УДК 533.95
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-465
ORCID: 0000-0002-4100-6498

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО СВЕРХТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ В БЛИЖНЕЙ ЧАСТИ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

П.В. Сецко[1], О.В. Мингалев[1], М.Н. Мельник[1], Х.В. Малова [2,3], Е.Е. Григоренко [2], Л.М. Зелёный[2]

[1]Полярный Геофизический институт, Апатиты, Россия,
setsko@pgia.ru
[2]Институт Космический Исследований, Москва, Россия
[3]Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Россия

SIMULATION OF AN ELECTRON SUPER-THIN CURRENT SHEET OF THE NEAR-EARTH MAGNETOTAIL

Setsko P.V. [1], Mingalev O.V. [1], Melnik M.N. [1], Malova H.V.[2,3], Grigorenko E.E.[2], Zelenyi L.M.[2]

[1]Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia, setsko@pgia.ru
[2]Space Research Institute, Moscow, Russia
[3]Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University

Аннотация. Разработана новая численная модель стационарного токового слоя с заданной нормальной компонентой магнитного поля и с кинетическим описанием образующих слой пролетных популяций ионов и электронов, для которых уравнения Власова решаются методом характеристик и функции распределения рассчитываются на регулярных сетках в пространстве скоростей, причем учитывается реальное отношение заряда к массе для электронов. С помощью этой модели получены плоские симметричные конфигурации сверхтонкого электронного токового слоя, которые качественно и количественно согласуются с наблюдениями космических аппаратов миссии MMS.

Ключевые слова: тонкий токовый слой, бесстолкновительная плазма, уравнения Власова, параллельные вычисления.

Abstract. A new numerical model of a stationary current sheet with a normal magnetic field component has been developed, featuring a kinetic description of the transiting ion and electron populations forming the sheet. For these populations, the Vlasov equations are solved using the method of characteristics, and the distribution functions are calculated on regular velocity-space grids, while the realistic electron charge-to-mass ratio is taken into account. Using this model, 1D symmetric configurations of an ultrathin electron current sheet were obtained that are in qualitative and quantitative agreement with observations from the MMS spacecraft.

Keywords: thin current sheet, collisionless plasma, Vlasov equation, parallel programming.

ВВЕДЕНИЕ

Запуск спутниковой миссии MMS открыл возможность многократного наблюдения сверхтонких токовых слоев (СТС) благодаря наличию на борту датчиков полей и электронных спектрометров с высокой частотой регистрации данных, а также небольшому расстоянию между аппаратами в апогее (порядка нескольких гирорадиусов электронов). Для интерпретации спутниковых данных и определения масштабов таких СТС необходимо проводить численное моделирование. В работе предложена новая версия самосогласованной численной модели стационарного токового слоя (ТС) с заданной нормальной компонентой магнитного поля. ТС в модели состоит из ионного тонкого токового слоя (ТТС) и вложенного в него еще более тонкого электронного ТТС. Новая версия является дальнейшим развитием численной модели ионного ТТС ([Мингалев и др. 2018, 2021, 2022])

В модели учитываются популяции пролетных протонов и пролетных электронов, создаваемые их встречными потоками вдоль силовых линий магнитного поля. Для этих популяций численно решаются методом характеристик стационарные уравнения Власова и функции распределения рассчитываются на ориентированных по локальному магнитному полю регулярных сетках в пространстве скоростей, причем учитывается реальное отношение заряда к массе для электронов, а основной объем вычислений выполняется на GPU. Популяция фоновых электронов описывается точным решением стационарного уравнения Власова в виде функции распределения Максвелла-Больцмана с изотропной температурой и находится в силовом равновесии, что обеспечивает учет электростатических эффектов аналогично тому, как это сделано в аналитических моделях ТТС (см., например, [Зеленый и др. 2011, 2016]).

