

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ И ДИНАМИКИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ КАК НАПРАВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ АСТРОФИЗИКИ

© 2023 г. А. Г. Франк^{1,*}, Н. П. Кирий¹, В. А. Иванов¹, С. А. Савинов², А. В. Огинов²,
А. Р. Мингалеев², К. В. Шпаков², И. Р. Нугаев¹, Д. Е. Харлачев¹, В. Д. Степахин¹

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

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

*e-mail: annfrank@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 13.10.2023 г.

После доработки 28.11.2023 г.

Принята к публикации 20.12.2023 г.

Представлен обзор развития в ИОФ РАН экспериментальных исследований по физике плазменных токовых слоев в сильных магнитных полях. Проведен анализ наиболее значимых результатов и определены основные физические закономерности динамики токовых слоев. Формирование токового слоя сопровождается накоплением магнитной энергии в окрестности слоя. Затем процессы магнитного пересоединения и разрыв слоя могут приводить к быстрому высвобождению этой энергии, ускорению и нагреву плазмы, генерации высокоэнергичных электронов. На основе анализа экспериментальных данных установлена физическая аналогия между характерными явлениями при вспышечных процессах в лабораторных токовых слоях и в космической плазме. Сформулированы предложения по разработке проекта развития исследований физики плазменных токовых слоев в Национальном центре физики и математики (НЦФМ). Планируется создание нового экспериментального стенда со значительно более высокими параметрами, с использованием диагностического комплекса на основе современных технических достижений. Этот проект на новом уровне открывает перспективы экспериментального моделирования явлений вспышечного типа в плазме солнечной короны и магнитосферы Земли, а также создаст возможности для предсказания таких явлений.

DOI: 10.56304/S2949609823020065, EDN: VBXZWN

ВВЕДЕНИЕ

Процессы магнитного пересоединения в токовых слоях лежат в основе многих нестационарных явлений в космической и лабораторной плазме, которые сопровождаются преобразованием энергии магнитного поля в кинетическую и тепловую энергию плазмы, в потоки высокоэнергичных частиц и излучений [1–4]. Сравнительно тонкие токовые слои, в которых сконцентрирован электрический ток, служат границей раздела магнитных полей противоположных или различающихся направлений [1, 3, 5, 6]. В окрестности токовых слоев сосредоточен значительный запас магнитной энергии, которая при определенных условиях может трансформироваться в энергию плазмы и ускоренных частиц.

В целенаправленных экспериментах, поставленных в ряде лабораторий мира, изучается эволюция и детальная структура токовых слоев, основные параметры плазмы, токов и магнитных полей [7–18]. Экспериментальные исследования проводятся в контролируемых и воспроизводимых условиях, с применением современных методов диагностики плазмы. Изменение условий эксперимента в широких пределах позволяет создавать различные магнитоплазменные конфигурации и моделировать разнообразные явления, которые происходят в космическом пространстве

1. НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ДИНАМИКЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫЕ К НАСТОЯЩЕМУ ВРЕМЕНИ В ИОФ РАН

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 данных проблем в работах С.И. Сыроватского [1, 19, 20].

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 [21–23]. 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.

Первые эксперименты, ориентированные на изучение возможностей ускорения заряженных частиц в результате процессов магнитного пересоединения в токовом слое, были проведены в 2D магнитных полях с нулевой линией, в плазме плотностью $N_e \approx 10^{12}–10^{13} \text{ см}^{-3}$ [24]. Однако при возбуждении электрического тока в относительно редкой плазме резко уменьшалась проводимость из-за развития плазменных неустойчивостей (аномальная турбулентная проводимость). При этом ключевое условие, необходимое для накопления магнитной энергии – замороженность магнитного поля в плазму – выполнить не удалось, т.е. на этом этапе результат оказался отрицательным.

Проблема замороженности магнитного поля и значительного увеличения проводимости плазмы (до значения $\sigma \approx 2 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$) была решена путем увеличения начальной концентрации плазмы на основе предложенной системы создания плазмы с помощью индукционного тэта-разряда с предварительной ионизацией четырьмя искровыми инжекторами [21]. В результате при формировании токового слоя было получено значительное увеличение плотности магнитной энергии, т.е. реализована кумуляция магнитной энергии при формировании токового слоя [9]. В этих экспериментах было также доказано, что в окрестности нулевой линии магнитного поля формируется именно нейтральный токовый слой, согласно С.И. Сыроватскому, рис. 2 [25], а не течение Петчека, см. [1–3].

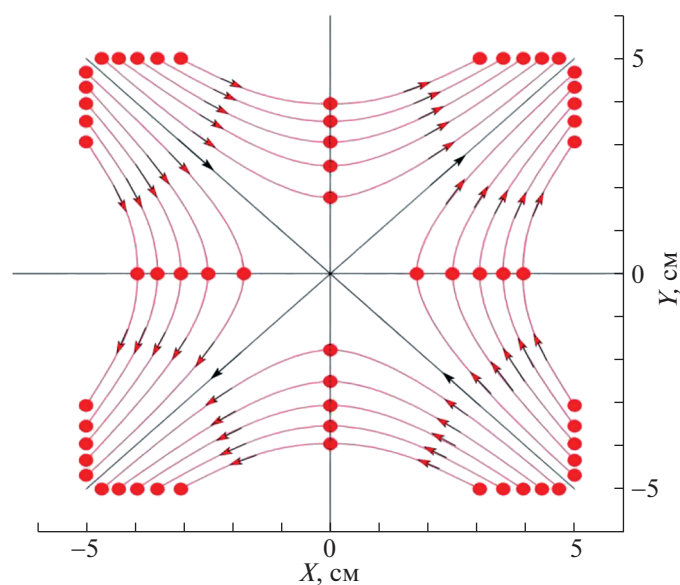


Рис. 1. Структура магнитного поля с нулевой линией X -типа.

