

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ АСТРОФИЗИКА

© 2024 г. А. Г. Франк¹, Н. П. Кирий¹, С. А. Савинов², И. Р. Нугаев^{1,*},
Д. Е. Харлачев¹, В. А. Иванов¹, В. Д. Степахин¹

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

²Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: gfnov@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2023 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята в печать 11.03.2024 г.

Представлен краткий обзор результатов исследования динамики токовых слоев, формируемых в лабораторных экспериментах, которые проводятся в ИОФ РАН. Показано, что в лабораторных условиях могут быть воспроизведены наиболее существенные черты явлений, подобных вспышкам на Солнце. Это — сравнительно медленное накопление магнитной энергии при формировании токового слоя, быстрое высвобождение энергии при разрыве слоя, ускорение потоков плазмы, сверхбыстрый нагрев вещества, эффективное ускорение частиц. Установлено качественное сходство между основными характеристиками токовых слоев в хвостовой области магнитосферы Земли и в лабораторных условиях. Сопоставление ряда фундаментальных безразмерных параметров указывает на возможности количественного лабораторного моделирования процессов, происходящих в магнитосфере. Сделан вывод о том, что экспериментальные исследования динамики токовых слоев и процессов магнитного пересоединения представляют собой одно из перспективных направлений лабораторной астрофизики.

Ключевые слова: плазма, токовый слой, динамические процессы, магнитное пересоединение, лабораторные эксперименты, солнечные вспышки, магнитосфера Земли

DOI: 10.31857/S0004629924040075 EDN: KFBOAX

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению токовых слоев, которые развиваются в замагниченной плазме высокой проводимости, возник в середине прошлого века в связи с попытками объяснить явления, которые наблюдаются во время вспышек на Солнце. Наблюдательные данные, полученные при изучении солнечных вспышек, инициировали развитие теоретических исследований. В результате были сформированы представления о том, что резервуар колоссальной энергии, которая высвобождается во время вспышек, — это энергия магнитного поля, связанная с электрическими токами в солнечной короне.

Выдающаяся роль в развитии теории вспышечных явлений принадлежит С.И. Сыроватскому (1925–1979), который обосновал концепцию токовых слоев как физической основы вспышечных явлений в замагниченной плазме [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Согласно этой концепции, токовый слой может сравнительно медленно развиваться в окрестности особой линии магнитного поля, что приводит к постепенной концентрации избыточной магнитной энергии и создает

предвспышечную ситуацию. Собственно вспышка происходит в случае быстрого разрушения токового слоя, когда благодаря процессам магнитного пересоединения накопленная энергия в течение короткого интервала времени преобразуется в энергию плазмы, ускоренных частиц и излучений различных диапазонов электромагнитного спектра, (см. также [8, 9]). Подчеркнем, что для объяснения особенностей вспышечных явлений существенное значение имеют два характерных поперечных размера слоя (в плоскости, перпендикулярной к направлению тока), которые могут значительно различаться между собой. Действительно, резервуар магнитной энергии, сосредоточенной в окрестности слоя, определяется большим поперечным размером, или шириной слоя, тогда как сравнительно короткое время разрушения слоя и трансформации магнитной энергии в энергию плазмы и ускоренных частиц определяется меньшим поперечным размером, или толщиной слоя.

Необходимо подчеркнуть, что процессы магнитного пересоединения в токовых слоях лежат в основе самых разнообразных нестационарных явлений как

в космической, так и в лабораторной плазме. К таким явлениям можно отнести вспышки на Солнце и звездах, суббури в магнитосферах Земли и планет, а также неустойчивости срыва в плазме токамаков, динамические явления в тэта-пинчах с обратным полем, плазменном фокусе и др. [7, 9, 10, 11, 12, 13]. В космическом пространстве такие явления, как солнечные вспышки или магнитосферные бури, происходят спонтанно и относительно редко, что вызывает существенные трудности в их изучении. Эти обстоятельства стимулировали постановку целого ряда специальных лабораторных экспериментов, направленных на выяснение природы и моделирование различных плазмодинамических процессов в космической плазме.

В ряде лабораторий мира динамика и структура токовых слоев и происходящие в них процессы магнитного пересоединения изучаются на основе специально поставленных экспериментов [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Такие исследования проводятся в хорошо контролируемых и воспроизводимых условиях, с применением современных методов диагностики плазмы.

Представления о том, что результаты лабораторных экспериментов могут быть достаточно эффективно использованы для анализа и интерпретации явлений в космическом пространстве, обсуждались в литературе, начиная с работ Альвена и Фельтхаммара [26], а также во многих более поздних работах, см. [27, 28, 29, 30] и цитированную там литературу. Для адекватного сопоставления физических процессов в разнообразных астрофизических объектах, с одной стороны, и в лабораторных экспериментах, с другой стороны, был предложен принцип «ограниченного моделирования» [26, 31, 32, 33]. Это означает, что если безразмерный параметр много больше (меньше) единицы в космосе, то он должен быть, соответственно, больше (меньше) единицы и в лабораторных условиях, но в первом приближении нет необходимости сохранять тот же порядок величины. Если же безразмерный параметр порядка единицы в космосе, то он должен быть порядка единицы и в эксперименте. При выполнении этих условий лабораторные эксперименты должны адекватно воспроизводить основные черты астрофизических процессов.

В настоящее время фундаментальные свойства процессов магнитного пересоединения в токовых слоях исследуются с помощью сравнительно малогабаритных лабораторных установок в США, Японии, Германии, Китае (см. [27, 28, 29, 30] и цитированную там литературу).

2. ТОКОВЫЕ СЛОИ В ДВУМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ И ВСПЫШЕЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕ

В Институте общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук традиционно проводятся экспериментальные исследования процессов магнитного пересоединения в плазме токовых слоев, которые формируются в магнитных полях в окрестности нулевых или особых линий X-типа, рис. 1. Данный подход базируется на теоретическом рассмотрении этих проблем в работах С. И. Сыроватского [1, 7, 34].

Исследования проводились последовательно на нескольких экспериментальных установках «Токовый слой», которые отличались размерами, энергоемкостью, амплитудой электрического тока, а также концентрацией плазмы, но создавались по единому принципу независимой работы основных систем установки [16, 23, 30, 35, 36]. Это, во-первых, система формирования исходной двумерной (2D) или трехмерной (3D) магнитной конфигурации с нулевой, или особой, линией, во-вторых, система создания плазмы в выбранной магнитной конфигурации и, наконец, система возбуждения электрического тока в плазме, что в конечном итоге должно приводить к развитию токового слоя. Данный принцип обеспечивает возможность изменения условий эксперимента в достаточно широких пределах.

