УДК 533.95 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-166

СВЕРХТОНКИЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ В НИХ НА ФАЗЕ НАКОПЛЕНИЯ СУББУРИ ПО ДАННЫМ МИССИИ MMS

М.В. Леоненко, Е.Е. Григоренко, Л.М. Зелёный

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия,
makarleonen@gmail.com

SUPERTHIN CURRENT SHEETS IN THE EARTH'S MAGNETOTAIL AND ASSOCIATED ENERGY DISSIPATION DURING THE GROWTH PHASE OF SUBSTORM OBSERVED BY MMS SPACECRAFT

M.V. Leonenko, E.E. Grigorenko, L.M. Zelenyi

Space research institute of RAS, Moscow, Russia,
makarleonen@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследуется профиль плотности тока в Токовом Слое геомагнитного хвоста во время распространения быстрых плазменных потоков. Показано присутствие вложенных Сверхтонких Токовых Слоев (СТС) с плотностью тока до 100 нА/м^2. Ток в этих структурах преимущественно переносится сверхтепловой размагниченной популяцией электронов. Типичная полутолщина составляет порядка нескольких гирорадиусов тепловых электронов. СТС часто наблюдаются внутри вытянутых вдоль радиального направления хвоста магнитных островов. Показано, что эволюция таких островов происходит вследствие развития тиринг неустойчивости, что также приводит к ускорению электронных пучков. Ускоренные электронные пучки создают продольные токи в Пламенном Слое, в которых, в результате развития неустойчивостей, генерируются сильные электрические поля и происходит значительная диссипация энергии.

Ключевые слова: магнитосфера, геомагнитный хвост, токовый слой, диссипация энергии.

Abstract. This paper studies the current profile in the Current Sheet during the propagation of bursty bulk flows. The presence of superthin current sheets (STCSs) with current densities up to 100 nA/m^2 is shown. The current in such structures is predominantly carried by the suprathermal demagnetized electron population. The typical half-thickness is of the order of a few gyroradiuses of thermal electrons. STCSs are often nested inside magnetic islands elongated along the radial magnetotail direction. It is shown that the evolution of such islands occurs due to the development of tearing instability, which also leads to the acceleration of electron beams. Accelerated electron beams generate field-aligned currents in the Plasma Sheet, in which the strong electric fields could be generated as a result of instabilities. These electric fields cause significant energy dissipation in the STCSs.

Keywords: magnetosphere, magnetotail, current sheet, energy dissipation

ВВЕДЕНИЕ

Эволюция тонких токовых слоев (ТТС) [Baunjohann et al., 2007] играет важную роль в процессах преобразования энергии в геомагнитном хвосте Земли [Angelopoulos et al., 2008; Lui et al., 2008]. Многоспутниковые миссии Cluster и THEMIS показали, что структура поперечного токового слоя (ТС) часто значительно отличается от простейшей модели Харриса [Harris, 1962]. Оказалось, что интенсивный и тонкий ТС вложен в более широкий ТС с меньшей плотностью тока [Petrucovich et al., 2011]. Внутренний слой имеет типичную полутолщину $L < \rho_P$, где ρ_P — гирорадиус протонов [Artemyev et al., 2013].

Считается, что ТТС может являться источником свободной энергии для развития плазменных неустойчивостей и магнитного пересоединения [Asano et al., 2004] благодаря метастабильности ТТС [Zelenyi et al., 2010]. Пространственный размер ТТС критически влияет на динамику частиц в нем и количество запасаемой свободной энергии. Это делает крайне важным определение полутолщины ТС. В работе [Zelenyi et al., 2020] была предложена новая аналитическая модель многомасштабного ТТС со сверхтонким токовым слоем (СТС), вложенным в него. Модель также предоставляет универсальную оценку толщины вложенного СТС в зависимости от плазменных характеристик в ТТС. Современные данные миссии MMS позволяют наблюдать СТС благодаря данным магнитного поля высокого временного разрешения [Wang et al., 2018].

