ала [21]. Двойные слои наблюдались в присепаратрисном слое совместно с продольными электрическими полями, достигающими 150 мВ/м [22]. Другим источником кажущихся униполярными (сильно асимметричными биполярными) ЭУВ является электронная акустическая мода, возникающая из-за наличия двухтемпературной электронной популяции. Наличие таких ЭУВ подтверждено во внутренней магнитосфере [23]. Асимметричная волновая форма у таких ЭУВ возникает из-за затухания Ландау [23].

ЭУВ типично разделяют на две моды: быстрые и медленные солитоны, распространяющиеся со скоростями больше и меньше тепловой скорости электронов $v_{T,e}$ соответственно [24, 25]. Такие ЭУВ были исследованы вблизи сепаратрис магнитного пересоединения с помощью двумерного PIC моделирования [26]. Результаты показали наличие ЭУВ, распространяющихся со скоростями $\sim 0.7 v_{T,e}$ и $\sim 1.2 v_{T,e}$. Авторами было высказано предположение, что медленные и быстрые ЭУВ образуются в результате развития бунемановской и двухпотоковой неустойчивостей соответственно.

Распространение быстрых плазменных потоков (БПП) из удаленной области первичного магнитного пересоединения [27] обычно приводит к развитию турбулентности [28, 29], диссипации энергии и ускорению частиц в ПС [30, 31]. Недавно было показано, что во время распространения БПП в ПС генерируются электронные токовые слои (ЭТС), которые наблюдаются на произвольных расстояниях от нейтральной плоскости [32, 33]. Большинство ЭТС создаются ускоренными электронными пучками, распространяющимися вдоль магнитного поля [32, 33]. Эти пучки могут быть ускорены, например, за счет развития электронной тиринг неустойчивости в магнитных островах, переносимых БПП [35–38]. В результате, источники ускорения электронов могут быть расположены не только вблизи области первичного пересоединения, но и могут формироваться на значительных радиальных расстояниях от него [39]. Таким образом, инжектированные продольные электронные пучки заполняют в ПС и ЦПС магнитные трубки, связанные с этими вторичными источниками (см. схематическую иллюстрацию на рис. 1). Мы можем назвать эти области “вторичными” сепаратрисами вторичного(ых) пересоединения(й). Таким образом, условия, необходимые для развития плазменных неустойчивостей, генерирующих ЭУВ, потенциально выполняются всюду в ПС во время распространения БПП, а не только вблизи сепаратрис первичного пересоединения.

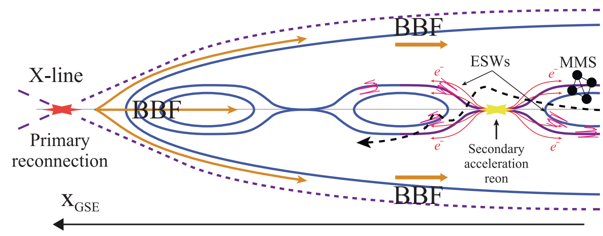

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схематическая иллюстрация магнитной конфигурации, анализируемой в настоящей работе. Траектория спутников MMS показана черной штриховой линией. Оранжевые стрелки показывают направление БПП (BBF), красные стрелки показывают продольные электронные пучки. Штриховые кривые показывают ЭУВ (ESW), связанные с электронными пучками. Сепаратрисы магнитного пересоединения показаны фиолетовым: первичные – штриховой линией, вторичные – сплошной. Земля находится слева

В то время как предыдущие исследования были сосредоточены на ЭУВ, наблюдаемых вблизи областей первичного магнитного пересоединения и их сепаратрис, данная работа фокусируется на изучении ЭУВ, обнаруженных в турбулентном ЦПС во время распространения БПП, вдали от сепаратрис, формируемых первичным пересоединением. Используя данные миссии MMS в быстрой (burst) моде [40, 41], мы сообщаем об обнаружении интенсивных (до 100 мВ/м) ЭУВ, связанных с ЭТС в ЦПС. Большая амплитуда флуктуаций электрического поля и сильный электрический ток приводят к наблюдению значительной объемной мощности трансформации энергии ($\mathbf{j} \cdot \mathbf{E'}$) до ± 2.5 нВт/м^3, что даже превосходит значения, наблюдаемые в электронной диффузионной области первичного магнитного пересоединения [42]. Неидеальное электрическое поле $\mathbf{E'}$ определяется как электрическое поле в системе покоя электронного потока, т.е. $\mathbf{E'} = \mathbf{E} + [\mathbf{v}_e \times \mathbf{B}]$. Наблюдение высоких значений параметра ($\mathbf{j} \cdot \mathbf{E'}$) свидетельствует о том, что электронная диффузионная область первичного пересоединения не является единственной областью, где происходит сильная диссипация/трансформация энергии. Различные магнитоплазменные структуры, наблюдаемые в ПС вдали от области первичного пересоединения, также могут быть ответственны за высокие значения ($\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}'$). Кроме солитонов, к таким структурам, например, относятся токовые конфигурации, связанные с диполизационными [43] и антидиполизационными [44] фронтами, магнитные жгуты [45, 46], поперечные токовые структуры [47] и др.

2. Наблюдения. Нами был исследован интервал наблюдений между 15:24 UT и 16:05 UT 6 июля