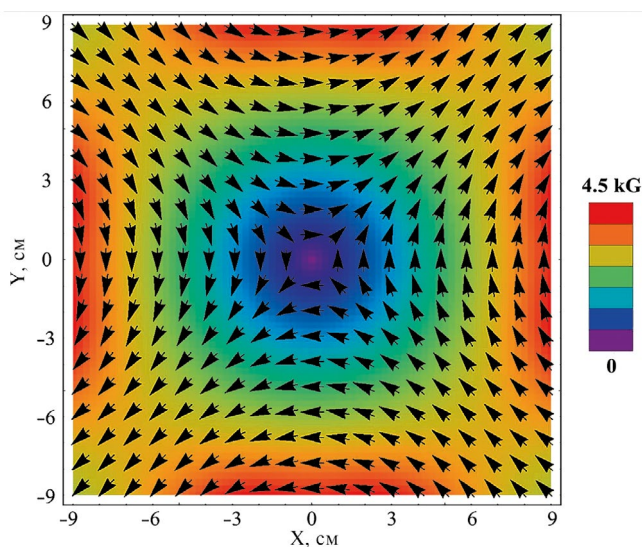


Рис. 1. Структура двумерного магнитного поля с нулевой линией X-типа на оси z : $\mathbf{B} = \{B_x; B_y; B_z\} = \{h \cdot y; h \cdot x; 0\}$. Цвет на рисунке показывает величину магнитного поля; стрелки указывают направления магнитного поля в плоскости (x, y) .

На начальном этапе исследований основная принципиальная трудность состояла в уменьшении проводимости плазмы при возбуждении электрического тока из-за развития плазменных неустойчивостей (аномальная проводимость), что не позволяло обеспечить вмерзновенность магнитного поля в плазму, по крайней мере, на стадии формирования токового слоя [37]. После того как удалось решить эту проблему [35], был впервые экспериментально получен нейтральный токовый слой [16], при этом в окрестности слоя было получено значительное увеличение плотности магнитной энергии, рис. 2 [16, 38].

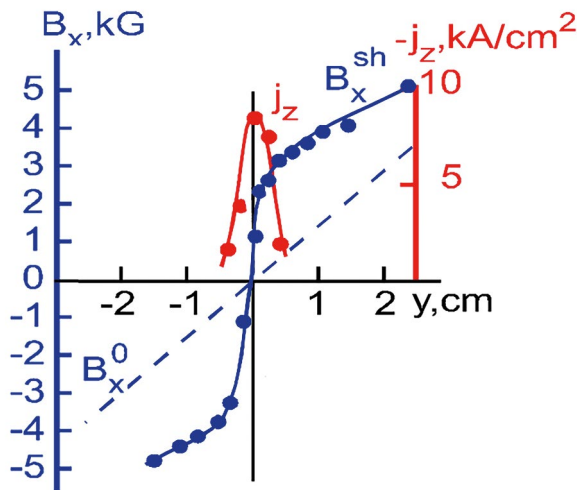


Рис. 2. Распределения плотности тока j_z в токовом слое и тангенциальный компонент магнитного поля B_{xsh} токового слоя вдоль оси y (по нормали к поверхности слоя) в центральной области слоя, при $x \approx 0$. B_x^0 — тангенциальный компонент начального магнитного поля до образования токового слоя.

Быструю перестройку структуры магнитного поля, или разрыв токового слоя, удалось реализовать при создании специальных начальных условий в установке ТС-3 [38]. Установлено, что в процессе разрыва слоя, рис. 3а, б, происходит резкое изменение распределений как тока, так и плазмы [36, 39], наблюдаются импульсный нагрев электронов и ионов, появление быстрых потоков плазмы, возбуждение индукционных электрических полей, генерация ускоренных электронов с энергией ≥ 10 кэВ, рис. 3в [40, 41]. В ряде режимов непосредственно перед началом импульсной фазы магнитного пересоединения был обнаружен быстрый рост температур электронов (до ≈ 100 эВ) и ионов (до ≈ 300 эВ) в «горячих точках» токового слоя [42, 43], что указывало на существенную роль тепловых процессов в качестве триггерного механизма разрыва токового слоя [44].

Таким образом, в лабораторных условиях были воспроизведены наиболее существенные черты, характерные для вспышечных процессов в плазме [45, 46]. Это — сравнительно медленное предвспышечное накопление магнитной энергии при формировании токового слоя, быстрое высвобождение энергии при разрыве слоя, ускорение потоков плазмы, сверхбыстрый нагрев вещества, эффективное ускорение электронов плазмы. Отсюда следует, что имеется качественное соответствие между лабораторными экспериментами и вспышками на Солнце, что отмечено и в названии статьи С. И. Сыроватского «Солнечные вспышки в лаборатории» [47].

Что касается количественного сопоставления, то сравнение наиболее важных МГД безразмерных

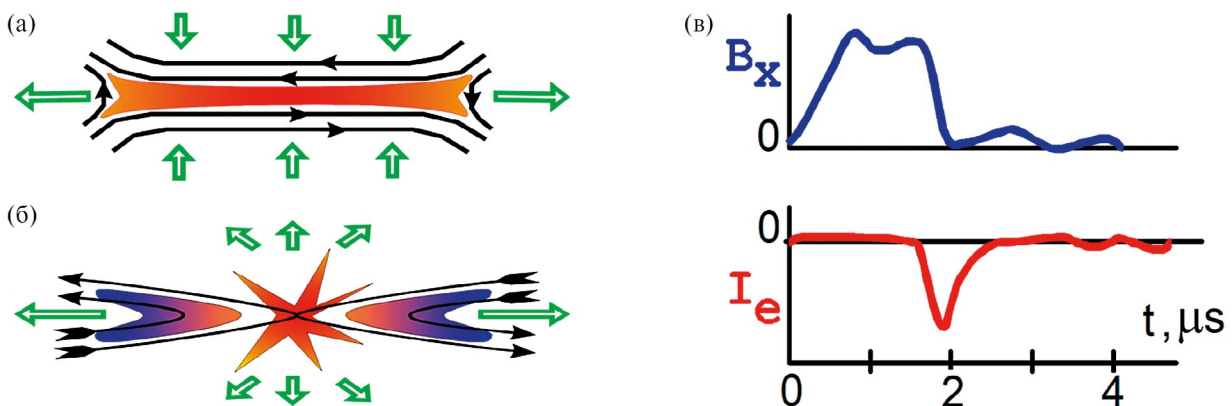


Рис. 3. Схема разрыва токового слоя (а, б) и ускорение электронов при разрыве слоя (в). Метастабильный токовый слой и 2D течения плазмы в окрестности слоя (а); пересоединение магнитных силовых линий в центре токового слоя и разрыв слоя (б); изменения во времени тангенциальной компоненты магнитного поля B_x и тока ускоренных электронов I_e с энергией $E_e \geq 10$ кэВ (в).

параметров показало, что основные условия, характерные для предвысшей ситуации на Солнце, удовлетворительно воспроизводятся в рамках ограниченного моделирования в экспериментах на установках «Токовый слой» [48, 49].

3. ТОКОВЫЕ СЛОИ В ТРЕХМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ

Возможность формирования токовых слоев и кумуляции магнитной энергии в 3D магнитных конфигурациях представляет собой актуальную проблему, поскольку и в природе, и в установках с лабораторной плазмой (например, в токамаках) магнитные конфигурации обычно являются трехмерными [50]. С этой целью была разработана, сконструирована и создана экспериментальная установка ТС-3D, в которой можно создавать 3D магнитные поля различной структуры [51, 52, 53].