С помощью новой версии модели получен набор самосогласованных по электронам стационарных конфигураций СТС, в которых профиль плотности тока ионов фиксирован и взят из конфигурации чисто ионного ТТС с изотропными электронами. Полученные самосогласованные стационарные конфигурации электронных СТС качественно и количественно хорошо соответствуют отдельным пикам электронного тока в СТС, наблюдаемым по данным миссии MMS.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера проведенного моделирования рассмотрим влияние вложенного электронного СТС на начальную конфигурацию

протонного ТТС с изотропными электронами. Для начальной конфигурации ТС были взяты следующие вполне типичные значения входных параметров модели. Температура потоков и фона протонов$T_p = T_p^{(+)} = T_{pb} = 4$ кэВ. Параметр скорости продольных потоков протонов имел значение $\delta_p = \frac{V_{Dp}}{V_{Tp}} = 1.5$. Полуширина области контроля фазовых траекторий протонов бралась равной земному радиусу $L = R_E$. Доля концентрации пролетных протонов на краях ТС $\gamma_p = \frac{n_{p,fl}(L)}{n_p(L)} = 0.25$. Шаг пространственной сетки порядка дебаевского расстояния: $\Delta z = h_e = 0.5$ км. Шаг сетки в пространстве скоростей для электронов и для протонов $\Delta v_\alpha = \frac{V_{T\alpha}}{20}$. Значение тангенциальной компоненты величины магнитного поля $B_{x0} = 20$ нТл вне слоя и значение нормальной компоненты $B_z = 0.1 \cdot B_{x0} = 2$нТл. Для вложенного СТС были взяты равные значения концентрации пролетных протонов и электронов на краях ТС: $n_{efl}(L) = n_{pfl}(L)$, $\gamma_e = \gamma_p = 0.25$, а также равный безразмерный параметр скорости продольных потоков: $\delta_e = \frac{V_{De}}{V_{Te}} = 1.5$. Температура потоков и фона электронов $T_e^{(+)} = T_{eb} = 2$.

На рисунке 1 показаны профили концентрации, плотности тока и магнитного поля начальной конфигурации протонного ТТС с изотропными электронами и получившейся конфигурации протонного ТТС с вложенным в него электронным СТС. На профилях плотности тока видно, что в центре протонного ТТС с полушириной примерно $L_p \approx 0.21R_E \approx 1300$км образовался электронный СТС с полушириной около $L_e \approx 0.01R_E \approx 60$км, то есть примерно в 21 раз тоньше ионного ТТС. При этом значение электронного тока в центре СТС составляет примерно $j_{ey}(0) \approx 37.5\frac{\text{нА}^2}{\text{м}}$, что почти в 2 раза больше максимального значения протонного тока $max\, j_{py} \approx 20\frac{\text{нА}^2}{\text{м}}$. Также видно, что на краях ТТС в полосе примерно $0.08R_E \le |z| \le 0.22R_E$ электроны дают небольшой плавный положительный ток, то есть усиливают ток в ТТС на его границе. Относительный вклад электронов в полный ток через ТС, а значит и в изменение магнитного поля через ТС составляет примерно $\frac{\Delta B_{xe}}{(2B_{x0})} \approx 0.18 = 18\%$.