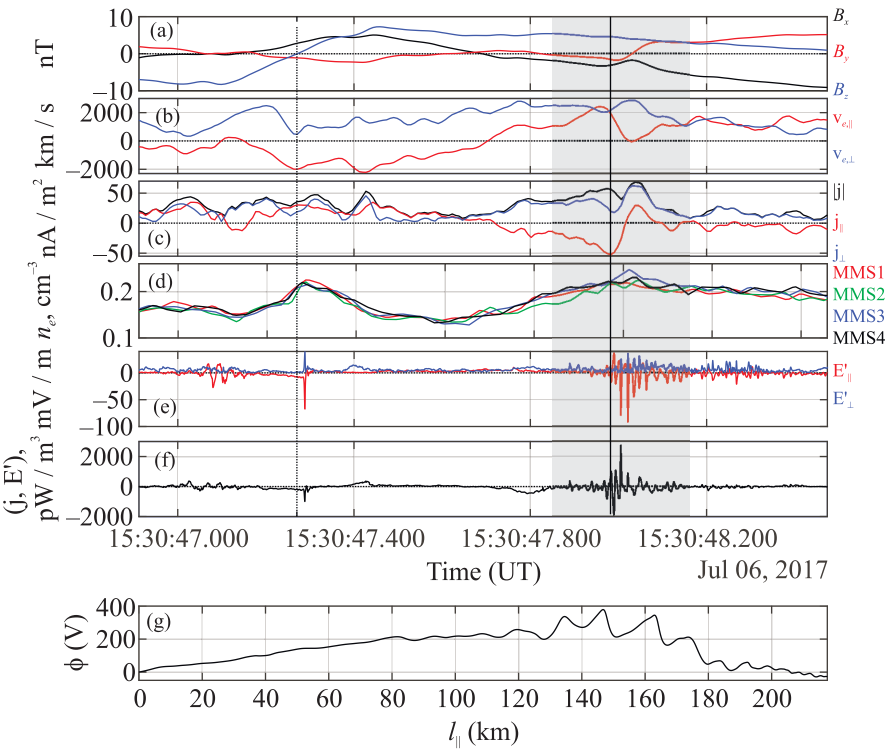

Рис. 2. (Цветной онлайн) Пример наблюдений ЭУВ аппаратом MMS3 во время его пребывания в ЦПС. Сверху вниз показаны: (a) – три *GSE* компоненты магнитного поля; (b) – потоковая скорость электронов $\mathbf{v}_e$; (c) – плотность электрического тока $\mathbf{j}$; (d) – плотность электронов n_e; (e) – неидеальное электрическое поле **E'**; (f) – мощность трансформации энергии ($\mathbf{j} \cdot \mathbf{E'}$); (g) – электрический потенциал, рассчитанный вдоль магнитного поля для выделенного серым подинтервала; вертикальная штриховая линия маркирует момент пересечения спутниками MMS границы между магнитными островами, сплошная линия – момент построения функций распределения на рис. 3a, b

2017 г., соответствующий фазе накопления суббури. Космические аппараты MMS находились в ПС и имели координаты $\sim [-24, 0.5, 4.7]R_E$ в системе координат *GSE*. На протяжении большей части интервала были доступны данные высокого разрешения быстрой (burst) моды. Во время данного интервала наблюдался интенсивный флэппинг (колебательное движение слоя вдоль нормали к нему, напоминающее виляние собакой своим хвостом) ТС, распространение и смена направления движения БПП в результате движения первичной X-линии мимо спутников MMS [48]. На протяжении данного 40-минутного интервала наблюдений присутствует одна глобальная смена знака скорости БПП (около 15:46 UT). Мы исследуем только интервалы вне данной области смены знака, т.е. на удалении от зоны первичного магнитного пересоединения. Ниже представлены наблюдения и анализ интенсивных (с амплитудой более 10 мВ/м) продольных ЭУВ, зарегистрированных в ЦПС совместно с интенсивными ЭТС, генерируемыми продольными ускоренными электронными пучками. ЭУВ могут наблюдаться в виде единичных солитонов или как цепочки, состоящей из нескольких солитонов.

2.1. Пример наблюдений ЭУВ. На рисунке 2 показан обзор наблюдений MMS3 в период с 15:30:46.800 UT по 15:30:48.400 UT 6 июля 2017 г. В начале интервала наблюдается изменение B_z от ~ -10 нТл до ~ 10 нТл (см. рис. 2a). В течение рассматриваемого интервала наблюдается БПП, направленный в хвост, с потоковой скоростью до -1400 км/с (показана в работе [48] на рис. 1). Смена знака B_z свидетельствует о пересечении (примерно в 15:30:47.100 UT) границы двух соседних магнитных островов (траектория MMS на протяжение данного короткого интервала представлена черной штриховой линией на рис. 1, схематическая траектория MMS на протяжение всего интервала с 15:24 UT до 16:05 UT показана в работе [48] на рис. 9). Чрезвычайно сильные (до 100 мВ/м) ЭУВ (см. рис. 2e) наблюдаются в ЦПС внутри ЭТС между 15:30:47.800 UT и 15:30:48.200 UT (выделенный серым подинтервал).

На рисунке 2b показан временной профиль потоковой скорости электронов. Наблюдается распространение потока электронов в хвост (см. рис. 2a). Около 15:30:47.982 UT наблюдается увеличение параллельной компоненты электрического тока до 60 нА/м^2 (см. рис. 2c). Плотность электрического тока рассчитана на основе вычисления rot$\mathbf{B}$ по данным четырех спутников MMS [49].

На протяжение выделенного серым интервала наблюдаются сильные флуктуации параллельной компоненты неидеального электрического поля $\mathbf{E'}$ (см. рис. 2e). Флуктуации электрического поля представляют собой серию преимущественно униполярных всплесков, которые являются проявлением сильной асимметрии пространственного профиля потенциала относительно центра солитона, что будет показано далее. Присутствие неидеального электрического поля внутри токовых структур приводит к сильному преобразованию энергии. Объемная мощность трансформации энергии изменяется от -2 нВт/м^3 до 2.5 нВт/м^3 (см. рис. 2f).

Пространственные размеры солитонов оценивались по временным задержкам [50]. В рассмотренном событии цепочка ЭУВ начинается с симметричного биполярного солитона, за которым следуют пять интенсивных антипараллельных магнитному полю всплесков (>10 мВ/м), которые наблюдались всеми четырьмя спутники MMS. Анализ показал, что ЭУВ движутся почти параллельно магнитному полю со скоростями $\sim(900-1300)$ км/с относительно спутников, которые на рассмотренном интервале можно считать практически неподвижными. Используя скорость наиболее интенсивного солитона, мы рассчитали электрический потенциал вдоль магнитного поля в выделенном серым подинтервале (рис. 2):

$$\phi(t) = \int_{t_1}^{t_2} (\mathbf{E}'_{||} \cdot \mathbf{v}_s) dt, \quad l_{||}(t) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{(\mathbf{E}'_{||} \cdot \mathbf{v}_s)}{|E'_{||}|} dt, \qquad (1)$$

где t_1, t_2 – моменты начала и конца подинтервала, а $l_{||}$ – координата вдоль силовых линий магнитного поля. Полученный пространственный профиль $\phi(l_{||})$ представлен на рис. 2g. Флуктуации потенциала достигают $\delta\phi \sim 200$ В, а полная вариация составляет $\Delta\phi \sim 400$ В. Это соответствует $\sim 10-20\%$ электронной температуры T_e во время наблюдения ЭУВ. Изменение продольной кинетической энергии пучка будет рассмотрено далее в работе.

Пространственный профиль потенциала электрического поля каждого солитона имеет асимметричную структуру, состоящую из двух фаз: медленного роста и быстрого спада потенциала (см. рис. 2g). Фаза роста потенциала соответствует ~ 15 км, а фаза спада ~ 5 км, что составляет порядка $(5-15)\lambda_D$. Такая конфигурация обеспечивает кажущуюся униполярность волновой формы солитонов, при этом сохраняя примерно нулевой перепад потенциала через каждый из солитонов, как и в обычных биполярных солитонах. Далее мы будем называть униполярным всплеском наиболее интенсивную половину солитона. Таким образом, именно фаза быстрого спада соответствует интенсивным униполярным всплескам продольного поля. Одновременно с униполярными всплесками параллельного поля также наблюдаются всплески перпендикулярной компоненты неидеального электрического поля. Амплитуда перпендикулярного поля примерно в 2–3 раза меньше, чем амплитуда параллельных всплесков. Таким образом, поперечные размеры ЭУВ могут быть оценены, как в 2–3 раза большие, чем линейный масштаб фазы спада потенциала, т.е. $\sim(10-15)$ км.