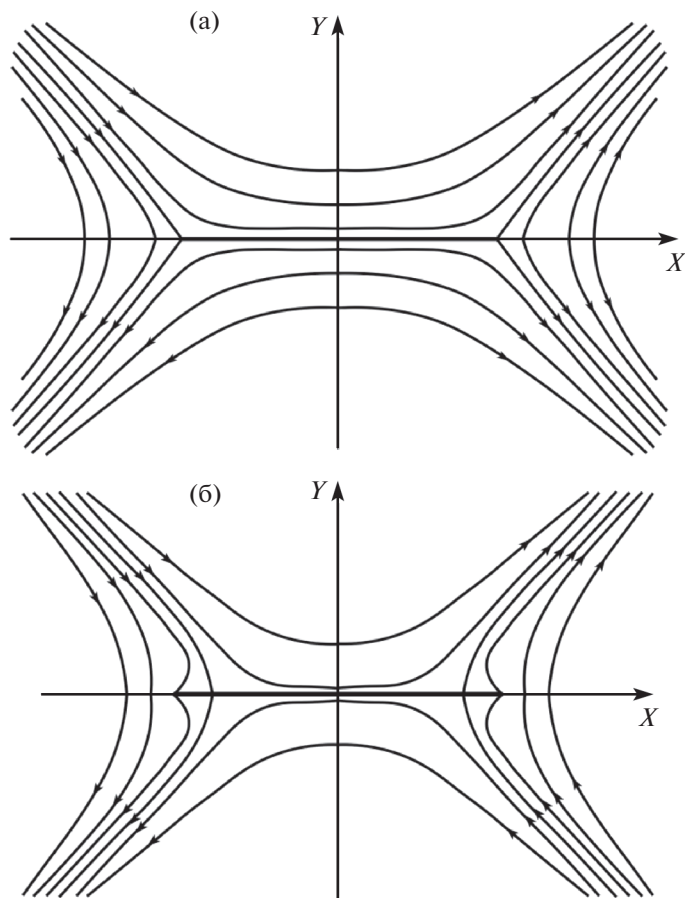


Рис. 2. Структура магнитного поля в окрестности бесконечно тонких нейтральных токовых слоев (показаны жирной линией): (а) электрический ток имеет одно направление в пределах всего слоя; (б) у боковых краев слоя присутствуют токи обратного направления [25].

Следующая проблема состояла в реализации возможностей высвобождения магнитной энергии, сконцентрированной в окрестности токового слоя, что должно приводить к генерации импульсных электрических полей и ускорению заряженных частиц, т.е. необходимо было осуществить разрыв токового слоя. С этой целью была сконструирована и создана следующая экспериментальная установка семейства “Токовый слой”, ТС-3 [22], с помощью которой удалось получить соотношение ширины и толщины токового слоя ≈ 10 [26, 27]. На рис. 3 приведены 2D-распределения концентрации плазмы в токовом слое в последовательные моменты времени, полученные методом кино-голографии [28, 29].

Согласно теоретическим представлениям, для развития tearing-неустойчивости и, как следствие, для разрыва токового слоя, необходимо, чтобы соотношение двух поперечных размеров токового слоя, т.е. ширины слоя к его толщине, превышало величину $\Delta x/\Delta y \geq 2\pi$ [30, 31]. Однако в результате проведенных экспериментов было обнаружено, что в течение всего времени наблюдения разрыва слоя не происходит, и для протяженного токового слоя характерна высокая стабильность [26, 27]. Этот результат исключительно важен с точки зрения астрофизических приложений, так как обеспечивает возможность накопления значительного запаса магнитной энергии в окрестности токового слоя [32].

Тем не менее, на основе ряда теоретических соображений и цикла проведенных экспериментов удалось найти такие начальные условия, при которых в токовом слое спонтанно возникала и развивалась быстрая перестройка структуры магнитного поля, приводившая к разрыву слоя [12, 27]. Было установлено, что в процессе разрыва слоя, рис. 4а,б, происходит резкое изменение распределений, как тока, так и плазмы [23, 33], а также наблюдаются импульсный нагрев электронов и ионов, появление быстрых потоков плазмы, возбуждение индукционных электрических

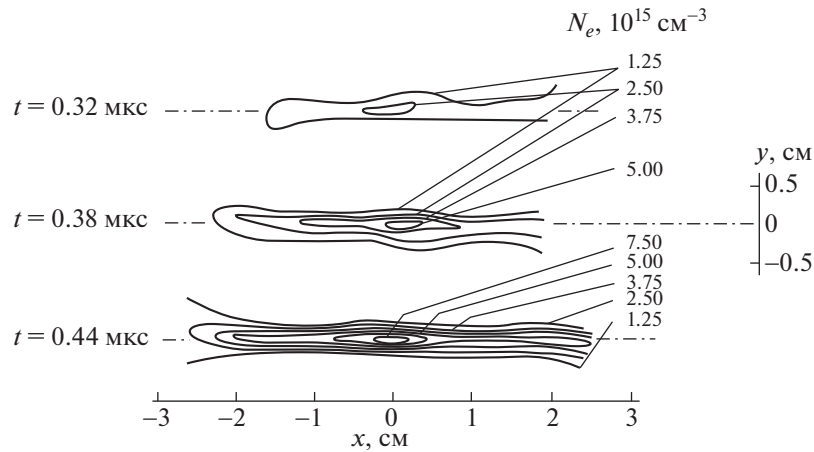


Рис. 3. Распределения концентрации электронов в последовательные моменты времени, в процессе формирования токового слоя. К моменту $t = 0.44$ мкс формируется протяженный слой плазмы. Измерения проведены методом киноголографической интерферометрии [29].