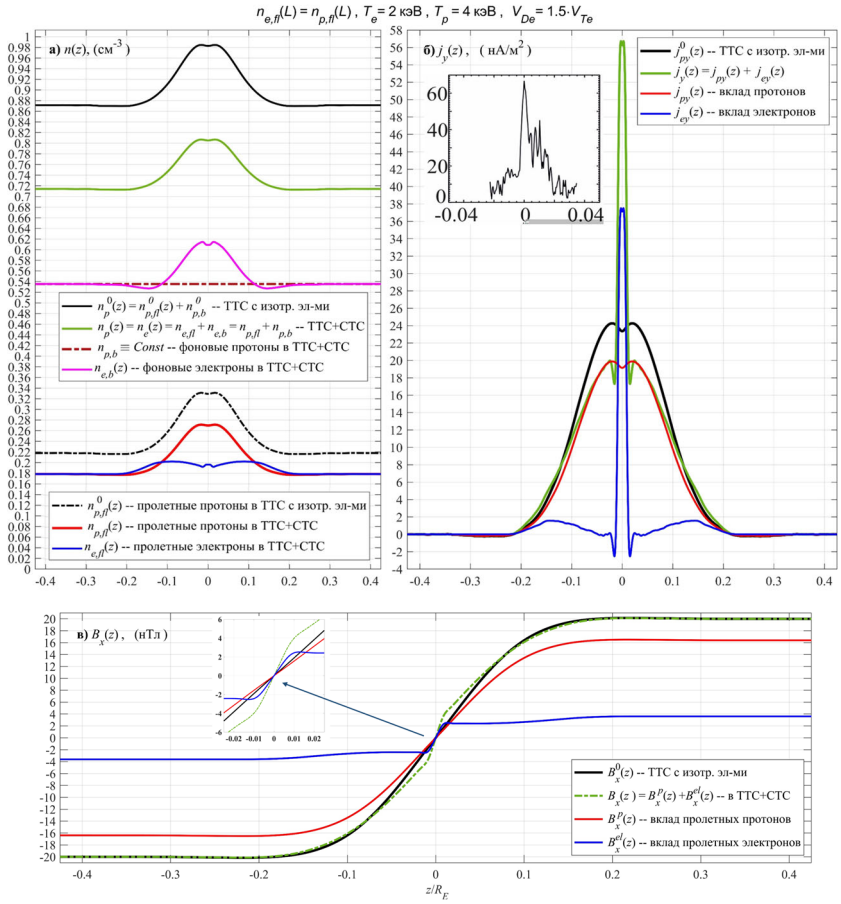

Рис. 1. Стационарные конфигурации в случае протонного ТТС с изотропными электронами (черные линии) и в случае протонного ТТС и вложенного в него СТС (зеленые линии). Панель а) профили концентрации $n(z)$ в см$^{-3}$, панель б) профили плотности тока $j_y(z)$ в нА/м^2, панель в) профили компоненты магнитного поля $B_x(z)$ в нТл.

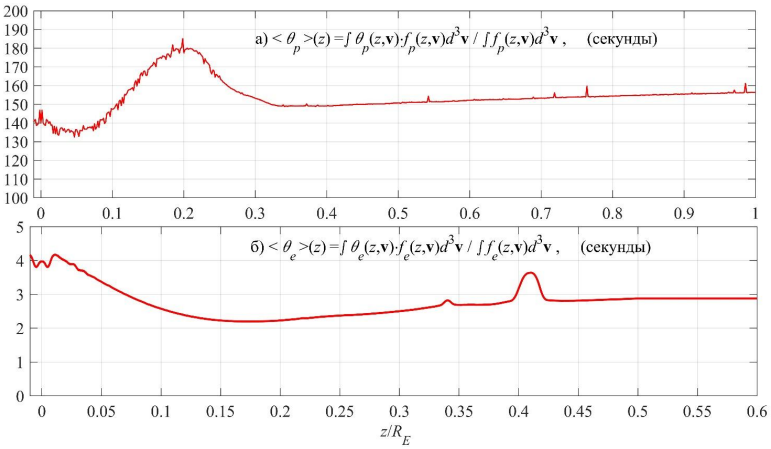

Рис. 2. Среднее время нахождения фазовой траектории выпущенной из z в области контроля (а) пролетных протонов в случае протонного ТТС с изотропными электронами и (б) пролетных электронов в случае наличия СТС

В качестве подтверждения достоверности результатов моделирования внутри панели б рисунка 2 приведен профиль плотности тока электронов $j_e\left(\frac{z}{R_E}\right)$, наблюдаемый в данных спутников MMS 9 июля 2017 г. в 17:37:08.270 – 17:37:09.180 UT вблизи нейтральной плоскости поперечного токового слоя геомагнитного хвоста [Grigorenko et al., 2024]. Видно, что полуширина центрального максимума со значением ~65 нА/м2 составляет примерно $0.005 \cdot R_E \approx 32$ км. Несмотря на то, что в этом профиле также видно несколько локальных максимумов, которые могут быть связаны с измерительным эффектом, наблюдаемые максимальное значение плотности тока и толщина СТС неплохо согласуются с результатами моделирования.

В модели для начального положения $(z, \boldsymbol{v})$ рассчитывается в прошлое фазовая траектория и может быть найдено время нахождения $\theta_\alpha(z, \boldsymbol{v})$ этой фазовой траектории в некоторой области контроля. На рисунке 2 показано среднее время нахождения (в секундах) фазовой траектории в области контроля, выходящей в прошлое из точки z. В случае протонного ТТС с изотропными электронами область контроля $\{|z| \leq 1.5 \cdot R_E\}$ (панель а). В случае протонного ТТС и вложенного в него электронного СТС область контроля $\{|z| \leq 0.625 \cdot R_E\}$ (панель б). Рис. 2 позволяет оценить характерное время формирования протонного ТТС и электронного СТС.