Считается, что ЭУВ связаны с ионными и электронными "дырами". На рисунке 2d видно, что вблизи наиболее интенсивных всплесков $\mathbf{E'}$ спутник MMS3 по сравнению с остальными спутниками MMS наблюдает увеличение концентрации электронов ($\Delta n_e \sim (0.02-0.05)$ см$^{-3}$). На рассматриваемых кинетических масштабах это может означать недостаток ионов, относительно электронов, что и является свидетельством присутствия ионной "дыры". Временное разрешение приборов MMS не позволяет непосредственно наблюдать флуктуации ионной плотности на таких временных масштабах.

2.2. Характеристики электронных популяций. Во многих исследованиях сообщалось о генерации ЭУВ электронными пучками, распространяющимися вдоль сепаратрис первичного магнитного пересоединения. В данной работе мы наблюдаем ЭУВ в ЦПС вдали от области первичного пересоединения, вероятно, вблизи сепаратрис вторичного или даже последующих пересоединения. Наши наблюдения показывают, что ЭУВ связаны с продольным параллельным магнитному полю ЭТС. На рисунках 3a,b показаны двумерные функции распределения электронов по скоростям в момент непосредственного наблюдения ЭТС, перед появлением ЭУВ (момент отмечен вертикальной сплошной черной линией на рис. 2). Для построения функций распределения была выбрана следующая система координат: $[\mathbf{v}_{||}, \mathbf{v}_{\perp,1}, \mathbf{v}_{\perp,2}] \propto [\mathbf{B}, [\mathbf{E}\times\mathbf{B}], [\mathbf{B}\times[\mathbf{E}\times\mathbf{B}]]$. Чтобы определить популяцию электронов, переносящую электрический ток, были вычислены моменты функции распределения $(n_e, \mathbf{v}_{e,\mathrm{bulk}})$ в разных энергетических диапазонах. На каждом шаге проводилось сравнение электрического тока, рассчитанного по моментам как $-en_e v_{e,\mathrm{bulk}}$ с током, рассчи-

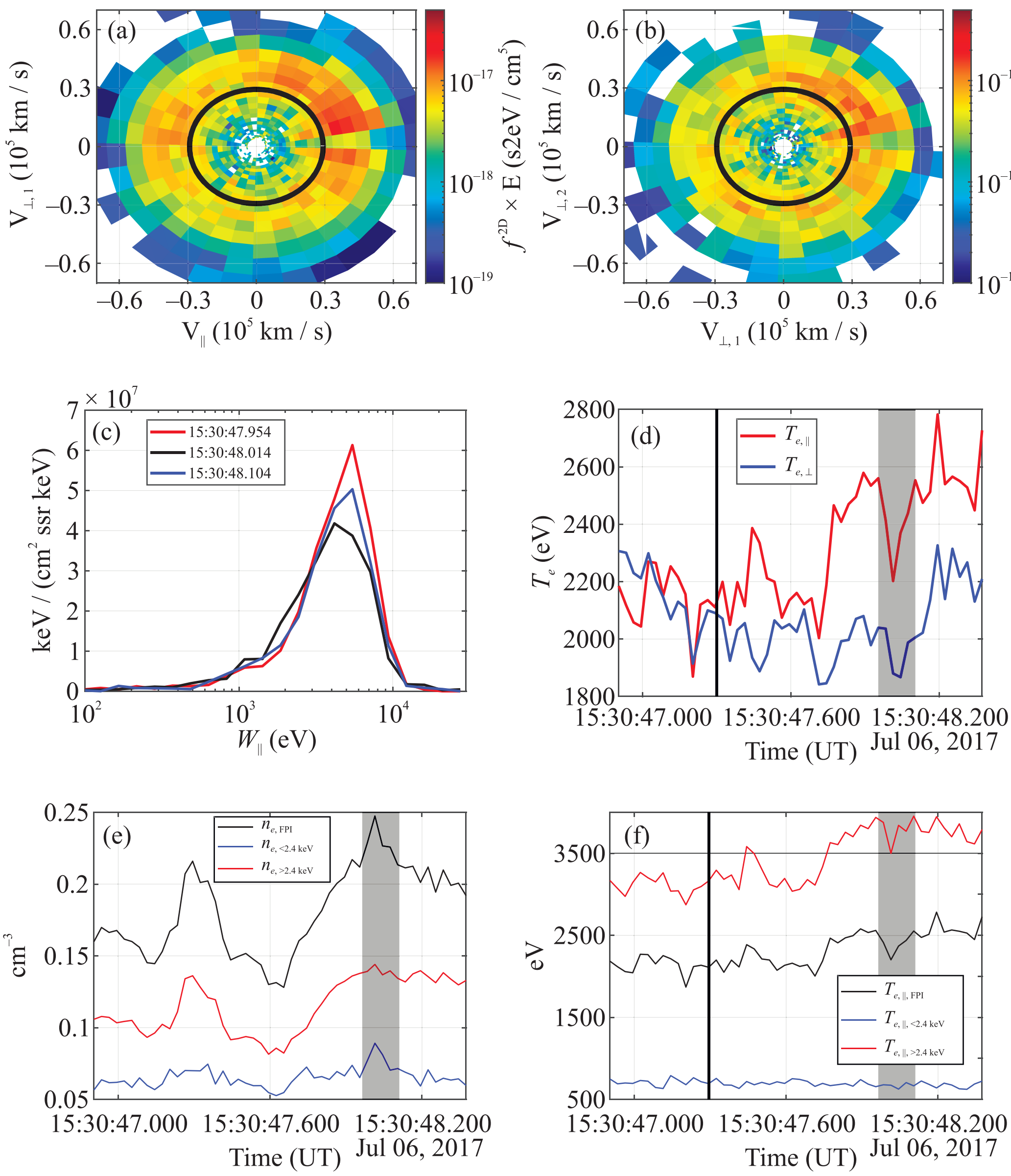

Рис. 3. (Цветной онлайн) Двумерные функции распределения электронов по скоростям в плоскостях $(\mathbf{v}_{||}, \mathbf{v}_{\perp,1})$ (a) и $(\mathbf{v}_{\perp,1}, \mathbf{v}_{\perp,2})$ (b), наблюдаемые в момент времени, отмеченный вертикальной линией на рис. 2. Черными кругами показана нижняя граница скорости токонесущей популяции электронов. Потоки электронов вдоль магнитного поля в три момента времени: непосредственно перед ЭУВ (красная кривая), внутри ЭУВ (черная линия) и сразу после ЭУВ (синяя линия) (c). Температура электронов (d). Плотность (e) и параллельная температура (f) всей электронной популяции (черные кривые), сверхтепловой (>2.4 кэВ, красные кривые) и низкоэнергичной ((0.05–2.4) кэВ, синие кривые) популяций. Серым затенением выделен интервал наблюдения ЭУВ. Вертикальные линии на панелях (d), (f) показывают момент пересечения границы между магнитными островами

танным из магнитных данных. Было установлено, что электрический ток переносится популяцией электронов с энергией > 2.4 кэВ. Эта величина примерно равна температуре электронов в выбранный момент времени. Таким образом, продольный электрический ток переносится сверхтепловой популяцией электронов.

