Аннотация к циклу работ

1. **Авторы:** Леоненко М.В., Царева О.О, Петровский И.Д.
2. **Название:** Динамика электронных токовых слоев и каскадное ускорение электронов
3. **Ссылки на публикации:**
   - Leonenko, M. V., Grigorenko, E. E., Zelenyi, L. M., & Fu, H. S. (2026). Quasi-stationary electron-scale current sheet with very strong electrostatic field: Self-consistent structure and electron acceleration. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 131, e2025JA034895. https://doi.org/10.1029/2025JA034895
   - Grigorenko, E. E., Du, C., Leonenko, M. V., Fu, H., & Zelenyi, L. M. (2026). Multistep electron acceleration in multiple dynamic electron-scale current sheets. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 131, e2025JA034891. https://doi.org/10.1029/2025JA034891
   - Tsareva, O. O., Leonenko, M. V., Grigorenko, E. E., Malova, H. V., Popov, V. Yu., & Zelenyi, L. M. (2025). Nonlinear structure of super-thin current sheets with guide field: Equilibrium or dynamic? Journal of Geophysical Research: Space Physics, 130, e2025JA034238. https://doi.org/10.1029/2025JA034238
   - Петровский И.Д., Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зеленый Л.М. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОВЫХ СТРУКТУР И ПОЛЕЙ, НАБЛЮДАЕМЫХ СПУТНИКАМИ MMS В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА ВО ВРЕМЯ СПОКОЙНЫХ И ВОЗМУЩЕННЫХ ПЕРИОДОВ // Космические исследования. - 2026. - Т. 64. - №1. - С. 34–46. doi: 10.7868/S3034550226010043
4. **Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность:**

Один из ключевых нерешенных вопросов в физике бесстолкновительной плазмы связан с механизмами передачи энергии от макроскопических плазменных потоков к электронным кинетическим масштабам и её последующей диссипацией. В хвосте магнитосферы Земли одним из ключевых каналов переноса энергии на макромасштабах являются быстрые плазменные потоки (БПП/BBF). Данные высокого разрешения миссии MMS показали, что распространение БПП сопровождается образованием множественных электронных токовых слоев (ЭТС/ECS) на электронных кинетических масштабах.

Большинство ЭТС наблюдаются в присутствие сильного ведущего магнитного поля и переносятся сверхтепловыми пучками электронов. Ориентация и места наблюдения таких слоев свидетельствует о том, что поддерживающие ЭТС пучки электронов могут ускоряться локально во время распространения БПП, а не только в области магнитного пересоединения. Открытым остается вопрос о дальнейшей судьбе наблюдаемых ЭТС: являются ли они стационарными или эволюционируют, способны ли они сами ускорять новые пучки электронов, которые будут образовывать новые ЭТС?

5. **Конкретная решаемая в работе задача и ее значение:**

В цикле работ решались следующие 3 взаимосвязанные задачи:

- По наблюдениям MMS определить, действительно ли интенсивные ЭТС наблюдаются только во время распространения БПП, либо же их генерация возможна и в спокойные периоды [1].
- По наблюдениям MMS выявить признаки и механизмы эволюции ЭТС, формируемых во время распространения БПП. Определить, возможно ли дополнительное ускорение сверхтепловых электронных пучков внутри таких ЭТС, которые впоследствии поддерживают новые ЭТС [2].
- Обобщить самосогласованную кинетическую модель сверхтонкого токового слоя на случай ненулевого ведущего поля и, сравнив ее со статистикой наблюдений MMS, определить, являются ли наблюдаемые ЭТС равновесными или динамическими структурами.

6. **Используемый подход, его новизна и оригинальность:**

Экспериментальная часть работы основана на анализе четырехспутниковых данных высокого временного разрешения миссии MMS. Анализ магнитной структуры включает в себя различные методы расчета градиентов магнитного поля, а также метод реконструкции топологии магнитных силовых линий. Важной составляющей работы является анализ наблюдаемых функций

распределения электронов. В ходе работ были предложены новые подходы выделения токонесущей популяции электронов и расчета ее агиротропии.
Теоретическая часть работы включает в себя учет квазиадиабатических и замагниченных популяций электронов. Впервые была построена модель сверхтонкого токового слоя с квазиадиабатическими электронами с учетом ведущего магнитного поля.

7. Полученные результаты и их значимость:

[1] Впервые была собрана большая статистика наблюдений плазменного слоя в активные (во время распространения БПП) и в спокойные периоды. Показано, что ЭТС почти не наблюдаются в спокойные периоды: вероятность наблюдения интенсивного тока >30 нА/м^2 в спокойные периоды составляет порядка ~0.2%, тогда как в активные периоды эта вероятность достигает 7%.
[2] Впервые был показан возможный сценарий эволюции продольного ЭТС: утоньшение токового слоя приводит к формированию электрического поля в слое. Индукционное электрическое поле, связанное с эволюцией слоя, может приводить к доускорению электронов на ~1кэВ. Результирующее электрическое поле приводит к повороту тока и превращению слоя из продольного в перпендикулярный к магнитному полю за счет дрейфа ExB. Рост поперечного тока может приводить к генерации нового индукционного поля, которое, в свою очередь, ускоряет новые электроны вдоль магнитного поля. Таким образом, процесс может носить каскадный характер. В работе был предложен новый термин Cascading Electron Current Sheets (CECSs) для описания подобных динамических ЭТС.
Также впервые была исследована структура квазистационарного ЭТС в горячем плазменном слое (температура электронов ~5 кэВ) в присутствие ведущего поля. Было показано, что центральный продольный ток переносится сверхтепловым пучком электронов. На краях слоя формируются поперечные токи сравнимой амплитуды, обусловленные в равной степени дрейфом электронов в амбиполярном электрическом поле слоя и диамагнитным дрейфом электронов, тогда как вклад дрейфов кривизны пренебрежимо мал в силу недостаточной анизотропии электронов. Амбиполярное поле в таком слое описывается холловским и диамагнитным членами закона Ома. На краях слоя были обнаружены признаки присутствия размагниченных электронов, проявляющиеся в виде агиротропии функции распределения. Их ускорение спайсеровским механизмом при движении из слоя способно давать прирост энергии до 6-8 кэВ, что согласуется с наблюдаемыми вне слоя ускоренными пучками электронов с энергией, превышающей энергию токонесущего пучка на 5-10 кэВ. Таким образом, предложен и обнаружен механизм, отвечающий за ускорение сверхтепловых электронных пучков генерируемых ЭТС по время распространения БПП. Важно отметить, что направление движения токонесущих пучков в исследуемых ЭТС явно указывает на то, что эти пучки не были ускорены в области первичного магнитного пересоединения, ответственного за распространение БПП.
[3] В модели сверхтонкого слоя с ведущим магнитным полем показано, что с ростом ведущего поля доля размагниченных электронов резко падает, приводя к ослаблению и утолщению токового слоя. Сравнение результатов модели с наблюдениями миссии MMS показывает важное различие: наблюдаемые слои могут оставаться интенсивными и тонкими даже при сильном ведущем поле. Такие слои сопровождаются сильными электрическими полями, величина которых может достигать значений, типичных для быстрого магнитного пересоединения. Исходя из полученных результатов, в работе был сделан вывод, что интенсивные продольные ЭТС являются принципиально динамическими структурами, в которых электрические поля поддерживают их структуру и ускоряют новые электронные пучки, приводя к каскаду генерации ЭТС во время распространения БПП.