Принципиальная схема установки ТС-3D показана на рис. 4. Суперпозиция двух квазистационарных магнитных полей, обладающих различными типами симметрии, формирует исходную магнитную конфигурацию с особой линией на оси z :

$$\mathbf{B} = \{h y; h x; B_z^0\}. \quad (1)$$

С помощью системы прямых проводников, параллельных оси z , создается 2D магнитное поле с

нулевой линией, магнитные силовые линии которого лежат в плоскости (x, y) . Аксиально-симметричное магнитное поле B_z^0 создается с помощью шести одинаковых соосных катушек. Градиент поперечного магнитного поля $h \leq 1.0$ кГс/см, $B_z^0 \leq 8.0$ кГс.

Особая линия магнитного поля (1) совмещена с осью цилиндрической кварцевой вакуумной камеры диаметром 18 см и длиной 100 см. После предварительной откачки камера заполняется одним из исследуемых газов (аргоном, гелием, криптоном или ксеноном) до давления $10^{-3} - 10^{-1}$ Тор. В магнитном поле (1) с помощью высоковольтного (40–45 кВ) тэта-разряда с сильной предварительной ионизацией создается начальная плазма с концентрацией $N_e \approx 10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [35].

Затем при подаче импульсного напряжения на промежуток между двумя электродами, расположенными на расстоянии 60 см друг от друга у торцов вакуумной камеры, в подготовленной плазме возбуждается импульсный электрический ток J_z . Длительность полупериода тока составляет $T/2 \approx 6$ мкс, его амплитуда $J_z^0 \approx 46 - 50$ кА. Возбуждение тока J_z приводит к возмущению исходной магнитной конфигурации (1) и постепенному развитию токового слоя.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что в достаточно широком диапазоне

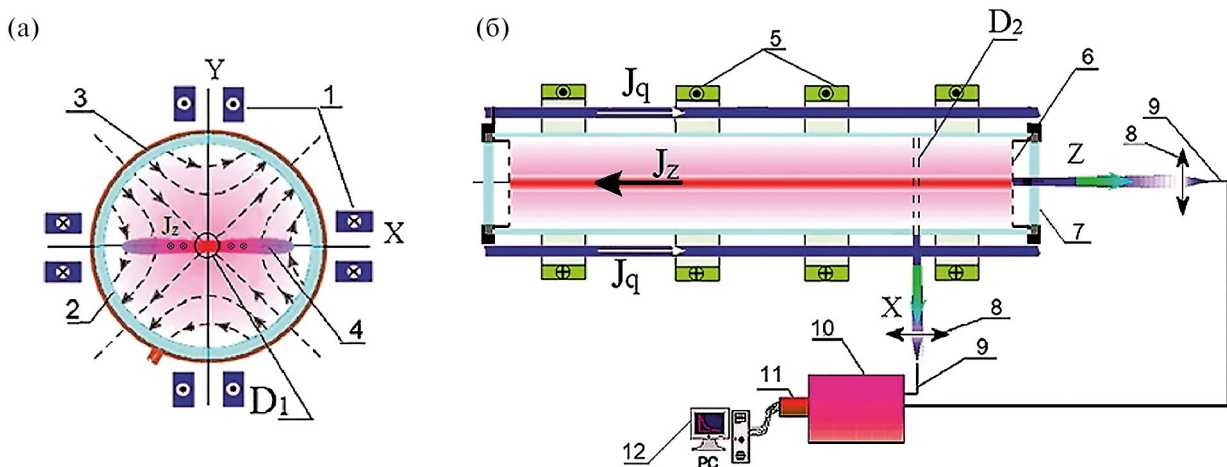


Рис. 4. Схема экспериментальной установки ТС-3D: (а) — поперечное сечение, (б) — вид сбоку. 1 — система прямых проводников с токами J_q для создания 2D магнитного поля в плоскости (x, y) с нулевой линией на оси $0z$; 2 — вакуумная камера; 3 — витки тэта-разряда для создания начальной плазмы; 4 — токовый слой, формируемый при возбуждении в плазме электрического тока J_z ; 5 — катушки для возбуждения продольного магнитного поля B_z^0 ; 6 — сетчатые электроды; 7 — кварцевые окна; 8 — кварцевые линзы; 9 — кварцевые световоды; 10 — монохроматор; 11 — электронно-оптическая камера Nanogate-1UF; 12 — компьютер; D_1 — центральная область слоя, из которой регистрировалось излучение плазмы в z -канале; D_2 — область слоя, из которой регистрировалось излучение плазмы в x -канале.

3D магнитных конфигураций возможно формирование квазиодномерных токовых слоев. Необходимым условием образования токового слоя является наличие в 3D магнитном поле особой линии X-типа с поперечной структурой типа «седло», см. рис. 1 [54, 55, 56]. В 3D магнитных конфигурациях было обнаружено уменьшение степени сжатия в слой тока и плазмы по мере увеличения продольного компонента магнитного поля B_z^0 , направленного вдоль X-линии [53, 57, 58]. Установлено, что этот эффект обусловлен усилением продольного компонента магнитного поля в пределах токового слоя на величину $\approx 10^3$ Гс [59].

На начальной стадии эволюции токового слоя было обнаружено возбуждение токов Холла [60, 61], образующих в плоскости, перпендикулярной направлению основного тока в слое, четыре замкнутых контура, которые создают дополнительное продольное магнитное поле квадрупольного типа [62]. В результате возбуждения токов Холла, а также при усилении в слое продольного компонента магнитного поля структура токов в пределах токового слоя становится трехмерной [63].

В токовых слоях, формируемых в установке ТС-3D, обнаружена генерация направленных по-

токов плазмы, которые движутся от середины токового слоя к его обоим боковым краям вдоль ширины, или большего поперечного размера слоя [64, 65]. Энергии плазменных потоков могут достигать $\approx 400 \div 900$ эВ, что значительно превышает тепловую энергию ионов плазмы $\approx 50 \div 100$ эВ [66].

Установлено, что генерация сверхтепловых потоков плазмы происходит под действием сил Ампера [67, 68], причем направленное движение плазмы начинается после затухания токов Холла [69]. Обнаружено, что после достижения максимального значения энергия плазменных потоков быстро уменьшается, т. е. ускоренные в токовом слое потоки плазмы ограничены во времени и в пространстве [70, 71, 72]. Существенно, что аналогичная особенность свойственна потокам плазмы, которые распространяются в хвостовой области магнитосферы по направлению к Земле.

Анализ экспериментальных данных показал, что на определенном этапе эволюции токового слоя у его боковых концов возникают электрические токи, направленные противоположно по отношению к направлению тока в основной части слоя [67, 69]. Появление обратных токов обусловлено движением плазменных потоков в поперечном магнитном