Два встречных сверхтепловых электронных пучка, распространяющихся вдоль магнитного поля, наблюдаются на рис. 3a. Данные пучки имеют энергии порядка (2.4–7) кэВ. Присутствие сильной негиротропии пучков наблюдается на рис. 3b. Это свидетельствует о том, что движение частиц токонесущей популяции электронных пучков размагничено: не носит характер простого ларморовского вращения вокруг магнитного поля, а имеет более сложный петлеобразный характер [51].

Чтобы определить, какая популяция электронов обеспечивает увеличение концентрации, наблюдаемое аппаратом MMS3 внутри ЭУВ, мы рассчитали концентрацию электронов в различных энергетических диапазонах используя 3D функции распределения. На рисунке 3e представлены временные профили концентрации всей, измеряемой прибором FPI, популяции (черная кривая), только сверхтепловой (>2.4 кэВ, красная кривая) и только низкоэнергетической ((0.05–2.4) кэВ, синяя кривая) популяции электронов. Фотоэлектроны (<50 эВ в данном событии) не учитывались при вычислениях. Видно, что в течение выделенного серым интервала рост электронной концентрации обеспечивается низкоэнергичной электронной популяцией, в то время как концентрация сверхтепловой популяции остается практически постоянной. Предположительно, это может указывать на взаимодействие солитонов с фоновой популяцией плазмы.

Температура электронов значительно изменяется на протяжении рассматриваемого интервала наблюдений, показанного на рис. 2. Внутри магнитного острова параллельная температура возрастает до 2.8 кэВ (см рис. 3d), что может быть связано с наличием распространяющихся внутри острова продольных пучков электронов. В области, где наблюдаются ЭУВ, параллельная температура электронов падает на ~ 0.4 кэВ, что хорошо согласуется с наблюдаемыми флуктуациями электрического потенциала внутри исследуемых ЭУВ.

Чтобы определить, какая популяция электронов ответственна за снижение параллельной температуры в выделенном серым цветом подинтервале, мы рассчитали параллельную температуру электронов в выделенных энергетических диапазонах тем же способом, который использовался ранее для расчета концентраций различных электронных популяций. На рисунке 3f представлены полученные временные профили параллельной температуры различных популяций электронов. Формат рис. 3f аналогичен формату рис. 3e. В течение всего интервала параллельная температура низкоэнергичной популяции остается квазипостоянной (синий профиль). Таким образом, наблюдаемое увеличение параллельной температуры всей электронной популяции (черная кривая) после вхождения спутников MMS в магнитный остров, обусловлено увеличением параллельной температуры сверхтепловой популяции электронов (красный профиль). Это подтверждает гипотезу о том, что наблюдаемое увеличение температуры в магнитном острове связано с присутствием в нем ускоренных сверхтепловых пучков. В выделенном серым цветом подинтервале снижение параллельной температуры всей популяции связано со снижением параллельной температуры сверхтепловой популяции, что обеспечивается замедлением пучка в области ЭУВ.

Для изучения эволюции продольного пучка электронов на рис. 3c показаны продольные потоки электронов, как функция энергии электронов, в три момента времени в течение выделенного серым цветом подинтервала (т.е. интервала наблюдения ЭУВ). Профиль потока, показанный черной кривой, соответствует моменту наблюдения минимальной параллельной температуры электронов (непосредственно во время наблюдения всплесков **E'**). Красный и синий профили соответствуют моментам времени до и после (непосредственно до и после наблюдения ЭУВ) падения параллельной температуры соответственно. Видно, что поток пучка ослабевает внутри ЭУВ (см. черный профиль на рис. 3c). Это связано с уменьшением кинетической энергии пучка: максимум черного профиля соответствует энергетическому каналу $(3.6-4.7)$ кэВ, тогда как максимумы красного и синего профилей – каналу $(4.7-6.2)$ кэВ. Таким образом, продольная скорость электронного пучка уменьшается. К сожалению, из-за большой ширины каналов потерю кинетической энергии пучком точно оценить нельзя. Средние энергии этих соседних каналов отличаются примерно на 1 кэВ, поэтому, грубо, можно оценить уменьшение энергии пучка на ~ 1 кэВ. Температура пучка изменяется между ~ 320 эВ и ~ 350 эВ. Таким образом, можно предположить, что генерация ЭУВ практически не влияет на температуру пучков, но приводит к их замедлению, что в свою очередь приводит к наблюдению уменьшения параллельной температуры всей популяции электронов. Также это показывает, что наблюдаемая высокая температура электронов внутри острова связана с присутствием многокомпонентной электронной плазмы из-за инжекции очень быстрых, но холодных пучков.

Во время наблюдений ЭУВ температурная анизотропия $(T_{e,||}/T_{e,\perp})$ электронов падает на $(5-10)$ %. Это может быть связано с взаимодействием электронного пучка с ЭУВ. Передача энергии от электронного пучка к ЭУВ должна приводить к релаксации электронной анизотропии. Таким образом, генерация ЭУВ может быть одним из возможных каналов диссипации энергии электронного пучка в турбулентном ЦПС. Однако электронный пучок не ис-