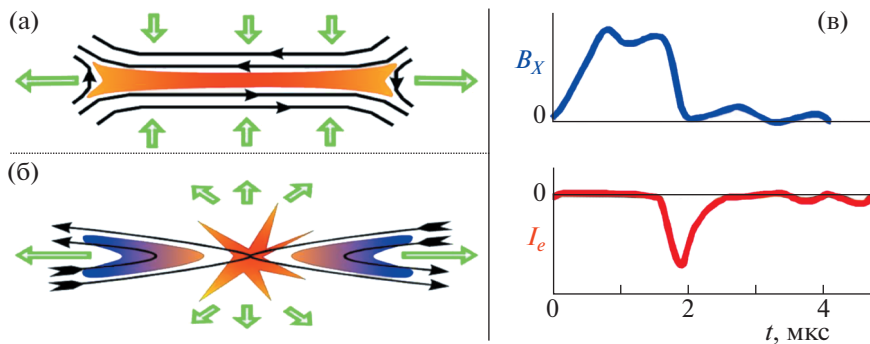


Рис. 4. Схема разрыва токового слоя (а, б) и ускорение электронов при разрыве слоя (в). Метастабильный токовый слой и 2D-течения плазмы в окрестности слоя (а); пересоединение магнитных силовых линий в центре токового слоя и разрыв слоя (б); изменения во времени тангенциальной компоненты магнитного поля B_x и тока ускоренных электронов I_e с энергией $E_e \geq 10$ кэВ (в) [35].

полей, генерация ускоренных заряженных частиц с энергией ≥ 10 кэВ, рис. 4в [34, 35]. Непосредственно перед началом импульсной фазы пересоединения (разрыва слоя) в ряде режимов был обнаружен быстрый рост температуры электронов (до ≈ 100 эВ) и ионов (до ≈ 300 эВ) в “горячих точках” токового слоя [36, 37], что указывало на существенную роль тепловых процессов в качестве триггерного механизма разрыва токового слоя [38].

Таким образом, в экспериментах, проведенных на установке ТС-3, были воспроизведены в лабораторных условиях основные черты вспышечного процесса: накопление магнитной энергии путем формирования метастабильного токового слоя, последующий быстрый разрыв слоя с преобразованием магнитной энергии в тепловую и кинетическую энергию плазмы и потоки ускоренных частиц [39]. На основе сопоставления МГД безразмерных параметров было показано, что основные условия, характерные для предвспышечной ситуации на Солнце, воспроизводятся в рамках ограниченного моделирования в экспериментах на установках “Токовый слой” [40, 41].

Следующий этап экспериментальных исследований был направлен на выяснение возможностей формирования токовых слоев и кумуляции магнитной энергии в плазме в 3D магнитных конфигурациях, а также изучение особенностей эволюции и структуры формируемых токовых слоев. Актуальность данной проблемы заключается в том, что как в природе, так и в установках с лабораторной плазмой (например, в токамаках) магнитные конфигурации являются трехмерными [42]. Для этих исследований была разработана, сконструирована и создана эксперимен-

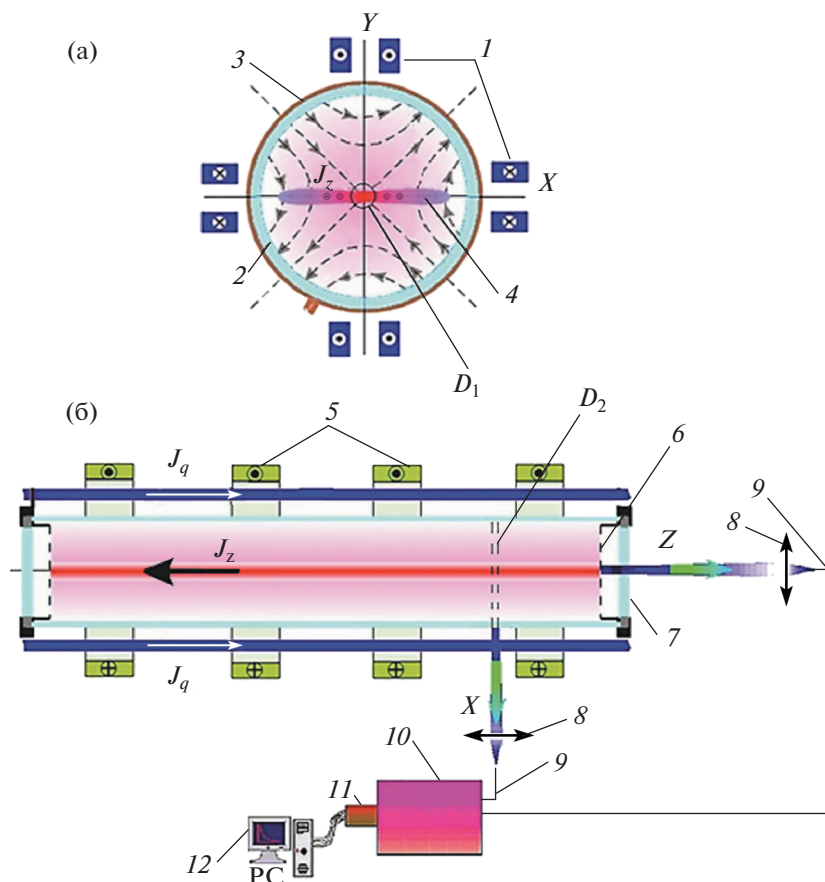


Рис. 5. Схема экспериментальной установки ТС-3D: (а) — поперечное сечение, (б) — вид сбоку. 1 — система прямых проводников с токами J_q для создания 2D магнитного поля в плоскости (x, y) с нулевой линией на оси z ; 2 — вакуумная камера; 3 — витки тэта-разряда для создания начальной плазмы; 4 — токовый 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.

тальная установка следующего поколения, ТС-3D, в которой можно создавать 3D магнитные поля различной структуры [43–45].

Принципиальная схема установки ТС-3D показана на рис. 5. Суперпозиция двух квазистационарных магнитных полей, обладающих различными типами симметрии, формирует исходную магнитную конфигурацию с особой линией на оси z :

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

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} торр. 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} см $^{-3}$ [21].