В данной работе представлен анализ множественных интенсивных токовых структур, которые наблюдались в плазменном слое (ПС) 6 июля 2017 г. с 15:24 по 16:05 UT. Данный интервал соответствует фазе накопления суббури. В ПС хвоста в это время наблюдалась активная X-линия, движущаяся в хвост. Вследствие этого спутники MMS наблюдали быстрые плазменные потоки (БПП), движущиеся из области магнитного пересоединения со множеством магнитных островов и вложенных интенсивных токовых структур [Leonenko et al., 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Благодаря сильному флэппингу ПС, связанному с распространением БПП со скорость до ~ 1300 км/с, стало возможно наблюдение более 100 пересечений нейтральной плоскости ТС спутниками MMS. На рис. 1 представлен обзор исследуемого интервала по данным спутника MMS-1. Из поведения AL-индекса следует, что интервал соответствует фазе накопления суббури (см. рис. 1f). Начиная с 15:30 UT AL-индекс начинает падать и достигает ~-450 нТл к 16:45 UT.

Сильный флэппинг ТС выражается в осцилляциях B_X-компоненты магнитного поля с амплитудой до 20 нТл (см. рис. 1a). Наблюдается смена направления распространения БПП с движения в хвост на движение к Земле (см. рис. 1b). Это свидетельствует о перемещении X-линии в хвост [Runov et al., 2003].

В ПС спутники MMS наблюдали 95 СТС с амплитудой тока >20 нА/м^2 [Leonenko et al., 2021]. Полутолщина СТС составила порядка ~ (1–5) ρ_e, где ρ_e — гирорадиус тепловых электронов. В каждом СТС был определен параметр адиабатичности электронов κ_e [Buchner & Zelenyi, 1989]. Обнаружено, что во многих СТС параметр $\kappa_e < 1$, что свидетельствует о наличии размагниченности тепловой и сверхтепловой популяций электронов.