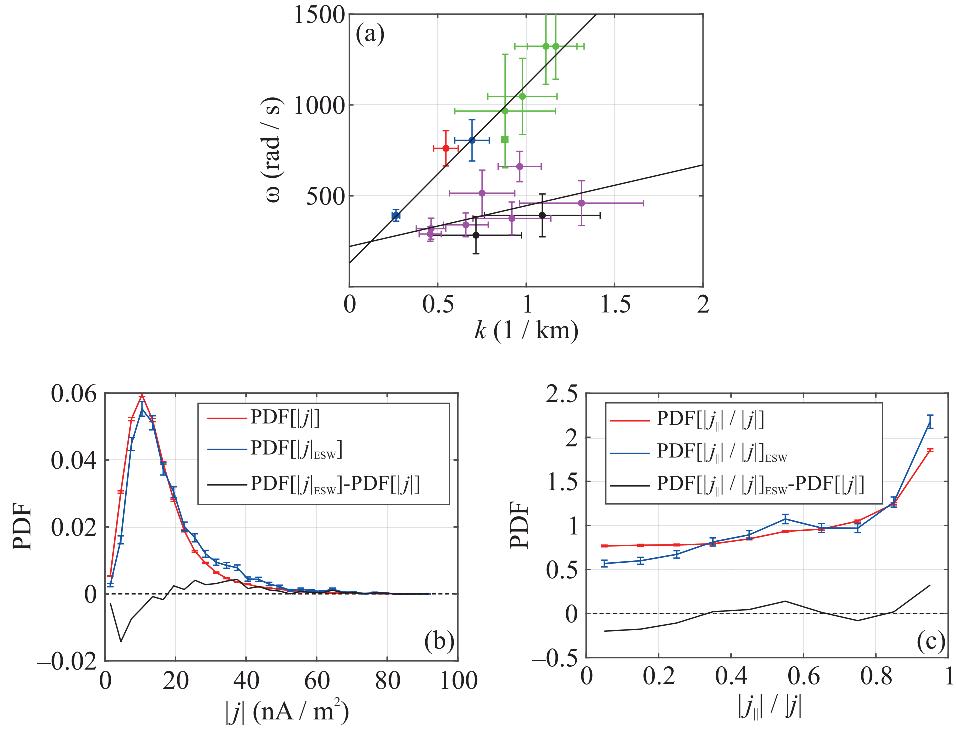

Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Зависимость частоты ω солитонов от волнового числа k. Кресты погрешности показывают вариацию параметров одного и того же солитона на разных спутниках MMS. Солитоны из одного и того же УЭВ показаны одним цветом. На панели (b) показаны функции плотности вероятности наблюдения заданного значения $|j|$ в каждый момент времени внутри ЦПС (красная кривая), в каждый момент времени внутри ЭУВ (синяя кривая) и разница между этими распределениями. На панели (c) показаны аналогичные распределения для отношения $|j_{||}|/|j|$. Обозначенные погрешности рассчитаны как $\sqrt{N}$, где N – число измерений, попавших в соответствующий бин

чезает полностью одновременно с генерацией ЭУВ, а потеря энергии пучка меньше его кинетической энергии, что наблюдается на рис. 3c. Это означает, что энергии, теряемой пучком на генерацию одного солитона или цепочки ЭУВ недостаточно для распада пучка. Можно оценить объемную мощность связанную с замедлением пучка как $dW \cdot n_{\text{beam}}/dt$, где dW – изменение кинетической энергии пучка (~ 1 кэВ, см. рис. 3c), n – концентрация пучка ($\sim 0.15\,\text{см}^{-3}$, см. рис. 3e), dt – время замедления, которое можно оценить либо как время наблюдения ЭУВ (~ 100 мс), либо как длительность одного солитона (~ 10 мс). Полученная объемная мощность изменения энергии будет равна $\sim(0.24{-}2.4)$ нВт/м^3, что по порядку величины совпадает с наблюдаемыми всплесками $(\mathbf{j}\cdot\mathbf{E}')$.

3. Статистический анализ характеристик ЭУВ. Для проверки, связаны ли наблюдаемые в ЦПС ЭУВ с продольными ЭТС, была собрана статистика наблюдения интенсивных (>10 мВ/м) ЭУВ, наблюдаемых в ЦПС ($|B_x| < 5$ нТл) в интервале наблюдения БПП между 15:24 UT и 16:05 UT 6 июля 2017 г. Обнаружено 43 ЭУВ, большинство из которых имеет выраженную асимметричную (кажущуюся униполярной) волновую форму. Каждый УЭВ типично содержит от 1 до нескольких десятков униполярных всплесков поля. Из-за неоднозначности наблюдений солитонов разными спутниками MMS метод временных задержек удалось применить лишь к 5 ЭУВ.

Типичные характеристики интенсивных солитонов, наблюдаемых в 43 ЭУВ, составляют: длительность $\sim(10{-}20)$ мс; амплитуда $\sim(20{-}30)$ мВ/м; мощность трансформации энергии ~ 500 пВт/м^3. Такие солитоны обычно наблюдаются совместно с токовыми структурами порядка $\sim(20{-}30)$ нА/м^2. Характеристики исследуемых ЭУВ примерно совпадают со значениями, наблюдаемыми в присепаратрисном слое первичного пересоединения.

На рисунке 4a представлен обзор характеристик 17 солитонов, наблюдаемых внутри 5 ЭУВ, для которых было возможно применение метода временных задержек. Были вычислены k, ω, где $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi/dt = v_{\text{Timing}}k$, L – ширина каждого униполярного всплеска (соответствует продольному пространственному масштабу фазы спада потенциала солитона), dt – длительность униполярного солитона, v_{Timing} – скорость, определенная методом временных задержек. График зависимости ω от k показан на рис. 4a. Наблюдаются две группы солитонов, которые хорошо согласуются с линейными дисперсионными уравнениями $\omega = v \cdot k$ со скоростями 220 км/с и 980 км/с, которые заведомо ниже тепловой скорости электронов ($v_{T,e} \sim (25000{-}30000)$ км/с), т.е. данные солитоны являются медленными. О возможности существования медленных ЭУВ, генерируемых двумя модами ионной акустической неустойчивости сообщалось в работе [52].

Исследуемые ЭУВ часто наблюдаются одновременно с интенсивными ЭТС. На рисунке 4b представлены функции плотности вероятности (PDF) модуля плотности электрического тока, наблюдаемого всюду в ЦПС на протяжение исследуемого интервала независимо от наличия ЭТС и ЭУВ (показано красной кривой), а также PDF модуля тока, наблюдаемого одновременно с наблюдением ЭУВ (синяя кривая). Черная кривая показывает разность синей и красной кривых. Видно, что плотность электрического тока ~ 10 нА/м^2 является наиболее вероятно наблюдаемой в ЦПС во время распространения БПП. Однако вероятность наблюдения интенсивного тока (> 25 нА/м^2) совместно с ЭУВ почти в 2 раза выше, чем всюду в ЦПС.

Поскольку ЭУВ, наблюдаемые вблизи сепаратрис первичного пересоединения, обычно связаны с продольными электронными пучками, мы проверили, связаны ли с продольными электронными пучками ЭУВ, наблюдаемые в ЦПС. На рисунке 4c показаны PDF, аналогичные представленным на рис. 4b, но для отношения $|j_{||}/j|$. Видно, что в турбулентном/возмущенном ЦПС доминируют продольные токи. Внутри ЭУВ также наиболее вероятно наблюдаются продольные токи. Сильные продольные электрические токи в ПС во время распространения БПП типично поддерживаются продольными электронными пучками. Таким образом, тесная связь между ЭУВ и переносящими ток продольными электронными пучками свидетельствует о генерации ЭУВ в результате развития неустойчивостей, связанных с распространением пучков в плазме.