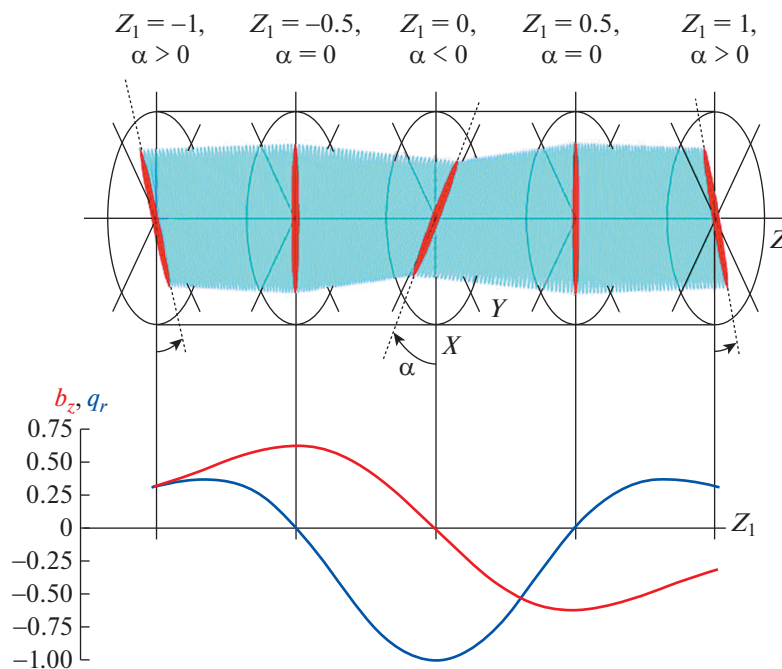


Рис. 6. Структура изогнутого токового слоя, сформированного в 3D магнитном поле с нулевой точкой, расположенной при $(Z_1 = 0)$. Токовый слой образуется как в окрестности нулевой точки, так и вдали от нее, в областях с сильной продольной компонентой магнитного поля B_z . Угол α характеризует отклонение токового слоя от его положения в 2D магнитном поле с нулевой линией на оси Oz . Здесь R_c – радиус вакуумной камеры; $Z_1 = z/R_c$; $b_z = B_z(0, 0, z)/B_z^{\max}$; $q_r = h_r(0, 0, z)/h_r^{\max}$ [47].

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 $J_z^0 \approx 46\text{--}50$ 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 3D магнитных конфигураций возможно формирование квазиодномерных токовых слоев, рис. 6. Необходимым условием образования токового слоя является наличие в 3D магнитном поле особой линии X-типа, с поперечной структурой типа “седло”, рис. 1 [46–48].

В 3D магнитных конфигурациях обнаружено уменьшение степени сжатия в слой тока и плазмы по мере увеличения продольной компоненты магнитного поля B_z^0 , направленной вдоль X-линии [45, 49, 50]. Показано, что этот эффект обусловлен усилением продольной компоненты магнитного поля в пределах токового слоя на величину $\approx 10^3$ Гс [51].

Установлено, что на начальной стадии эволюции токовых слоев происходит возбуждение токов Холла [52, 53], образующих в плоскости перпендикулярной направлению основного тока в слое четыре замкнутых контура, которые создают дополнительное продольное магнитное поле квадрупольного типа [54]. В результате возбуждения токов Холла, а также при усилении в слое продольной компоненты магнитного поля структура токов в пределах токового слоя становится трехмерной [55].

В токовых слоях, формируемых в установке ТС-3D, обнаружена генерация направленных потоков плазмы, которые движутся от середины токового слоя к его обоим боковым краям вдоль ширины, или большего поперечного размера слоя, рис. 7 [56, 57]. Энергии плазменных потоков могут достигать значений $\approx 400\text{--}900$ эВ, что значительно превышает тепловую энергию ионов плазмы $\approx 50\text{--}100$ эВ [58].

Установлено, что генерация сверхтепловых потоков плазмы происходит под действием сил Ампера [59, 60], причем направленное движение плазмы начинается после затухания токов Холла

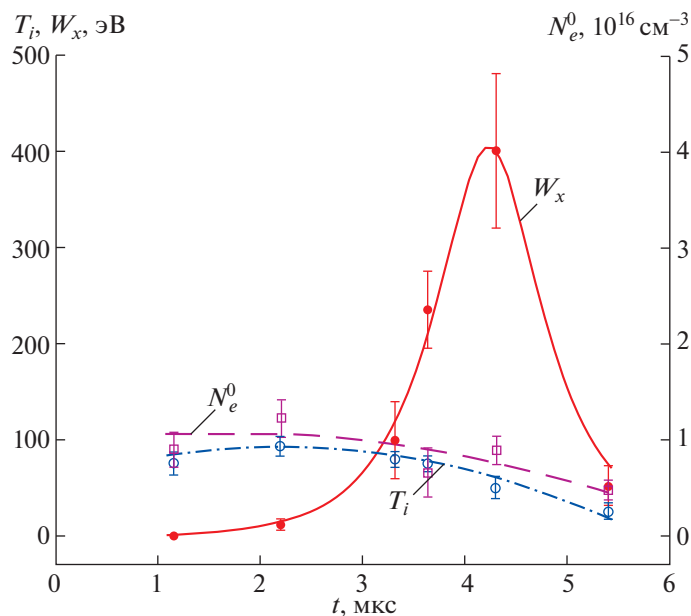


Рис. 7. Зависимости от времени концентрации электронов N_e^0 и температуры ионов гелия T_i в центральной области токового слоя, а также энергии направленного движения ионов гелия W_x вдоль поверхности токового слоя. Условия эксперимента: $n_e, p = 320$ мТорр, $B_z = 0$, $h = 0.5$ кГс/см, $J_z^{\max} = 49$ кА [57].