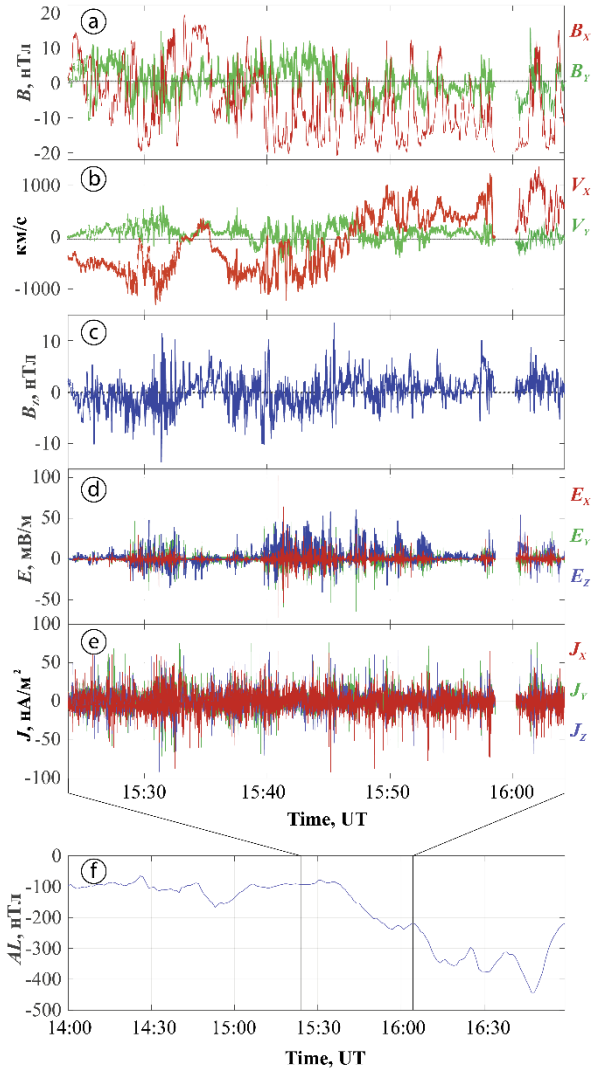

Рис. 1. Обзор данных MMS-1 во время интенсивного флеппинга ТС и распространения БПП 6 июля 2017 г. Сверху вниз: X- и Y-компоненты магнитного поля (a); X- и Y-компоненты потоковой скорости ионов (b); Bz-компонента магнитного поля (c); три компоненты электрического поля (d) и плотности электрического тока (e); AL-индекс (f). Рисунок адаптирован из работы [Leonenko et al., 2021]

Оказалось, что именно размагниченная сверхтепловая популяция электронов часто переносит ток в СТС [Leonenko et al., 2021]. Таким образом динамика токонесущей популяции электронов аналогична динамике ионов в ТТС. В работе [Leonenko et al., 2021] показано, что баланс натяжения силовых линий в СТС поддерживается пространственными градиентами тензора давления размагниченной токонесущей популяции электронов, аналогично моделям ТТС [Ashour-Abdalla et al., 1994].

На рис. 1c показано поведение B_Z-компоненты магнитного поля: наблюдаются ее множественные биполярные вариации с амплитудой до 10 нТл. Биполярная вариация B_Z свидетельствует о перемещении магнитного острова мимо спутников MMS. Такие магнитные острова могут быть результатом развития электронной тиринг неустойчивости [Tsareva et al., 2024].

В работе [Tsareva et al., 2024] показано, что в присутствии значительной размагниченной популяции электронов возможно развитие быстрой электронной тиринг моды, несмотря на присутствие стабилизирующей нормальной к слою B_Z-компоненты магнитного поля. Признаки развития которой наблюдались спутниками MMS вблизи нейтральной плоскости ТС с 16:01:21 UT по 16:01:32 UT. В течение данного интервала наблюдалась биполярная вариация B_Z-компоненты магнитного поля с амплитудой до ~ 5 нТл. Было обнаружено утоньшение и усиление СТС, вложенного в магнитный остров, примерно в 1.8 раз. Показано, что характерное время развития неустойчивости согласно экспериментальным наблюдениям составило ~ 4.5 с, что хорошо согласуется с теоретической оценкой — ~ 4.7 с.

Во внешнем ПС спутники MMS наблюдали продольные ускоренные электронные пучки и связанные с ними интенсивные токовые структуры [Leonenko et al., 2023]. Такие пучки могут являться результатом ускорения частиц вследствие развития электронной тиринг моды и «вторичного» магнитного пересоединения вблизи нейтральной плоскости. В токовых структурах наблюдалась интенсивная диссипация энергии до 2500 пВт/м^3, что по порядку величины сопоставимо с энерговыделением в электронной диффузионной области пересоединения [Li et al., 2022]. Статистические исследования десятков интервалов распространения ББП в ПС показали, что интенсивные токовые структуры, генерируемые ускоренными продольными пучками электронов, могут наблюдаться всюду в ПС [Grigorenko et al., 2024].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения MMS показали, что на фазе начала суббури в ПС ближнего хвоста наблюдалась активная X-линия и ускоренные в ней БПП, которые, распространяясь в ПС стали источником энергии для развития турбулентности в нем [Ergun et al, 2018]. Турбулентное электромагнитное поле, в свою очередь, стало источником ускорения продольных электронных пучков. Еще одним источником ускорения продольных электронных пучков, по-видимому, являются динамические магнитные острова, в результате трансформации которых, генерируются индукционные электрические поля, способствующие