4. Дискуссия. В данной работе рассматривается связь между ЭУВ и ЭТС в возмущенном ЦПС геомагнитного хвоста Земли во время распространения БПП. ЭУВ активно изучались в окрестностях первичной области глобального магнитного пересоединения, происходящего на ионных масштабах и вблизи связанных с этим пересоединением магнитных сепаратрис [1]. Мы сообщаем здесь о наблюдениях ЭУВ в ЦПС вдали от этих областей. Обнаруженные нами ЭУВ по своим характеристикам достаточно похожи на те, что наблюдались другими исследователями в присепаратрисном слое первичного пересоединения.

О наблюдении ЭУВ в ПС сообщалось в работе [53]. Авторы связывали ЭУВ с ионными дырами, образующимися в результате развития ионной потоковой неустойчивости. Однако наблюдаемые авторами солитоны являются симметричными биполярными структурами, что отличает их от солитонов, обсуждаемых в текущей работе. В нашей работе показано, что ЭУВ из нашей базы данных связаны с электронными пучками и часто имеют асимметричную волновую форму, что может быть связано с затуханием Ландау [23]. Также показано, что солитоны способны обеспечивать высокие значения $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}')$, так как наблюдаются в области сильных электронных токов, создаваемых электронными пучками.

Типичными для присепаратрисного слоя структурами являются ускоренные пучки ионов, короткоживущие электронные пучки, продольные электрические токи, и в том числе ЭУВ [1, 54–56]. В данной работе мы исследовали ЭУВ, наблюдаемые в ЦПС, т.е. заведомо далеко от первичного присепаратрисного слоя. Показано, что ЭУВ в ЦПС преимущественно наблюдаются в области наличия интенсивных продольных токовых структур. Подобные токовые структуры активно изучаются в течение последних нескольких лет. В работе [48] было показано, что ток в таких структурах переносится размагниченной (неадиабатичной [51]) популяцией электронов. Продольные токи преимущественно создаются продольными электронными пучками [32, 34]. Таким образом, области в ЦПС, в которых распространяются продольные пучки электронов и в которых мы наблюдаем ЭУВ, оказываются похожими на присепаратрисный слой. Мы предполагаем, что можно считать такие области "вторичными сепаратрисами" магнитные силовые линии которых проецируются в области вторичного ускорения электронных пучков, возможно, вторичных магнитных микро-пересоединений. Очевидно, что для существования электронного тока, электроны должны обладать достаточно высокой потоковой скоростью, что возможно либо в случае, когда вся популяция движется как целое вследствие, например, дрейфа, либо при инжекции ускоренного пучка, движущегося в одном направлении через фоновую квази-изотропную плазму, либо при наличии встречных электронных пучков, различающихся интенсивностью и/или энергиями. Наблюдаемые нами функции распределения свидетельствуют о наличии таких встречных электронных пучков. Появление интенсивного токонесущего пучка указывает на формирование дополнительного источника ускорения электронов в соответствующем направлении и/или на различную эффективность источников ускорения электронов, находящихся, например, по разные стороны от магнитного острова. Если спутник находится очень близко к нейтральной плоскости и при этом вне зоны первичного пересоединения, то наблюдаемые им силовые линии магнитного поля, скорее всего, не проецируются в эту зону пересоединения. Следовательно, наличие на этих силовых линиях токонесущих электронных пучков и связанных с ними сильных токов свидетельствует о наличии вторичных источников ускорения электронов вне области первичного пересоединения. Этот вопрос обсуждался, например, в работе [32]. Одним из возможных источников такого вторичного ускорения может быть вторичное магнитное пересоединение. О возможности формирования таких вторичных пересоединений сообщалось в работах [31, 35–38].

Наблюдаемые скорости распространения ЭУВ (от 300 до 1500 км/с) заведомо ниже тепловой скорости ($\sim$ (20000−30000) км/с) электронов в возмущенном ПС. Такие ЭУВ классифицируются как медленные [24]. Рассмотренные ЭУВ очень похожи на обнаруженные во внутренней магнитосфере солитоны [23]. Соответственно, мы предполагаем, что рассмотренные ЭУВ развиваются за счет электронной акустической неустойчивости, которая может развиваться за счет наличия относительного дрейфа популяций электронов: быстрого движения электронного пучка через фоновую плазму, движущуюся со скоростью БПП, которая в десятки раз меньше скорости пучка. Сильно асимметричная волновая форма таких ЭУВ может возникать из-за затухания Ландау [23].

Наш анализ показал, что электронный сверхтепловой пучок оказывается замедленным в области распространения ЭУВ. Это может быть связано с тем, что пучок теряет часть своей энергии на генерацию ЭУВ. Увеличение плотности электронов, предположительно, связанное с ЭУВ, наблюдается в низкоэнергичной популяции электронов (частицы с энергией ниже тепловой). Таким образом, можно предположить следующий сценарий: появление ускоренного продольного электронного пучка приводит к генерации неустойчивости и начальному возмущению электрического поля, приводящему к перераспределению (захвату) фоновой (низкоэнергичной) электронной популяции, что ведет к нелинейному возрастанию амплитуды электрических флуктуаций и генерации ЭУВ. При этом наш анализ показал, что потери энергии пучка при генерации одного солитона или ЭУВ не достаточны для разрушения пучка.

Одновременно с ЭУВ наблюдается очень интенсивная трансформация энергии, достигающая ± 2.5 нВт/м^3, что совпадает по порядку величины и даже превосходит значения, наблюдаемые в электронной диффузионной области первичного магнитного пересоединения [42]. Однако важно отметить, что наблюдаемые масштабы ЭУВ значительно меньше размеров области пересоединения. Следовательно, интегральная мощность трансформации энергии в одном ЭУВ будет значительно меньше, чем в области пересоединения. При этом измерение общего количества ЭУВ в ПС является недоступным по данным MMS. Тем не менее можно предположить, что наряду с сепаратрисами первичного крупномасштабного магнитного пересоединения и иными магнитоплазменными структурами в ПС [43, 57] сепаратрисы вторичных электронных микропересоединений, спонтанно формирующиеся в плазме ПС турбулизованной БПП, также являются достаточно важными каналами трансформации энергии.