ла [61]. 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 [62–64]. 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 [59, 61]. Появление обратных токов обусловлено движением плазменных потоков в поперечном магнитном поле, что приводит к возбуждению индукционных электрических полей [61]. При этом в областях с обратными токами изменяется направление сил Ампера, т.е. возникают силы торможения, рис. 8 [65], которые и ограничивают длительность существования высокоскоростных потоков плазмы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИНАМИКИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ И ЛАБОРАТОРНАЯ АСТРОФИЗИКА

Представления о том, что результаты лабораторных экспериментов могут быть использованы для анализа и интерпретации явлений в космическом пространстве, обсуждались в литературе, начиная с работ Альфвена и Фельтхаммара [66], а также во многих более поздних работах [67–70] и цитированной в этих работах литературе. Для корректного сопоставления физических процессов в разнообразных астрофизических объектах, с одной стороны, и в лабораторных экспериментах, с другой стороны, был предложен принцип “ограниченного моделирования” [66, 71–73].

С помощью сравнительно малогабаритных лабораторных установок фундаментальные свойства процессов магнитного пересоединения в токовых слоях исследуются в США, Японии, Германии, Китае, см. [67–69] и цитированную там литературу.

Как отмечалось выше, эксперименты, проведенные на установках “Токовый слой” в ФИАН (до 1983 г.) и затем в ИОФ РАН, продемонстрировали наиболее существенные черты, характерные для вспышечных процессов в плазме [74, 75]. 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. Аналогия со вспышками в короне Солнца подчеркивается и в названии статьи С.И. Сыроватского “Солнечные вспышки в лаборатории” [76].

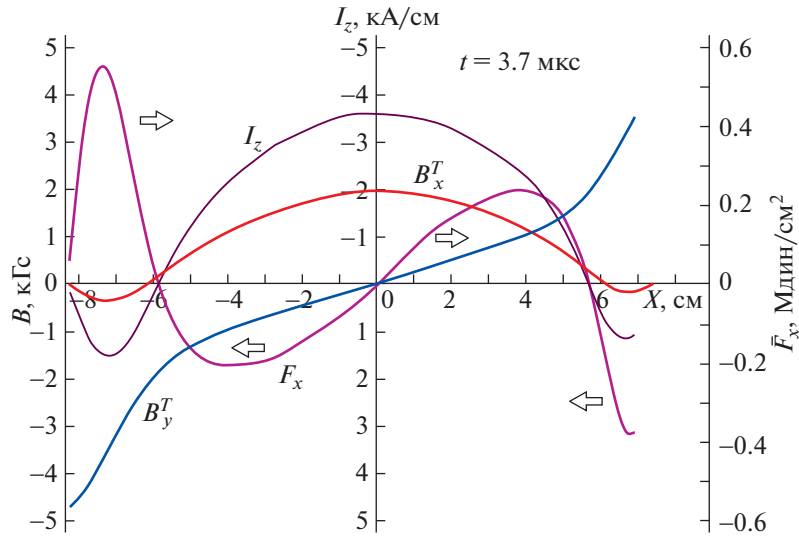


Рис. 8. Распределения тангенциальной $B_x^T(x)$ и нормальной $B_y^T(x)$ компонент магнитного поля токового слоя, линейного тока $I_z(x)$ и сил Ампера $F_x(x)$ в области $|y| \leq 0.8$ см в момент времени $t = 3.7$ мкс. Токковый слой формировался в Аг. Направления сил Ампера $F_x(x)$ показаны двойными стрелками [65].

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) [77–82]. Анализ структуры магнитных полей в “хвостовой” области магнитосферы Земли и в лабораторных экспериментах свидетельствует, 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 слабой компоненты магнитного поля, ориентированной по нормали к поверхности слоя, характерно как для магнитосферы, так и для лабораторных условий. Возникновение в токовых слоях продольной компоненты квадрупольной структуры свидетельствует о генерации токов Холла.

При развитии токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях, которые с самого начала содержали продольную компоненту, было обнаружено усиление продольной компоненты в пределах слоя по сравнению с фоновым уровнем [51]. Усиление продольной компоненты магнитного поля в лабораторном токовом слое происходит вместе со сжатием в слой основного тока. Можно предполагать, что подобный процесс может приводить к усилению продольной компоненты 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 лабораторных токовых слоях было обнаружено, что генерация токов обратного направления у боковых концов слоя приводит к появлению сил торможения, которые ограничивают длительность плазменных потоков [61, 64, 65]. В магнитосферном токовом слое также регистрируются обратные токи, которые должны воздействовать на динамику потоков плазмы [82]. Отсюда следует, что регистрируемое многими спутниковыми миссиями замедление и разрушение высокоскоростных потоков плазмы, которые распространяются по направлению к Земле, может 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.

Таблица 1. Характеристики токовых слоев в хвостовой области магнитосферы Земли и в лабораторных экспериментах на установке ТС-3D [79]