ускорению электронов пучков [Tsareva et al, 2024]. Такие электронные пучки с энергиями ~ (2–7) кэВ приводят к образованию новых токовых структур, которые наблюдаются всюду в ПС [Grigorenko et al, 2024]. Их распространение в ПС приводит к развитию различных неустойчивостей, что выражается в наблюдении экстремальной мощности энерговыделения (j,E') до 2500 пВт/м^3 (данная величина сопоставима с наблюдаемыми в электронной диффузионной области значениями [Li et al, 2022]). Таким образом, спутниковые наблюдения MMS позволили впервые наблюдать механизм передачи энергии от больших масштабов на электронные кинетические масштабы и диссипацию энергии на электронных масштабах в бесстолкновительной турбулентной плазме геомагнитного хвоста. Спорадическое ускорение электронных пучков, формирование СТС и последующую диссипацию энергии в них, происходящие во всему ПС можно сравнить с микровспышками (мелкомасштабными магнитными пересоединениями) в солнечной короне, которые рассматриваются как один из источников нагрева корональной плазмы [Raouafi et al, 2022].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Artemyev A.V., Petrukovich A.A., Frank A.G. et al. Intense current sheets in the magnetotail: Peculiarities of electron physics // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. V. 118, iss. 6. P. 2789–2799.

Asano Y., Mukai T., Hoshino M. et al. Statistical study of thin current sheet evolution around substorm onset // J. Geophys. Res: Space Phys. 2004. V. 109, iss. A5.

Ashour-Abdalla M., Zelenyi L.M., Peroomian V., Richard R.L. Consequences of magnetotail ion dynamics // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1994. V. 99, iss. A8. P. 14891–14916.

Baumjohann W., Roux A., Le Contel O. et al. Dynamics of thin current sheets: Cluster observations // Annales Geophys. 2007. V. 25, iss. 6. P. 1365–1389.

Büchner J., Zelenyi L.M. Regular and chaotic charged particle motion in magnetotaillike field reversals: 1. Basic theory of trapped motion // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1989. V. 94, iss. A9. P. 11821–11842.

Ergun R.E., Goodrich K.A., Wilder F.D. et al. Magnetic reconnection, turbulence, and particle acceleration: Observations in the Earth's magnetotail // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45, iss. 8. P. 3338–3347.

Grigorenko E.E., Leonenko M.V., Malykhin A.Y. et al. Intense electric currents and energy conversion observed at electron scales in the plasma sheet during propagation of high-speed ion bulk flows // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2024. V. 129, iss. 6. P. e2023JA032318.

Harris E.G. On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field // Il Nuovo Cimento.1962. V. 23. P. 115–121.

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. Geophys. Res.: Space Phys. 2021. V. 126, iss. 11. P. e2021JA029641.

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. P. 722.

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. P. 3241.

Lui A.T.Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets // Space Sci. Rev. 2004. V. 113, iss. 1. P. 127–206.

Lui A.T.Y. et al. Near-Earth substorm features from multiple satellite observations // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2008. V. 113, iss. A7.

Petrukovich A.A., Artemyev A.V., Malova H.V. et al. Embedded current sheets in the Earth's magnetotail // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2011. V. 116, iss. A5.

Raouafi N.E., Stenborg G., Seaton D.B. et al. Magnetic reconnection as the driver of the solar wind // Astrophys. J. 2023. V. 945, iss. 1. P. 28.

Runov A., Nakamura R., Baumjohann W. et al. Current sheet structure near magnetic X-line observed by Cluster // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, iss. 11. P. 1579.

Tsareva O.O., Leonenko M.V., Grigorenko E.E. et al. Fast tearing mode driven by demagnetized electrons // Geophys. Res. Lett. 2024. V. 51, iss. 8. P. e2023GL106867.

Wang R., Lu Q., Nakamura R. et al. An electron-scale current sheet without bursty reconnection signatures observed in the near-Earth tail // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45, iss. 10. P. 4542–4549.

Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Artemyev A.V. et al. Metastability of current sheets // Physics-Uspekhi. 2010. V. 53, iss. 9. P. 933–941.

Zelenyi L.M., Malova H.V., Grigorenko E.E. et al. Universal scaling of thin current sheets // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47, iss. 14. P. e2020GL088422.