5. Заключение. Спутники MMS позволили обнаружить сильные (>10 мВ/м) ЭУВ, наблюдаемые в ЦПС вдали от области первичного пересоединения и его сепаратрис во время распространения БПП. Наблюдаемые характеристики ЭУВ в ЦПС близки с теми, которые наблюдались в присепаратрисном слое первичного пересоединения. Показано, что такие ЭУВ связаны с интенсивными (>25 нА/м^2) продольными ЭТС, генерируемыми ускоренными продольными электронными пучками. Мы предполагаем, что ЭУВ в ЦПС маркируют сепаратрисы вторичных микропересоединений, спонтанно возникающих внутри БПП.

ЭУВ могут служить каналом передачи энергии от сверхтепловой популяции электронных пучков к более холодным электронам. В горячей космической плазме, где практически отсутствуют кулоновские столкновения частиц, этот канал представляет собой важный механизм энергообмена между различными популяциями.

Общее представление о генерации ЭУВ в ЦПС и их роли в динамике электронной компоненты плазмы может быть следующим: первичное магнитное пересоединение (происходящее вдали от места наблюдений) приводит к мощному ускорению ионов, формирующих БПП, которые переносят магнитные острова на большие расстояния от области ускорения. В процессе транспортировки магнитные острова могут испытывать быструю эволюцию, а связанные с ними индукционные электрические поля могут ускорять электронные пучки в ЦПС. Ускоренные до больших скоростей продольные электронные пучки, наблюдаемые как интенсивные ЭТС, в свою очередь генерируют солитонные структуры, приводящие к энергообмену между различными электронными популяциями. Наблюдение всех этапов этого сложного многоступенчатого процесса практически невозможно. Поэтому можно предположить и последовательную цепочку (каскад) микропересоединений. Тем не менее, спутники MMS впервые позволили наблюдать диссипацию энергии на электронных кинетических масштабах, в частности ЭТС, связанные с ускоренными электронными пучками, и генерацию ЭУВ, сопровождаемую энерговыделением высокой объемной мощности, которое должно оказывать влияние как на сам пучок, так и на окружающую плазму.

Авторы выражают признательность специалистам NASA за возможность работы с уникальными данными спутниковой системы MMS.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств Российского научного фонда (грант # 23-12-00031).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

---

1. J. S. Pickett, Journal of Geophysical Research: Space Physics **126**(9), e2021JA029548 (2021).
2. C. Cattell, J. Crumley, J. Dombeck, J. Wygant, and F. S. Mozer, Geophys. Res. Lett. **29**(5), 9–1 (2002).
3. D. B. Graham, Y. V. Khotyaintsev, A. Vaivads, and M. André, Journal of Geophysical Research: Space Physics **121**(4), 3069 (2016).
4. R. E. Ergun, J. C. Holmes, K. A. Goodrich et al. (Collaboration), Geophys. Res. Lett. **43**(11), 5626 (2016).
5. R. E. Ergun, C. W. Carlson, J. P. McFadden et al., (Collaboration), Geophys. Res. Lett. **25**(12), 2025 (1998).
6. R. E. Ergun, C. W. Carlson, J. P. McFadden et al. (Collaboration), Geophys. Res. Lett. **25**(12), 2041 (1998).
7. F. S. Mozer, O. V. Agapitov, A. Artemyev, J. F. Drake, V. Krasnoselskikh, S. Lejosne, and I. Vasko, Geophys. Res. Lett. **42**(10), 3627 (2015).
8. J. S. Pickett, L.-J. Chen, S. W. Kahler et al. (Collaboration), Nonlinear Process. Geophys. **12**(2), 181 (2005).
9. J. C. Holmes, R. E. Ergun, D. L. Newman, F. D. Wilder, A. P. Sturner, K. A. Goodrich, R. B. Torbert, B. L. Giles, R. J. Strangeway, and J. L. Burch, Journal of Geophysical Research: Space Physics **123**(1), 132 (2018).
10. A. Mangeney, C. Salem, C. Lacombe, J.-L. Bougeret, C. Perche, R. Manning, P. J. Kellogg, K. Goetz, S. J. Monson, and J.-M. Bosqued, Ann. Geophys. **17**(3), 307 (1999).
11. D. M. Malaspina, D. L. Newman, L. B. Willson III, K. Goetz, P. J. Kellogg, and K. Kerstin, Journal of Geophysical Research: Space Physics **118**(2), 591 (2013).
12. Y. Omura, H. Kojima, N. Miki, and H. Matsumoto Adv. Space Res. **24**(1), 55 (1999).
13. T. E. Eastman, L. A. Frank, W. K. Peterson, and W. Lennartsson, Journal of Geophysical Research: Space Physics **89**(A3), 1553 (1984).
14. G. S. Lakhina, S. V. Singh, A. P. Kakad, and J. S. Pickett, Journal of Geophysical Research: Space Physics **116**(A10), 1 (2011).
15. D. B. Graham, Y. V. Khotyaintsev, A. Vaivads, C. Norgren, M. André, J. M. Webster, J. L. Burch, P.-A. Lindqvist, R. E. Ergun, R. B. Torbert, W. R. Paterson, D. J. Gershman, B. L. Giles, W. Magnes, and C. T. Russell, Phys. Rev. Lett. **119**, 025101 (2017).
16. G. Lakhina, S. Singh, and R. Rubia, Adv. Space Res. **68**(4), 1864 (2021).
17. S. Li, S. Zhang, H. Cai, and S. Yu, Earth, Planets and Space **66**, 1 (2014).
18. H. Matsumoto, H. Kojima, T. Miyatake, Y. Omura, M. Okada, I. Nagano, and M. Tsutsui, Geophys. Res. Lett. **21**(25), 2915 (1994).
19. Y. Omura, H. Kojima, N. Miki, T. Mukai, H. Matsumoto, and R. Anderson, Journal of Geophysical Research: Space Physics **104**(A7), 14627 (1999).
20. R. E. Ergun, K. A. Goodrich, J. E. Stawarz, L. Andersson, and V. Angelopoulos, Journal of Geophysical Research: Space Physics **120**(3), 1832 (2015).
21. D. L. Newman, M. V. Goldman, R. E. Ergun, and A. Mangeney, Phys. Rev. Lett. **87**, 255001 (2001).
22. Z. Yuan, Y. Dong, S. Huang, Z. Xue, and X. Yu, Geophys. Res. Lett. **49**(13), e2022GL099483 (2022).
23. C. S. Dillard, I. Y. Vasko, F. S. Mozer, O. V. Agapitov, and J. W. Bonnell, Phys. Plasmas **25**, 022905 (2018).
24. Y. V. Khotyaintsev, A. Vaivads, M. André, M. Fujimoto, A. Retinò, and C. J. Owen, Phys. Rev. Lett. **105**, 165002 (2010).
25. H. S. Fu, F. Chen, Z. Z. Chen, Y. Xu, Z. Wang, Y. Y. Liu, C. M. Liu, Y. V. Khotyaintsev, R. E. Ergun, B. L. Giles, and J. L. Burch, Phys. Rev. Lett. **124**, 095101 (2020).
26. C. Chang, K. Huang, Q. Lu, S. Lu, X. Yu, R. Wang, L. Sang, and X. Gao, Astrophys. J. **933**, 67 (2022).
27. V. Angelopoulos, W. Baumjohann, C. F. Kennel, F. V. Coroniti, M. G. Kivelson, R. Pellat, R. J. Walker,