	Параметр	Токовые слои в магнитосфере	Токовые слои в установке ТС-3D
Основные экспериментальные параметры	B , Гс	$(1-3) \times 10^{-4}$	$(2-3.5) \times 10^3$
	N_e , см^{-3}	0.1–1	$(0.5-1.5) \times 10^{16}$
	T_i , эВ	10^3-10^4	40–60
	T_e , эВ	10^2-10^3	10–15
	L , см	$10^7-3 \times 10^8$ (100–3000 км)	0.7–1.6
	$\mu = M_i/M_p$	1, иногда присутствуют ионы кислорода (до 30%) с $\mu = 16$	40
Электронная компонента	Z_i	1	1.5
	j , $\text{А}/\text{см}^2$	$5 \times 10^{-13}-10^{-11}$	$(1.5-4.0) \times 10^3$
	τ , с	∞ ($\sim 10^{14}$)	6×10^{-6}
	ω_{0e} , с^{-1}	5.6×10^4	$(4-7) \times 10^{12}$
	ω_{ce} , с^{-1}	3.5×10^3	$(3.5-6.2) \times 10^{10}$
	ν_e , с^{-1}	$\sim 10^{-13}$	$(0.4-2.0) \times 10^{10}$
	ν_{Te} , $\text{см}/\text{с}$	$(0.4-1.3) \times 10^9$	$(1.3-1.6) \times 10^8$
	ρ_e , см	$\sim 3 \times 10^5$ (3 км)	$(2.5-4.0) \times 10^{-3}$
	r_D , см	$\sim 2 \times 10^4$ (0.2 км)	3×10^{-5}
	Ионная компонента	Ω_{0i} , с^{-1}	1.3×10^3
Ω_{ci} , с^{-1}		$\sim 1-2$	$(0.7-1.3) \times 10^6$
$\tau_i = 2\pi/\Omega_{ci}$, с		3–6	$(5-9) \times 10^{-6}$
ν_i , с^{-1}		10^{-12}	$\approx 10^7$
ν_{Ti} , $\text{см}/\text{с}$		$(3-10) \times 10^7$	$(1-1.2) \times 10^6$
ν_A , $\text{см}/\text{с}$		$(1-3) \times 10^7$	$(0.8-1.6) \times 10^6$
ρ_i , см		4×10^7 (400 км)	1–1.4
$d_i = c/\Omega_{0i}$, см		2.3×10^7 (230 км)	1–1.7
u_c , $\text{см}/\text{с}$		$5 \times 10^6-5 \times 10^7$	$(1.5-3) \times 10^6$
$j_0 = eN_e\nu_{Ti}$, $\text{А}/\text{см}^2$		$2 \times 10^{-13}-2 \times 10^{-11}$	$(2-3) \times 10^3$
Безразмерные параметры	L/r_D	$3 \times 10^2-10^4$	$(2-3) \times 10^4$
	$L \cdot \Omega_{0i}/c$	$\approx 0.5-10$	≈ 1
	L/ρ_i	$\approx 0.25-5$	0.7–1.6
	u_c/ν_A	0.3–3	≈ 1.5
	j/j_0	≈ 1	≈ 1

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 [79], см. таблицу 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.

Таким образом, экспериментальные исследования динамики токовых слоев и процессов магнитного пересоединения следует рассматривать как одно из перспективных направлений лабораторной астрофизики.

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТС-3D

В последнее время была проведена реконструкция, а также значительное обновление экспериментальной установки ТС-3D. Был заменен ряд элементов системы откачки вакуумной камеры. Создана новая система запуска четырех плазменных инжекторов, предназначенных для предварительной ионизации рабочего газа перед включением тэта-разряда. Проведена оптимизация работы высоковольтных систем установки. Обновлены соединительные элементы в конденсаторных батареях, которые используются для формирования квазистационарных магнитных полей: 2D магнитного поля с нулевой линией ($W = 73$ кДж) и продольного магнитного поля ($W = 185$ кДж). Изготовлены новые разрядники для коммутации работы высоковольтного ($U \approx 40\text{--}45$ кВ) тэта-разряда и высоковольтной ($U \leq 25$ кВ) системы возбуждения в плазме основного тока ($J \approx 40\text{--}60$ кА). Заменены трансформаторы для запуска коммутирующих элементов (игнитроны и разрядники) всех систем установки.

4. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ТОКОВОГО СЛОЯ И ПЛАЗМЫ

4.1. СВЧ диагностика для определения размеров начальной плазмы и измерения скоростей периферийной плазмы токового слоя

Методы СВЧ диагностики будут использованы для оценки эффективности работы тэта-разряда, а именно, для определения диапазона условий (структура магнитных полей, давление и род газа), в которых может быть создана начальная плазма с помощью высоковольтного тэта-разряда. Поперечные размеры начальной плазмы будут определяться на основе измерений фазометром, рис. 9, который регистрирует изменения во времени фазы отраженной СВЧ волны путем сравнения ее с фазой опорной волны [83–85].

Если концентрация электронов плазмы превышает критическую концентрацию для СВЧ волны с круговой частотой ω :

$$N_e > N_c = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}, \quad (2)$$

то регистрируется СВЧ сигнал, отраженный от областей плазмы с плотностью $N_e \approx N_c$ [86]. 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, см. [87]. Суммарный набег фазы, полученный при распаде начальной плазмы, позволяет определить размер плазмы, которая была создана с помощью тэта-разряда [85].

В качестве СВЧ генератора будет использована лампа обратной волны, работающая в непрерывном режиме на длине волны $\lambda = 4$ мм ($N_c = 7.1 \times 10^{13}$ см⁻³). В качестве приемно-излучающих антенн будут использоваться пирамидальные рупоры или диэлектрические антенны из фторопласта.

На основании измерений с помощью фазометра будет получена важная информация 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.

4.2. Регистрация изображений плазмы токового слоя в свете различных спектральных линий

Эта методика дает возможность получить изображения плазмы с помощью узкополосных интерференционных фильтров, прозрачных в области разных спектральных линий, излучаемых плазмой. В методике соединяются достоинства фотографических и спектроскопических методов диагностики плазмы. Фотографические методы очень наглядны, однако получаемая с их помощью информация носит, как правило, качественный характер. Спектроскопические методы дают возможность получать количественную информацию о разных параметрах плазмы, однако достигнуть высокого пространственного разрешения этими методами часто бывает трудно.

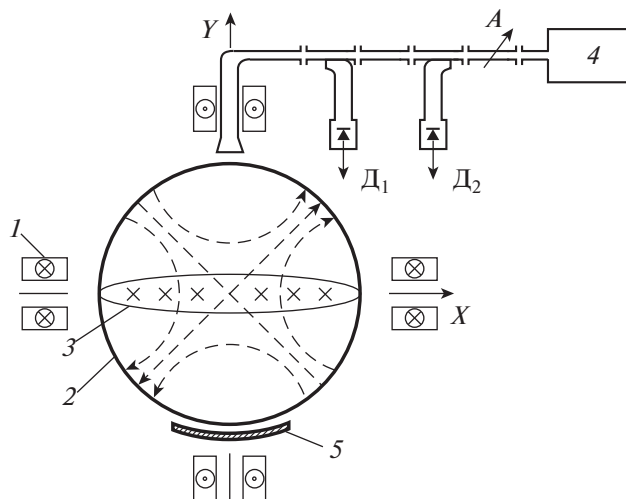


Рис. 9. Схема СВЧ измерений на установке “Токовый слой”: 1 – проводники квадрупольного магнитного поля; 2 – вакуумная камера; 3 – токовый слой; 4 – СВЧ генератор; 5 – зеркало; А – аттенюатор, Д₁ и Д₂ – направленные ответвители и детекторы [22].