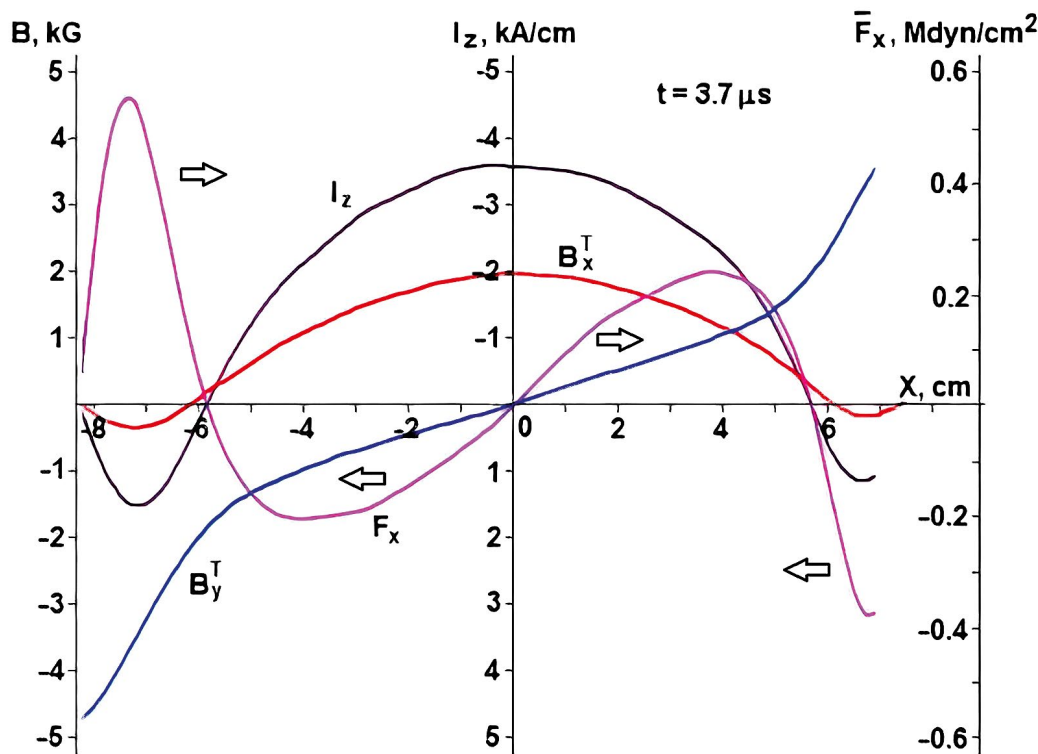


Рис. 5. Распределения тангенциального $B_x^T(x)$ и нормального $B_y^T(x)$ компонентов магнитного поля токового слоя, линейного тока $I_z(x)$ и сил Ампера $F_x(x)$ в области $|y| \leq 0.8$ см в момент времени $t = 3.7$ мкс. Токковый слой формировался в Аг. Направления сил Ампера $F_x(x)$ показаны двойными стрелками.

поле, что приводит к возбуждению индукционных электрических полей [69]. При этом в областях с обратными токами изменяется направление сил Ампера, т. е. возникают силы торможения, рис. 5 [73], которые и ограничивают длительность существования высокоскоростных потоков плазмы.

4. СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ И В ХВОСТОВОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

В последнее десятилетие в рамках сотрудничества с ИКИ РАН проводится анализ и сопоставление данных, полученных с помощью спутниковых миссий, с результатами экспериментов на установке ТС-3D (ИОФ РАН) [74, 75, 76, 77, 78]. Анализ структуры магнитных полей в хвостовой области магнитосферы Земли и в лабораторных экспериментах свидетельствует о том, что в обоих случаях наблюдается образование сравнительно тонких токовых слоев при качественном подобии профилей магнитного поля и плотности тока. Присутствие в магнитной структуре токового слоя сравнительно слабого компонента магнитного поля, ориентированного по нормали к поверхности слоя, характерно как для магнитосферы, так и для лабораторных условий. Возникновение в токовых слоях продольного компонента квадрупольной структуры свидетельствует о генерации токов Холла.

При развитии токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях, которые с самого начала содержали продольный компонент, было обнаружено усиление продольного компонента в пределах слоя по сравнению с фоновым уровнем [59]. Усиление продольного компонента магнитного поля в лабораторном токовом слое происходит вместе со сжатием в слой основного тока. Можно предполагать, что подобный процесс может приводить к усилению продольного компонента и в магнитосферном токовом слое.

Общими свойствами являются также характер пространственных распределений температуры электронов и соотношение между температурой ионов и электронов. В обоих случаях максимум температуры электронов локализован в центральной плоскости слоя. Превышение температуры ионов над температурой электронов в 3–7 раз характерно для токовых слоев как в магнитосфере Земли, так и в лабораторных условиях.

При анализе процессов ускорения и торможения сверхтепловых потоков плазмы в лаборатор-

ных токовых слоях было обнаружено, что генерация токов обратного направления у боковых концов слоя приводит к появлению сил торможения, которые ограничивают длительность плазменных потоков [69, 72, 73]. В магнитосферном токовом слое также регистрируются обратные токи, которые должны воздействовать на динамику потоков плазмы [79, 80]. Отсюда следует, что регистрируемые многими спутниковыми миссиями замедление и разрушение высокоскоростных потоков плазмы, которые распространяются по направлению к Земле, могут происходить в результате возбуждения токов обратного направления.

Таким образом, сходство между токовыми слоями в хвостовой области магнитосферы Земли и в лабораторных экспериментах указывает на единство происходящих в них фундаментальных физических процессов.

Возможность моделирования явлений в токовом слое хвостовой области магнитосферы Земли на основе экспериментов, которые проводятся на установке ТС-3D, обсуждалась путем сопоставления основных характеристик токовых слоев и ряда безразмерных параметров [76], см. табл. 1. Как следует из таблицы, различия в масштабах, абсолютных значениях плазменных параметров, величинах магнитных полей, токов составляют от 7 до 16 порядков величины. Однако наиболее существенные безразмерные параметры имеют достаточно близкие значения, что открывает возможности количественного моделирования процессов, происходящих в магнитосфере, на основе лабораторных экспериментов.

5. РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТС-3D И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ИОФ РАН

В последнее время была проведена реконструкция и значительное обновление основных систем установки ТС-3D, что позволяет переходить к новому этапу экспериментальных исследований.

При формировании токовых слоев существенное значение имеет предварительное создание плазмы высокой проводимости в достаточно сильных неоднородных магнитных полях, содержащих особые (или нулевые) линии X-типа. В связи с этим прежде всего необходимо провести анализ начальных условий, при которых с помощью высоковольт-

Таблица 1. Характеристики токовых слоев в хвостовой области магнитосферы Земли и в лабораторных экспериментах на установке ТС-3D