H. Lühr, and G. Paschmann, Journal of Geophysical Research: Space Physics **97**(A4), 4027 (1992).

28. J.E. Borovsky, R.C. Elphic, H.O. Funsten, and M.F. Thomsen, Journal of Plasma Physics **57**(1), 1 (1997).
29. J.E. Borovsky and H.O. Funsten, Journal of Geophysical Research: Space Physics **108**(A7), 9–1 (2003).
30. R.E. Ergun, K.A. Goodrich, F.D. Wilder et al. (Collaboration), Geophys. Res. Lett. **45**(8), 3338 (2018).
31. H.S. Fu, Y. Xu, A. Vaivads, and Y.V. Khotyaintsev, The Astrophysical Journal Letters **870**, L22 (2019).
32. E.E. Grigorenko, M.V. Leonenko, A.Y. Malykhin, L.M. Zelenyi, and H.S. Fu, Journal of Geophysical Research: Space Physics **129**(6), e2023JA032318 (2024).
33. E. Grigorenko, M. Leonenko, A.Y. Malykhin, L. Zelenyi, and H. Fu, Cosm. Res. **62**(6), 574 (2024).
34. M.V. Leonenko, E.E. Grigorenko, and L.M. Zelenyi, Atmosphere **14**(4), 1 (2023).
35. O.O. Tsareva, M.V. Leonenko, E.E. Grigorenko, H.V. Malova, V.Y. Popov, and L.M. Zelenyi, Geophys. Res. Lett. **51**(8), e2023GL106867 (2024).
36. R. Fermo, J. Drake, and M. Swisdak, Phys. Rev. Lett. **108**(25), 255005 (2012).
37. Y. Yi, M. Zhou, L. Song, Y. Pang, and X. Deng, Geophys. Res. Lett. **49**(6), e2022GL098124 (2022).
38. S.Y. Huang, M. Zhou, Z.G. Yuan, H.S. Fu, J.S. He, F. Sahraoui, N. Aunai, X.H. Deng, S. Fu, Y. Pang, and D.D. Wang, Journal of Geophysical Research: Space Physics **120**(8), 6188 (2015).
39. H.S. Fu, A. Vaivads, Y.V. Khotyaintsev, M. André, J.B. Cao, V. Olshevsky, J.P. Eastwood, and A. Retinò, Geophys. Res. Lett. **44**(1), 37 (2017).
40. R. Torbert, C. Russell, W. Magnes et al. (Collaboration), Space Sci. Rev. **199**, 105 (2016).
41. C. Pollock, T. Moore, A. Jacques et al. (Collaboration), Space Sci. Rev. **199**, 331 (2016).
42. X. Li, R. Wang, Q. Lu, C.T. Russell, S. Lu, I.J. Cohen, R. Ergun, and S. Wang, Nat. Commun. **13**(1), 3241 (2022).
43. C.X. Du, Z. Wang, H.S. Fu, W.D. Fu, J.B. Cao, E. Grigorenko, and Y. Yu, Geophys. Res. Lett. **51**(16), e2024GL110017 (2024).
44. Z.H. Yao, I.J. Rae, R.L. Guo, A.N. Fazakerley, C.J. Owen, R. Nakamura, W. Baumjohann, C.E.J. Watt, K.J. Hwang, B.L. Giles, C. Russell, R.B. Torbert, A. Varsani, H.S. Fu, Q.Q. Shi, and X.-J. Zhang, Journal of Geophysical Research: Space Physics **122**(4), 4335 (2017).
45. C.X. Du, H.S. Fu, J.B. Cao, E. Grigorenko, Z.Z. Chen, Z. Wang, Z.Z. Guo, Z.Y. Xu, and W.D. Fu, Geophys. Res. Lett. **52**(6), e2024GL114392 (2025).
46. S.Y. Huang, K. Jiang, Z.G. Yuan, M. Zhou, F. Sahraoui, H.S. Fu, X.H. Deng, Y.V. Khotyaintsev, X.D. Yu, L.H. He, D. Deng, C.J. Pollock, R.B. Torbert, and J.L. Burch, Geophys. Res. Lett. **46**(2), 580 (2019).
47. X. Li, R. Wang, C. Huang, Q. Lu, S. Lu, J. Burch, and S. Wang, Astrophys. J. **936**(1), 34 (2022).
48. M.V. Leonenko, E.E. Grigorenko, L.M. Zelenyi, H.V. Malova, A.Y. Malykhin, V.Y. Popov, and J. Büchner, Journal of Geophysical Research: Space Physics **126**(11), e2021JA029641 (2021).
49. P. Robert, M.W. Dunlop, A. Roux, and G. Chanteur. ISSI Scientific Report SR-001, Bern, Switzerland (1998).
50. C.C. Harvey, ISSI Scientific Report SR-001, Bern, Switzerland (1998).
51. J. Büchner and L.M. Zelenyi, Journal of Geophysical Research: Space Physics **94**(A9), 11821 (1989).
52. A. Kakad, B. Kakad, C. Anekallu, G. Lakhina, Y. Omura, and A. Fazakerley, Journal of Geophysical Research: Space Physics **121**(5), 4452 (2016).
53. R. Wang, I.Y. Vasko, A.V. Artemyev, L.C. Holley, S.R. Kamaletdinov, A. Lotekar, and F.S. Mozer, Geophys. Res. Lett. **49**(8), e2022GL097919 (2022).
54. R. Nakamura, V.A. Sergeev, W. Baumjohann et al. (Collaboration), Geophys. Res. Lett. **43**(10), 4841 (2016).
55. T.G. Forbes, E.W. Hones, S.J. Bame, J.R. Asbridge, G. Paschmann, N. Sckopke, and C.T. Russell, Geophys. Res. Lett. **8**(30, 261 (1981).
56. E. Grigorenko, L. Zelenyi, M. Dolgonosov, A. Artemiev, C. Owen, J.-A. Sauvaud, M. Hoshino, and M. Hirai, Space Sci. Rev. **164**, 133 (2011).
57. C.X. Du, H.S. Fu, J.B. Cao, Z. Wang, E. Grigorenko, and W.D. Fu, Geophys. Res. Lett. **51**(20), e2024GL112003 (2024).