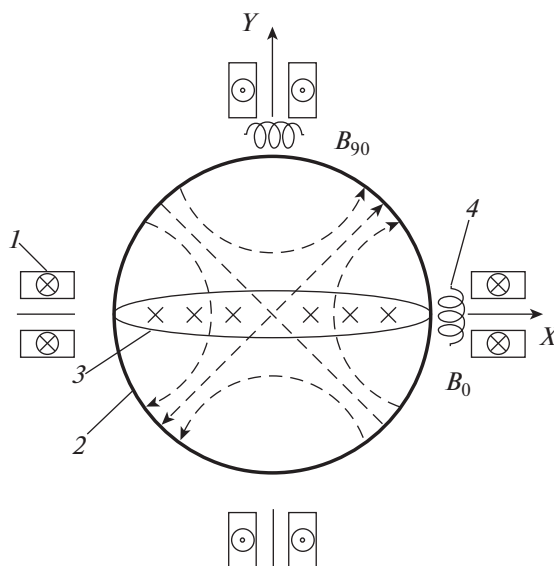


Рис. 10. Схема измерений внешними магнитными зондами на установке ТС-3Д: 1 – проводники квадрупольного магнитного поля; 2 – вакуумная камера; 3 – токовый слой; 4 – магнитные зонды B_{90} и B_0 [92].

Данная методика [88] была применена для исследования пространственно-временной эволюции свечения плазмы токовых слоев. В результате впервые были зарегистрированы 2D-распределения интенсивности собственного излучения плазмы токовых слоев в различных спектральных линиях в последовательные моменты времени [89–91].

В настоящих экспериментах, метод интерференционных фильтров будет использован, прежде всего, для определения структуры начальной плазмы. Для этого будут получены изображения начальной плазмы с помощью интерференционных фильтров, максимум пропускания которых соответствует характерным спектральным линиям излучения плазмы. 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 Ne I 585.2 нм и 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, о распределении температуры электронов в плазме тэта-разряда.

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

Узкополосные интерференционные фильтры планируется использовать в комбинации с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) в режиме регистрации изображения. Наш опыт работы свидетельствует о том, что узкополосные интерференционные фильтры должны иметь характерные ширины полосы пропускания порядка $\Delta\lambda_{0,5} = 1-1.5$ нм и $\Delta\lambda_{0,1} = 2.5-4.5$ нм (по уровню $0.5\tau_{\max}$ и $0.1\tau_{\max}$, где τ_{\max} – максимальный уровень пропускания) для того, чтобы в полосу пропускания не попадали блиндирующие линии.

4.3. Метод измерения структуры и эволюции токовых слоев внешними магнитными зондами

Подробная информация о магнитной структуре метастабильных токовых слоев и характере их симметрии была получена при измерениях внутри плазменного объема в экспериментах на нескольких установках “Токовый слой” [9, 12, 16, 21–24, 27, 39, 45, 51, 54, 55, 59, 61, 65]. Существенно, что при формировании токового слоя в магнитном поле с X-линией положение слоя четко фиксировано в пространстве, и слой обладает симметрией относительно плоскостей ($x = 0$) и ($y = 0$). При этом ширина слоя $2\Delta x$, т.е. больший поперечный размер, обычно превышает толщину слоя $2\Delta y$, т.е. меньший поперечный размер, практически на порядок величины: $\Delta x \gg \Delta y$.

При измерениях магнитного поля вне плазменного объема, при $R \gg \Delta y$, можно считать слой достаточно тонким и учитывать только распределение поверхностной плотности тока вдоль ширины слоя, $I_z(x) = \int j_z(x, y) dy$. Наибольшая разница между магнитными полями, создаваемыми токовым слоем, должна наблюдаться в том случае, когда поля регистрируются на одинаковом расстоянии R от X-линии, в одной плоскости ($z = \text{const}$), но в двух точках с различным азимутальным положением: $\phi = 0$ ($x = R, y = 0$) и $\phi = 90^\circ$ ($x = 0, y = R$). При ($\phi = 90^\circ$) азимутальное магнитное поле B_ϕ имеет минимальное значение, а при ($\phi = 0$) – максимальное, и это различие зависит от ширины токового слоя.

Соответствующие вычисления [92], проведенные на основе распределений линейной плотности тока, полученных экспериментально [59], продемонстрировали возможность определения ширины токового слоя при измерении магнитных полей вне вакуумной камеры. Наиболее точные результаты могут быть получены при использовании соотношения

$$\beta = (B_0 - B_{90}) / (B_0 + B_{90}) \quad (3)$$

с учетом величины полного тока $J_z = \int I_z(x) dx$, протекающего в плазме токового слоя [92].

Таким образом, на основе измерений магнитных полей в двух точках, разнесенных по азимуту, $B_0(t)$ и $B_{90}(t)$, вычисления функции $\beta(t)$ и измерения полного тока плазмы $J_z(t)$ можно с достаточной точностью определять ширины токовых слоев и их изменения во времени при формировании токовых слоев в различных условиях [89, 90, 93].

Особый интерес представляет возможность на основе измерений магнитных полей вне камеры детектировать такие динамические процессы, как переход к импульсной фазе магнитного пересоединения, т.е. к разрыву токового слоя, не оказывая при этом влияния на процессы в плазме. Проведенные вычисления показали, что параметр $\beta(t)$ весьма чувствителен к возникновению разрыва слоя [92], что позволит 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.

Следует также отметить, что измерения внешними магнитными зондами имеют неоспоримые технологические преимущества, в том числе возможность значительного увеличения отношения сигнал–шум.