Тип параметра	Параметр	Токовые слои в магнитосфере	Токовые слои в установке ТС-3D
Основные экспериментальные параметры	B , Гс	$1-3 \cdot 10^{-4}$	$(2-3.5) \cdot 10^3$
	N_e , см ⁻³	0.1–1	$(0.5-1.5) \cdot 10^{16}$
	T_i , эВ	10^3-10^4	40–60
	T_e , эВ	10^2-10^3	10–15
	L , см	$10^7-3 \cdot 10^8$ (100–3000 км)	0.7–1.6
	$\mu = M_i / M_p$	1, иногда присутствуют ионы кислорода (до 30%) с $\mu=16$	40
	Z_i	1	1.5
	j , А/см ²	$5 \cdot 10^{-13}-10^{-11}$	$(1.5-4) \cdot 10^3$
	τ , с	$\sim 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Электронный компонент	ω_{0e} , с ⁻¹	$5.6 \cdot 10^4$	$(4-7) \cdot 10^{12}$
	ω_{ce} , с ⁻¹	$3.5 \cdot 10^3$	$(3.5-6.2) \cdot 10^{10}$
	ν_e , с ⁻¹	$\sim 10^{-13}$	$(0.4-2) \cdot 10^{10}$
	ν_{Te} , см/с	$(0.4-1.3) \cdot 10^9$	$(1.3-1.6) \cdot 10^8$
	ρ_e , см	$\sim 3 \cdot 10^5$ (3 км)	$(2.5-4) \cdot 10^{-3}$
	r_D , см	$\sim 2 \cdot 10^4$ (0.2 км)	$3 \cdot 10^{-5}$
Ионный компонент	Ω_{0i} , с ⁻¹	$1.3 \cdot 10^3$	$(2-3) \cdot 10^{10}$
	Ω_{ci} , с ⁻¹	$\sim 1-2$	$(0.7-1.3) \cdot 10^6$
	$\tau_i = 2\pi/\Omega_{ci}$, с	3–6	$(5-9) \cdot 10^{-6}$
	ν_i , с ⁻¹	10^{-12}	$\approx 10^7$
	ν_{Ti} , см/с	$(3-10) \cdot 10^7$	$(1-1.2) \cdot 10^6$
	ν_A , см/с	$(1-3) \cdot 10^7$	$(0.8-1.6) \cdot 10^6$
	ρ_i , см	$4 \cdot 10^7$ (400 км)	1–1.4
	$d_i = c/\Omega_{0i}$, см	$2.3 \cdot 10^7$ (230 км)	1–1.7
	u_e , см/с	$(5-50) \cdot 10^6$	$(1.5-3) \cdot 10^6$
	$j_0 = e \cdot Ne \cdot \nu_{Ti}$, А/см ²	$2 \cdot 10^{-13}-2 \cdot 10^{-11}$	$(2-3) \cdot 10^3$
Безразмерные параметры	L/r_D	$3 \cdot 10^2-10^4$	$(2-3) \cdot 10^4$
	$L\Omega_{0i}/c$	$\approx 0.5-10$	≈ 1
	L/ρ_i	$\approx 0.25-5$	0.7–1.6
	u_e/ν_A	0.3–3	≈ 1.5
	j/j_0	≈ 1	≈ 1

ного тэта-разряда может быть создана плазма высокой проводимости. Начальные условия включают структуру 2D и 3D магнитных полей, т. е. величину градиента h поперечного магнитного поля с нулевой линией и напряженность продольного компонента B_z^0 , а также род газа, наполняющего вакуумную камеру, и давление газа.

Эксперименты по изучению эволюции токовых слоев, сформированных в магнитных полях с X-линией, будут направлены главным образом на поиск возможностей перехода от метастабильной стадии к импульсной фазе магнитного пересоединения. Такой переход должен приводить к быстрой трансформации энергии магнитного поля, сосредоточенной в окрестности токового слоя, в энергию плазмы, кинетическую и тепловую, а также в потоки высокоэнергичных частиц, ускоренных в возникающих индукционных электрических полях. Особый интерес представляет реализация перехода к импульсной фазе в токовых слоях, формируемых в 3D магнитных конфигурациях.

Значительный интерес представляет изучение генерации сверхтепловых потоков плазмы, которые ускоряются еще во время метастабильной стадии эволюции токовых слоев. При этом важный момент заключается в определении условий, при которых могут быть получены максимальные энергии направленного движения плазмы.

Наряду с проведением экспериментов на установке ТС-3D, актуальная задача состоит в разработке предложений для проектирования крупномасштабного стенда «Токовый слой» в НЦФМ. Создание такого стенда позволит формировать токовые слои, обладающие значительно более высокими параметрами, и исследовать происходящие в них процессы кумуляции магнитной энергии с преобразованием в энергию потоков плазмы и пучков ускоренных заряженных частиц. С помощью этого стенда будут также моделироваться разнообразные явления вспышечного типа в плазме солнечной короны и магнитосферы Земли.

Для успешного проведения исследований на предлагаемом стенде большое значение имеет разработка и создание диагностического комплекса, который должен быть оснащен современной аппаратурой для магнитных, спектральных и рентгеновских измерений, а также специальными стендами для голографической интерферометрии и/или киноголографии, оптической и/или рентгеновской томографии, томсоновского рассеяния.

6. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ И ТОКОВЫХ СЛОЕВ

6.1. Метод СВЧ фазовой локации

Метод фазовой локации может использоваться как для определения размеров начальной плазмы, создаваемой с помощью высоковольтного тэта-разряда, так и для измерения скоростей движения периферийной плазмы в окрестности токового слоя.

Поперечные размеры начальной плазмы можно определять на основе измерений СВЧ фазометром, который регистрирует изменения во времени фазы отраженной волны путем сравнения ее с фазой опорной волны [81, 82, 83]. Если концентрация электронов плазмы превышает критическую концентрацию для СВЧ волны с круговой частотой ω :

$$N_e > N_c = m\omega^2/4\pi e^2,$$

то регистрируется СВЧ сигнал, отраженный от областей плазмы с плотностью $N_e \approx N_c$. Здесь m и e — масса и заряд электрона. Если же всюду на пути распространения волны концентрация электронов меньше критической, $N_e < N_c$, то регистрируется сигнал, дважды прошедший через плазму и отраженный от металлического зеркала, расположенного напротив излучающей антенны. Суммарный набег фазы, полученный при распаде начальной плазмы, позволяет определить размер плазмы, которая была создана с помощью тэта-разряда [82, 84].

На основании измерений с помощью фазометра можно также получать информацию о 2D скоростях и смещениях периферийной плазмы в процессе развития токового слоя. Значительный интерес представляют также зависимости скоростей 2D движений плазмы от условий формирования токового слоя (подробнее см. [82]).

6.2. Регистрация изображений плазмы токового слоя в различных спектральных линиях с разрешением во времени

Для определения структуры начальной плазмы будет использоваться метод интерференционных фильтров, который позволяет совместить достоинства фотографических и спектральных методов диагностики плазмы [85, 86, 87, 88]. Изображения плазмы в различные моменты времени будут регистрироваться с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП) в комбинации с узкополосными ($\Delta\lambda \approx 1 \div 1.5$ нм) интерференционными фильтрами, пропускающими излучение в окрест-

ностях спектральных линий основных газов — гелия, аргона, неона и примесей — углерода, азота, кислорода. При экспериментах в гелии это, например, линии атомарного гелия He I 587.6 нм и ионов гелия He II 468.6 нм, а в неоне — линии атомов неона Ne I 585.2 нм и ионов неона Ne II 333.5 нм. По таким изображениям можно качественно судить о степени ионизации начальной плазмы, о пространственном распределении ионов и нейтральных атомов в плазме и, таким образом, о распределении температуры электронов в плазме тэта-разряда.

Кроме того, будет исследовано 2D распределение излучения плазмы собственно токового слоя в различных спектральных линиях в разные моменты времени. Результаты этих исследований дадут информацию о степени сжатия начальной плазмы в пределы слоя и о распределении горячих областей плазмы в токовом слое.

Метод будет использован также для анализа структуры токовых слоев, сформированных в различных 3D магнитных конфигурациях.