Верхняя панель рис 2. показывает, что для каждой пространственной точки z в ТТС и его окрестности фазовые траектории пролетных протонов, на которых их функция распределения отлична от нуля, находятся в области контроля $\{|z| \leq 1.5 \cdot R_E\}$ в среднем примерно от 2.5 до 3 минут. Также отметим, что максимальное значение функции $\langle\theta_p\rangle(z)$ достигаются примерно в точке $z \approx 0.2 \cdot R_E$ вблизи границы протонного ТТС. Нижняя панель рис. 2 показывает, что для каждой пространственной точки z в ТТС и его окрестности фазовые траектории пролетных электронов, на которых их функция распределения отлична от нуля, находятся в области контроля $\{|z| \leq 0.625 \cdot R_E\}$ в среднем примерно от 2 до 4.5 секунд. Также отметим, что максимальное значение функции $\langle\theta_e\rangle(z)$ достигается примерно в точке $z \approx 0.01 \cdot R_E$ вблизи границы электронного СТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования показал, что протонный ТТС образует эффективную магнитную ловушку для протонов, а центральная область этого ТТС с сильным градиентом B_x является магнитной ловушкой для пролетных электронов, которые в ней размагничиваются и создают узкий пик электронного тока с шириной на порядок меньшей ширины протонного ТТС. Этот пик электронного тока создает в центральной части протонного ТТС узкую зону с еще более резким градиентом B_x, а это, в свою очередь, усиливает в этой области магнитную ловушку для электронов.

Сравнение времени нахождения токонесущих частиц в центре ТС показывает, что пролетные протоны, поддерживающие протонный ТТС, удерживаются в области моделирования в среднем более 130 секунд, в то время как пролетные электроны, поддерживающие электронный СТС, удерживаются в области моделирования в среднем 2-4 секунды. Из этого можно сделать вывод, что формирование электронного СТС как минимум на порядок быстрее протонного ТТС. Учитывая слабое влияние электронного СТС на функцию распределения (не приведена) и профиль плотности тока пролетных протонов в ТТС, в первом приближении, протонный ТТС можно рассматривать независимо от наличия электронного СТС и наоборот, то есть ионы практически «не замечают» электронный СТС, а электроны практически «не замечают» эту слабую реакцию ионов. Это согласуется с открытием в экспериментальных данных иерархического каскада электронных пересоединений на последовательно уменьшающихся масштабах, в ходе которых и рождаются электронные СТС, которые затем распадаются, ускоряют электронные пучки и, в свою очередь, порождают новые электронные СТС [Зеленый и др. 2025].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-12-00031.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зелёный Л.М., Малова Х.В., Артемьев А.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А. Тонкие токовые слои в бесстолкновительной плазме // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 2, стр. 137□182.

Зелёный Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю. Тонкие токовые слои: От работ Гинзбурга–Сыроватского до наших дней // Успехи Физических наук. 2016. т. 186, № 11, С. 1153-1188.

Зелёный Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю., Царева О.О, Леоненко М.В. Тонкие и сверхтонкие токовые слои: путешествие вглубь сингулярности Сыроватского, Успехи Физических Наук Т.195, №8, С. 807-834, 2025, doi: 10.3367/UFNr.2025.03.039950

Мингалев О.В., Малова Х.В., Мингалев И.В., Мельник М.Н., Сецко П.В., Зелёный Л.М. Модель тонкого токового слоя в хвосте магнитосферы Земли с кинетическим описанием замагниченных электронов. // Физика плазмы. 2018. Т. 44, № 10, стр. 769–790.

Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Мерзлый А.М. Силовой баланс в токовых слоях в бесстолкновительной плазме // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 2. С. 3–12. DOI: 10.12737/szf-71202101.

Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Мерзлый А.М., Зеленый Л.М. Роль ионов кислорода в структуре токового слоя ближнего хвоста магнитосферы Земли // Физика плазмы. 2022. Т. 48, № 3, С. 237– 258.

Grigorenko E.E., Leonenko M.V., Malykhin A.Y., Zelenyi L.M., Fu H.S., Intense Electric Currents and Energy Conversion Observed at Electron Scales in the Plasma Sheet During Propagation of High-Speed Ion Bulk Flows // Journal of Geophysical Research, 2024, 129, https://doi.org/10.1029/2023JA032318