

Аннотация к циклу работ

1. Авторы (ИКИ РАН): Зеленый Лев Матвеевич, Царева Ольга Олеговна, Леоненко Макар Владимирович, Григоренко Елена Евгеньевна, Малова Хельми Витальевна, Попов Виктор Юрьевич.

2. Название: Теоретические и экспериментальные исследования сверхтонких токовых слоев в космической плазме

3. Ссылки на публикации:

Zelenyi, L. M., Malova, H. V., Leonenko, M. V., Grigorenko, E. E., & Popov, V. Yu. (2022). Equilibrium configurations of super-thin current sheets in space plasma: Characteristic scaling of multilayer structures. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030881 (17 pp.), <https://doi.org/10.1029/2022JA030881>

Tsareva, O. O., Leonenko, M. V., Grigorenko, E. E., Malova, H. V., Popov, V. Yu., & Zelenyi, L. M. (2023). Nonlinear equilibrium structure of super thin current sheets: Influence of quasi-adiabatic electron population. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2023JA031459. <https://doi.org/10.1029/2023JA031459>

Tsareva, O. O., Leonenko, M. V., Grigorenko, E. E., Malova, H. V., Popov, V. Yu., & Zelenyi, L. M. (2024). Fast tearing mode driven by demagnetized electrons. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106867. <https://doi.org/10.1029/2023GL106867>

4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность:

Сравнительно тонкие токовые слои толщиной в несколько гирорадиусов протонов — ключевые структуры в космической плазме, ответственные за накопление и высвобождение магнитной энергии, запасаемой магнитосферой из солнечного ветра, т. е. за формирование космической погоды на Земле в целом. Измерения, выполненные космическими аппаратами в магнитосфере Земли и солнечном ветре, выявили сложное строение таких тонких структур: в центральной части обычно находится тонкий токовый слой электронного масштаба, вложенный в более широкий протонный слой. В свою очередь, весь токовый слой вложен внутри намного более толстого плазменного слоя. Коллектив сотрудников ИКИ РАН проводит многолетние теоретические исследования тонких токовых структур, поддерживаемых квазиadiaбатическими протонами и замагниченными электронами. Однако новейшие исследования миссии спутников MMS (Multi-Scale Magnetospheric) выявили в хвосте магнитосферы особые сверхтонкие токовые слои (СТС), в которых центральный вложенный слой поддерживается размагниченными электронами (иногда наряду с ними присутствует и замагниченная электронная популяция). Исследование подобных сверхтонких токовых слоев, их структуры и устойчивости является важнейшей и актуальной научной задачей, которая позволит понять и оценить практически не исследованный до сих пор механизм взрывного высвобождения большого количества энергии в столь компактном образовании в космической плазме и, в частности, оценить его роль в протекании глобальных нестационарных процессов в околоземном пространстве.

5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение:

В данной работе были поставлены следующие задачи: (1) На основании недавних наблюдений миссии MMS необходимо было построить теоретическую модель для описания нового класса квазистационарных сверхтонких токовых слоев в космической бесстолкновительной плазме, чьи толщины сопоставимы с электронными гирорадиусами, а динамика как электронов, так и протонов является квазиadiaбатической. Для приближения к реальности была выбрана более общая модель, в которой сосуществовали две электронные популяции, состоящие из полностью замагниченных и размагниченных частиц. (2) Для

сравнения пространственных масштабов двух типов СТС (с полностью замагниченными и размагниченными электронами) была поставлена задача оценки толщины (или скейлинга) вложенного электронного слоя для токового слоя с полностью замагниченными электронами, что представляло существенные теоретические трудности в связи с МГД-описанием движения электронов. (3) После решения задачи о скейлинге была поставлена задача разработки самосогласованной комбинированной модели СТС, детального исследования ее структуры и устойчивости, т. е. возможности возникновения быстрой разрывной моды, сопровождающейся выбросом накопленной энергии, нагревом и ускорением частиц и волновыми возмущениями. (4) Также были поставлены задачи анализа данных спутниковых наблюдений эволюции СТС и сопоставления результатов с теоретическими предсказаниями.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность.

Для решения поставленных задач были разработаны фактически две модели равновесных СТС. В одной модели учитывался самосогласованный электронный ток, поддерживаемый потоком замагниченных частиц. Благодаря упрощающим предположениям удалось получить нелинейное уравнение для электронного тока, отсюда стало возможным оценить его толщину и связать ее с ионными параметрами. Во второй, гибридной модели, движение протонов описывалось в рамках квазиadiaбатического приближения, а электронный ток поддерживался потоками размагниченных и замагниченных электронов. Движение размагниченной популяции описывалось в рамках квазиadiaбатического приближения, в то время как для замагниченной популяции использовалось приближение ведущего центра. Было проведено сравнение структуры токовых слоев с размагниченными и замагниченными электронами, а также исследована устойчивость СТС в рамках линейной теории возмущений. Для оценки вклада размагниченных электронов в развитие разрывной моды использован энергетический принцип. Получены волновые числа и скорости роста разрывной моды для различных параметров равновесной модели СТС. Все использованные подходы для анализа структуры и динамики СТС разработаны авторами, являются новыми и оригинальными.

7. Полученные результаты и их значимость.

Впервые представлена аналитическая самосогласованная модель сверхтонкого токового слоя (СТС), поддерживаемого замагниченными электронами, вложенного внутрь более широкого токового слоя с квазиadiaбатическими протонами как носителями тока. Показано, что структура вложенных электронных СТС может быть описана нелинейным уравнением, позволяющим оценить масштаб толщины сверхтонкого слоя благодаря связи электронного и ионного масштабов, хотя электронная динамика описывается в приближении ведущего центра, и масштаб токового слоя трудно оценить. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с наблюдениями космических аппаратов MMS в хвосте магнитосферы Земли.

Построена и изучена новая кинетическая модель СТС, в которой протоны и электроны размагничены и следуют квазиadiaбатическим траекториям. Показано, что такой токовый слой представляет собой новый класс слоев в космической плазме; в нём возможно развитие электронной разрывной неустойчивости (тиринг-моды), что согласуется с наблюдениями спутников MMS. Показано, что размагниченные электроны способствуют развитию быстрой тиринг-моды на коротких длинах волн, а скорость роста неустойчивости достаточно велика для дестабилизации СТС на временных масштабах в несколько секунд. Наблюдения MMS показывают, что быстрый рост мелкомасштабных магнитных возмущений приводит к прерывистой динамике токового слоя, включая образование магнитных островов или плазмоидов.

Полученные результаты были опубликованы в авторитетных научных журналах, что подчеркивает их значимость и вклад в изучение механизмов формирования и динамики токовых слоев в околоземном пространстве и гелиосфере.