6.3. Определение структуры и эволюции токовых слоев с помощью внешних магнитных зондов

Измерения параметров токовых слоев внешними магнитными зондами базируются на ранее полученных данных о магнитной структуре и характере симметрии метастабильных токовых слоев. Ширина слоя $2\Delta x$ обычно превышает толщину слоя $2\Delta y$ практически на порядок величины, так что при измерениях вне плазменного объема можно считать слой достаточно тонким и учитывать только распределение поверхностной плотности тока вдоль ширины слоя, $I_z(x) = \int_z j_z(x, y) dy$. Соответствующие вычисления [89], проведенные на основе распределений линейной плотности тока, полученных экспериментально [67], продемонстрировали возможность с достаточной точностью определять ширину токового слоя на основе измерений магнитных полей в двух точках, разнесенных по азимуту, $\mathbf{B}_0(t)$ и $\mathbf{B}_{90}(t)$, см. также [86, 87, 90]. Такие измерения дают возможность регистрировать изменения ширины слоя со временем и в зависимости от условий формирования токового слоя.

Особый интерес представляет возможность детектирования такого динамического процесса, как переход к импульсной фазе магнитного пересоединения, т. е. к разрыву токового слоя, не оказывая влияния на процессы в плазме. На основании проведенных вычислений была показана возможность

регистрации разрыва слоя внешними магнитными зондами [89]. Этот метод позволяет оперативно определять экспериментальные условия (структура магнитного поля, плотность начальной плазмы и массовый состав плазмы, суммарный ток, протекающий в слое), в которых возможно реализовать разрыв токового слоя.

Отметим, что измерения внешними магнитными зондами имеют неоспоримые технологические преимущества, в том числе возможность значительного увеличения отношения сигнал-шум.

6.4. Спектральные методы определения основных параметров плазмы токовых слоев

При изучении различных плазменных процессов, происходящих в токовых слоях, широко используются спектральные методы, которые позволяют определить параметры плазмы в различных пространственных областях токовых слоев, практически не оказывая возмущающего воздействия на исследуемую плазму, что выгодно отличает эти методы, например, от зондовых измерений. Разнообразные методы спектроскопии помогают определить как температуры электронов, атомов, ионов, скорости направленных движений плазмы, так и плотность плазмы в различных пространственных областях и/или напряженности аномальных электрических полей [64, 65, 66, 67, 68, 70, 72, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103]. Методами спектроскопии было обнаружено резкое увеличение температур ионов и электронов непосредственно перед началом импульсной фазы магнитного пересоединения [42, 43, 104, 105], что свидетельствует о «тепловом триггере» этого явления [44]. Были зарегистрированы также турбулентные электрические поля в «горячей фазе» вспышечного процесса, развивающегося в плазме токового слоя [106].

Спектральные методы будут активно применяться и в новой серии экспериментов на установке ТС-3D, при этом планируется особое внимание уделить изучению ускорения плазмы в токовых слоях. Проблема ускорения является одной из фундаментальных проблем физики плазмы, а быстрые потоки плазмы наблюдаются как в лабораторных условиях [64, 65, 66, 70, 71, 72, 80, 101, 103], так и в магнитосфере Земли [107, 108, 109, 110]. При этом, как отмечалось выше, ограничение длительности плазменных потоков и их торможение как в хвостовой области магнитосферы Земли, так и в лабораторном эксперименте могут быть обусловлены одним и тем же механизмом [80].

Спектральные измерения планируется проводить с помощью монохроматоров МДР-3 и ДФС-24, обратная линейная дисперсия которых составляет 1.3 нм/мм и 0.45 нм/мм, соответственно. Регистрироваться спектры будут с помощью цифровой программируемой камеры Nanogate-1UF, которая представляет собой электронно-оптический преобразователь с усилителем яркости на основе МКП и приемником излучения в виде ССД матрицы. Камера позволяет регистрировать спектры с экспозицией 0.1–10 мкс [111].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамические процессы в токовых слоях составляют основу разнообразных нестационарных явлений в космической и лабораторной плазме, таких, как вспышки на Солнце и звездах, суббури в магнитосферах Земли и планет, неустойчивости срыва в плазме токамаков и др. Токовые слои и происходящие в них процессы магнитного пересоединения изучаются в целом ряде мировых исследовательских центров на основе специально поставленных лабораторных экспериментов.

В Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН было создано несколько уникальных установок «Токовый слой», с помощью которых были исследованы процессы формирования и эволюции токовых слоев в различных магнитных конфигурациях. Экспериментальные установки отличались размерами, энергоемкостью, величинами магнитных полей, электрических токов, концентрацией и массовым составом плазмы, но создавались по единому принципу независимой работы основных систем установки.

Проведены серии экспериментальных исследований, в которых реализованы наиболее существенные процессы, характерные для вспышечных явлений в плазме: накопление магнитной энергии при формировании токового слоя, динамичное высвобождение этой энергии при разрыве слоя, ускорение ионов и электронов, быстрый нагрев плазмы. В результате было показано, что на качественном уровне имеется соответствие между лабораторными экспериментами и вспышками на Солнце. При этом основные условия, характерные для предвспышечной ситуации на Солнце, удовлетворительно воспроизводятся в рамках ограниченного моделирования в экспериментах на установках «Токовый слой».

Возможность формирования токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях представляет собой актуальную проблему, поскольку и в природе, и в

установках с лабораторной плазмой магнитные конфигурации обычно являются трехмерными. В результате проведенных экспериментов было установлено, что квазиодномерные токовые слои формируются в достаточно широком диапазоне 3D магнитных конфигураций при наличии в них особой линии X-типа с поперечной структурой типа «седло». Обнаружено уменьшение степени сжатия в слой тока и плазмы при увеличении продольного компонента магнитного поля, направленного вдоль X-линии.

Анализ структуры магнитных полей токовых слоев в лабораторных экспериментах и в хвостовой области магнитосферы Земли показал, что в обоих случаях образуются сравнительно тонкие токовые слои, профили магнитного поля и плотности тока которых качественно подобны. Возможность лабораторного моделирования явлений в хвостовой области магнитосферы Земли была обоснована при сопоставлении наиболее существенных безразмерных параметров.

В ИОФ РАН ведется постоянное обновление экспериментальной базы, что позволяет продолжать и развивать лабораторные исследования в этой области. Была проведена реконструкция и модернизация установки ТС-3D, подготовлены как традиционные, так и новые методы диагностики плазмы.

Современный этап исследований включает разработку и использование нового экспериментального стенда в НЦФМ со значительно более высокими параметрами. Это открывает перспективы для создания условий генерации высокоэнергетических потоков плазмы и ускоренных электронов в токовых слоях.

Таким образом, экспериментальные исследования динамики токовых слоев и процессов магнитного пересоединения представляют собой одно из перспективных направлений лабораторной астрофизики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта «Плазма» FFWF-2023-0002.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Программе 10 «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» НЦФМ за организацию I Всероссийской научной школы Национального центра физики и математики для студентов, аспирантов,

молодых ученых и специалистов по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике. Авторы выражают благодарность Льву Матвеевичу Зеленому за поддержку исследований по физике токовых слоев в ИОФ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. И. Сыроватский, Астрон. журн. 43, 340 (1966).
2. С. И. Сыроватский, ЖЭТФ 54, 1422 (1968).
3. В. С. Имиенник, С. И. Сыроватский, ЖЭТФ 52, 990 (1967).
4. С. И. Сыроватский, ЖЭТФ 60, 1727 (1971).
5. Сыроватский, Вестник АН СССР 10, 33 (1977).
6. Сыроватский, Известия АН СССР, сер. физическая 43, 695 (1979).
7. S. I. Syrovatskii, Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 19, 163 (1981).
8. С. И. Сыроватский, Изв. АН СССР 43, 695 (1979).
9. Э. Прист, Т. Форбс Магнитное пересоединение (М.: Физматлит, 2005).
10. D. Biskamp Magnetic Reconnection in Plasmas (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000).
11. Б. Б. Кадомцев, Успехи физ. наук 151, 3 (1987).
12. Л. М. Зеленый, А. В. Артемьев, Х. В. Малова, А. А. Петрукович, Р. Накамура, Успехи физ. наук 180, 973 (2010).
13. Л. М. Зеленый, Успехи физ. наук 186, 1153 (2016).
14. A. Bratenahl, and C. M. Yeates, Phys. Fluids 11, 2696 (1970).
15. N. Ohya, and N. Kawashima, J. Phys. Soc. Japan 33, 496 (1972).
16. С. И. Сыроватский, А. Г. Франк, А. З. Ходжаев, Письма в ЖЭТФ 15, 138 (1972).
17. А. Т. Алтынцева, В. И. Красов, Журн. техн. физ. 44, 2629 (1974).
18. R. L. Stenzel, and W. Geikelman, J. Geophys. Res. 86, 649 (1981).
19. С. Ю. Богданов, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ 35, 232 (1982).
20. Y. Ono, A. Morita, M. Katsurai, and M. Yamada, Phys. Fluids B 5, 3691 (1993).
21. M. Yamada, H. T. Ji, S. Hsu, T. Carter, R. Kulsrud, N. Bretz, F. Jobes, Y. Ono, and F. Perkins, Phys. Plasmas 14, 1936 (1997).
22. M. R. Brown, Phys. Plasmas 6, 1717 (1970).
23. A. G. Frank, Plasma Phys. & Contr. Fusion 41, 687 (1999).
24. J. Egedal, M. Oiroset, W. Fox, and R. P. Lin, Phys. Rev. Lett. V 94, 025006 (2005).
25. T. P. Intrator, I. Furno, D. D. Ryutov, G. Lapenta, L. Dorf, and X. Sun, J. Geophys. Res. 112, A05S90 (2007).
26. Г. Альвен, К. Г. Фельтхаммар Космическая электродинамика: основные принципы (М.: Мир, 1967).
27. M. E. Koepke, Rev. of Geophys. 46, 1 (2008).
28. E. G. Zweibel, and M. Yamada, Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 47, 291 (2009).
29. M. Yamada, R. Kulsrud, and H. Ji H., Rev. Modern Phys. 82, 603 (2010).
30. А. Г. Франк, Успехи физ. наук 180, 982 (2010).
31. В. Б. Баранов, Космические исследования 7, 109 (1969).
32. К. Шиндлер Физика магнитосферы (М.: Мир, 1972).
33. И. М. Подгорный, Р. З. Сагдеев, Успехи физ. наук 98, 409 (1969).
34. С. И. Сыроватский, ЖЭТФ 50, 1133 (1966).
35. А. Г. Франк, Труды ФИАН 74, 108 (1974).
36. А. Г. Франк, Г. М. Батанов, Труды ФИАН 227, 88 (2000).
37. С. И. Сыроватский, А. Г. Франк, А. З. Ходжаев, Журн. техн. физ. 43, 912 (1973).
38. Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, А. З. Ходжаев, Физика плазмы 3, 538 (1977).
39. S. Yu. Bogdanov, A. G. Frank, and V. S. Markov, Physica Scripta 30, 279 (1984).
40. А. Т. Алтынцева, В. И. Красов, В. С. Марков, М. В. Петров, А. Г. Франк, А. З. Ходжаев, Физика плазмы 4, 18 (1978).
41. С. Ю. Богданов, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ 51, 563 (1990).
42. И. Л. Бейгман, В. П. Гавриленко, Н. П. Кирий, А. Г. Франк, Журн. Прикл. Спектроскопии 54, 1021 (1991).
43. Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ 56, 82 (1992).
44. С. И. Сыроватский, Письма в Астрон. журн. 2, 35 (1976).
45. A. G. Frank, S. Yu. Bogdanov, N. P. Kyrie, V. S. Markov in AIP Conference Proc. Melville, N. Y., USA 703, 431 (2004).
46. А. Г. Франк Плазменная гелиогеофизика (М.: Физматлит, Т. 2, 259, 2008).
47. С. И. Сыроватский, Природа 2, 143 (1978).
48. С. В. Буланов, В. А. Догель, А. Г. Франк, Письма в Астрон. журн. 10, 149 (1984).
49. S. V. Bulanov, V. A. Dogiel, and A. G. Frank, Physica Scripta 29(1), 66 (1984).
50. С. В. Буланов, А. Г. Франк, Физика плазмы 18, 1535 (1991).
51. С. Ю. Богданов, В. Б. Бурилина, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ 59, 510 (1994).

52. С. Ю. Богданов, В. Б. Бурилина, Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Труды ИОФАН 51, 76 (1996).
53. С. Ю. Богданов, Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ 71(2), 78 (2000).
54. А. Г. Франк, С. Ю. Богданов, В. Б. Бурилина, Изв. АН. Сер. Физ. 59(8), 41 (1995).
55. A. G. Frank, and S. Yu. Bogdanov, Earth, Planets & Space 53, 531 (2001).
56. A. G. Frank, Plasma Phys. Reports 48, 574 (2022).
57. A. G. Frank, S. Yu. Bogdanov, V. S. Markov, G. V. Ostrovskaya, and G. V. Dreiden, Phys. Plasmas 12, 05231 (2005).
58. С. Ю. Богданов, Г. В. Дрейден, В. С. Марков, Г. В. Островская, А. Г. Франк, Физика плазмы 32, 1121 (2006).
59. A. G. Frank, S. G. Bugrov, V. S. Markov, Phys. Lett. A 373, 1464 (2009).
60. A. G. Frank, S. Yu. Bogdanov, G. V. Dreiden, V.S. Markov, G.V. Ostrovskaya, Phys. Lett. A 348, 318 (2006).
61. С. Ю. Богданов, Г. В. Дрейден, В. С. Марков, Г. В. Островская, А. Г. Франк, Физика плазмы 33, 1014 (2007).
62. A. G. Frank, S. G. Bugrov, V. S. Markov, Phys. Plasmas 15, 092102 (2008).
63. А. Г. Франк, С. Н. Сатунин, Физика плазмы 44, 144 (2018).
64. Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Физика плазмы 36, 387 (2010).
65. Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ 95, 17 (2012).
66. Н. П. Кирий, А. Г. Франк, Физика плазмы 38, 1042 (2012).
67. А. Г. Франк, С. Н. Сатунин, Физика плазмы 37(10), 88 (2011).
68. A. G. Frank, N. P. Kyrie, S. N. Satunin, Phys. Plasmas 18, 111209 (2011).
69. А. Г. Франк, С. Н. Сатунин, Письма в ЖЭТФ 112, 667 (2020).
70. Н. П. Кирий, А. Г. Франк, Д. Г. Васильков, Физика плазмы 45, 313 (2019).
71. Н. П. Кирий, С. А. Савинов, Успехи прикладной физики 8, 436 (2020).
72. A. G. Frank, N. P. Kyrie, S. N. Satunin, S. A. Savinov, Universe 7, 400 (2021).
73. А. Г. Франк, С.Н. Сатунин, Физика плазмы 48, 12 (2022).
74. A. V. Artemyev, A. A. Petrukovich, A. G. Frank, R. Nakamura, and L. M. Zelenyi, J. Geophys. Res. 118, 2789 (2013).
75. Е. В. Юшков, А. Г. Франк, А. В. Артемьев, А. А. Петрукович, И. Ю. Васьо, Физика плазмы 41, 73 (2015).
76. А. Г. Франк, А. В. Артемьев, Л. М. Зеленый, ЖЭТФ 150, 807 (2016).
77. А. Г. Франк, Г. В. Островская, Е. В. Юшков, А. В. Артемьев, С. Н. Сатунин, Космические исследования 55, 48 (2017).
78. Е. В. Юшков, А. Г. Франк, А. В. Артемьев, А. А. Петрукович, Р. Накамура, Физика плазмы 44, 983 (2018).
79. S. Lu, A. V. Artemyev, V. Angelopoulos, Q. Lu and J. Liu, J. Geophys. Res. 121, 4269 (2016).
80. A. G. Frank A. G., Artemyev A. V., Lu S, X-J. Zhang, and N.P. Kyrie, Plasma Phys. Control. Fusion 65, 095006 (2023).
81. Л. А. Душин СВЧ-интерферометры для измерения плотности плазмы (М.: Атомиздат, 1973).
82. С. Ю. Богданов, Н. П. Токаревская, А. Г. Франк, А. З. Ходжаев, Физика плазмы 1, 133 (1975).
83. А. В. Чернетский, О. А. Зиновьев, О. В. Козлов Аппаратура и методы плазменных исследований (М.: Атомиздат, 1965).
84. Н. П. Кирий, В. С. Марков, С. И. Сыроватский, А. Г. Франк, А. З. Ходжаев, Труды ФИАН 110, 121 (1979).
85. С. Ю. Богданов, Ю. Ф. Бондарь, В. Б. Бурилина, Н. П. Кирий, В. С. Марков, Г. П. Мхеидзе, А. А. Савин, А. Г. Франк, ЖТФ 64(9), 30 (1994).
86. С. Ю. Богданов, В. Б. Бурилина, Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. И. Морозов, А. Г. Франк, Физика плазмы 24, 467 (1998).
87. С. Ю. Богданов, В. Б. Бурилина, А. Г. Франк, ЖЭТФ 114, 1202 (1998).
88. А. Г. Франк, Н. П. Кирий, В. С. Марков, Физика плазмы 45, 32 (2019).
89. А. Г. Франк, С. А. Савинов, Физика плазмы 46, 830 (2020).
90. В. Б. Бурилина, В. С. Марков, А. Г. Франк, Физика плазмы 21, 36 (1995).
91. Шт. Бюшер, Н. П. Кирий, Х. -Й. Кунце, А. Г. Франк, Физика плазмы 25, 185 (1999).
92. В. П. Гавриленко, Н. П. Кирий, А. Г. Франк, Оптика и спектроскопия 87, 916 (1999).
93. В. П. Гавриленко, Н. П. Кирий, А. Г. Франк, Физика плазмы 26, 282 (2000).
94. В. П. Гавриленко, Н. П. Кирий, А. Г. Франк, Физика плазмы 29, 476 (2003).
95. A. G. Frank, V. P. Gavrilenko, N. P. Kyrie, and E. Oks, J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys. 39, 5119 (2006).
96. Г. С. Воронов, Н. П. Кирий, В. С. Марков, Г. В. Островская, А. Г. Франк, Физика плазмы 34, 1080 (2008).

97. *Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Д. Г. Васильков, Е. В. Воронова*, Физика плазмы 42, 563 (2016).
98. *A. G. Frank, N. P. Kyrie*, Plasma Phys. Reports 43, 696 (2017).
99. *А. Г. Франк, Н. П. Кирий, В. С. Марков, Е. В. Воронова*, Физика плазмы 44, 483 (2018).
100. *Н. П. Кирий, С. А. Савинов*, Краткие сообщения по физике ФИАН 2, 25 (2021).
101. *N. P. Kyrie, S. A. Savinov*, Plasma Phys. Reports 47, 611 (2021).
102. *Н. П. Кирий, А. Г. Франк, А. Р. Мингалева, Т. Б. Мавлюдов, К. В. Шпаков, И. С. Байдин*, Физика плазмы 48, 1035 (2022).
103. *Н. П. Кирий, Д. Е. Харлачев, К. В. Шпаков*, Физика плазмы 49, 1092 (2023).
104. *Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк*, Письма в ЖЭТФ 48, 419 (1988).
105. *Г. С. Воронов, Н. П. Кирий, А. Г. Франк*, Физика плазмы 28, 1004 (2002).
106. *A. G. Frank, V. P. Gavrilenko, Ya. O., Ispolatov, N. P. Kyrie, and E. Oks*, Contributions to Plasma Phys. 36, 667 (1996).
107. *R. Nakamura, W. Baumjohann, C. Mouikis, L. M. Kistler, A. Runov, M. Volwerk, Y. Asano, Z. Vörös, T. L. Zhang, B. Klecker, H. Rème, and A. Balogh*, Geophys. Res. Lett. 31, 9804 (2004).
108. *L. Juusola, S. Hoilijoki, Ya. Pfau-Kempf, U. Ganse, R. Jarvinen, M. Battarbee, E. Kilpua, L. Turc, and M. Palmroth*, Ann. Geophys. 36, 1183 (2018).
109. *M. Hoshino, T. Mukai, I. Shinohara, Y. Saito, and S. Kokubun*, J. Geophys. Res. 105, 337 (2000).
110. *N. K. Walia, K. Seki, T. Amano*, J. Geophys. Res. 127, 30066 (2022).
111. <https://www.nanoscan.su>.

DYNAMIC PROCESSES IN CURRENT SHEETS AND EXPERIMENTAL LABORATORY ASTROPHYSICS

**A. G. Frank^a, N. P. Kyrie^a, S. A. Savinov^b, I. R. Nugaev^{a,*},
D. E. Kharlachev^a, V. A. Ivanov^a, V. D. Stepakhin^a**

^a*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: gfnov@mail.ru*

The results of experimental research of the dynamics of current sheets, which are formed in laboratory experiments at the IOF RAS, are presented as a brief review. It is shown that the most significant features of phenomena like solar flares can be reproduced in laboratory conditions. These features include the relatively slow accumulation of the magnetic energy in the course of the current sheet formation, the rapid release of the energy during the disruption of the current sheet, acceleration of plasma flows, ultrafast plasma heating, and effective particle's acceleration. A qualitative similarity has been established between the basic characteristics of current sheets in the tail region of the Earth's magnetosphere and in laboratory conditions. A comparison of a number of fundamental dimensionless parameters indicates the possibility of quantitative laboratory modeling of processes occurring in the magnetosphere. It is concluded that experimental research of the dynamics of current sheets and magnetic reconnection processes represent one of the promising areas of the laboratory astrophysics.

Keywords: plasma, current sheet, dynamic processes, magnetic reconnection, laboratory experiments, solar flares, Earth magnetosphere