4.4. Методы спектроскопии и определение основных параметров плазмы токовых слоев

При изучении физики токовых слоев широко используются спектральные методы, которые позволяют определить параметры плазмы в различных пространственных областях токовых слоев, не внося возмущений в плазменный объем. Разнообразные методы спектроскопии помогают определить как температуры электронов, атомов, ионов и скорости направленных движений

плазмы, так и плотность плазмы в различных пространственных областях и/или напряженности аномальных электрических полей [56–64, 94–106]. Методами спектроскопии было обнаружено резкое увеличение температур ионов и электронов непосредственно перед началом импульсной фазы магнитного пересоединения [36, 37, 107, 108], что свидетельствует о “тепловом триггере” этого явления [38]. Были зарегистрированы также турбулентные электрические поля в “горячей фазе” вспышечного процесса, развивающегося в плазме токового слоя [109].

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 [56–58, 62–64, 82, 104, 106], так и в магнитосфере Земли [110–113]. 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 [82].

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, приемником излучения в камере служит CCD-матрица. Камера позволяет регистрировать спектры с экспозицией 0.1–10 мкс [114].

5. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИНАМИКЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ИОФ РАН

1. При проведении экспериментов, связанных с формированием 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 будут выполнены необходимые исследования и проведен анализ начальных условий, в которых с помощью высоковольтного 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 продольной компоненты B_z^0 , а также род газа, наполняющего вакуумную камеру, и давление газа.

2. Эксперименты по изучению эволюции токовых слоев, сформированных в магнитных полях с X -линией в высокопроводящей плазме, 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.

3. Будут продолжены исследования генерации сверхтепловых потоков плазмы, ускоренных в метастабильных токовых слоях, с тем, чтобы определить условия, в которых могут быть получены наибольшие энергии направленного движения плазмы.

4. Актуальная задача состоит в выработке предложений для проектирования крупномасштабного стенда “Токовый слой” в НЦФМ с целью исследования процессов кумуляции магнитной энергии с последующей трансформацией в энергию плазмы и ускоренных частиц, а также моделирования явлений вспышечного типа в плазме солнечной короны и магнитосферы Земли; в перспективе — предсказание этих явлений.

Дальнейшее развитие исследований предполагает значительное увеличение параметров стенда: диаметр вакуумной камеры ~ 0.5 – 0.7 м, длина ~ 3 – 4 м, магнитное поле ~ 1 – 1.5 Тл, напряжение в системе создания начальной плазмы ~ 100 кВ, электрический ток в плазме ~ 100 – 150 кА.

Необходимо создание диагностического комплекса для определения структуры и эволюции магнитных полей и электрических токов в плазме токовых слоев, для измерений пространственно-временных характеристик концентрации электронов, температур ионов и электронов, энергии направленного движения ионов, энергии ускоренных электронов. Следует уделить внимание разработке и созданию надежной системы синхронизации работы отдельных элементов стенда “Токовый слой”, в том числе создание системы регистрации и контроля работы стенда. Таким образом, диагностический комплекс 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. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В России в течение длительного периода времени разрабатывалась концепция плазменных токовых слоев в качестве физической модели вспышек на Солнце и звездах, а также динамических процессов в магнитосфере Земли.

В ИОФ РАН было создано несколько уникальных лабораторных установок “Токовый слой”, в которых были исследованы процессы формирования и эволюции плазменных токовых слоев в различных магнитных конфигурациях.

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.

Накопленный экспериментальный материал позволяет проводить сопоставление процессов в лабораторных токовых слоях с процессами в магнитосфере Земли. При этом обнаруживается не только качественное, но и количественное сходство исследованных явлений при сравнении характерных безразмерных параметров лабораторной и космической плазмы.

В ИОФ РАН имеется экспериментальная база для продолжения и развития лабораторных исследований. В последнее время была проведена реконструкция и обновление экспериментальной установки ТС-3D, подготовлены как традиционные, так и новые методы диагностики.

На данном этапе возможно дальнейшее развитие исследований физики плазменных токовых слоев в НЦФМ на новом экспериментальном стенде со значительно более высокими параметрами, с использованием диагностического комплекса на основе современных технических достижений. Это позволит создать условия для генерации высокоэнергичных потоков плазмы и ускоренных электронов в токовом слое, осуществлять на новом уровне моделирование явлений вспышечного типа в плазме солнечной короны и магнитосферы Земли, а в перспективе предсказывать эти явления и их последствия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Syrovatskii S.I.* Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1981. V. 19. P. 163–227.
2. Магнитное пересоединение / под ред. Э. Приста, Т. Форбса. М.: Физматлит, 2005. 592 с.
3. *Biscamp D.* Magnetic Reconnection in Plasmas. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 404 p.
4. *Кадомцев Б.Б.* Успехи физ. наук. 1987. Т. 151. № 1. С. 23–29.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0151.198701a.0003>
5. *Зеленый Л.М., Артемьев А.В., Малова Х.В. и др.* / Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 9. С. 973–982.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201009g.0973>
6. *Зеленый Л.М.* Успехи физ. наук. 2016. Т. 186. № 11. С. 1153–1188.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.09.037923>
7. *Bratenahl A., Yeates C.M.* Phys. Fluids. 1970. Т. 11. С. 2696–2709.
<https://doi.org/10.1063/1.1692853>
8. *Ohyabu N., Kawashima N.* J. Phys. Soc. Japan. 1972. V. 33. P. 496–501.
<https://doi.org/10.1143/JPSJ.33.496>
9. *Сыроватский С.И., Франк А.Г., Ходжаев А.З.* Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. С. 138–142.
10. *Алтынцева А.Т., Красов В.И.* Журн. техн. физ. 1974. Т. 44. № 12. С. 2629–2631.
11. *Stenzel R.L., Gekelman W.J.* Geophys. Res. 1981. V. 86. № 2. P. 649–658.
<https://doi.org/10.1029/JA086iA02p00649>
12. *Богданов С.Ю., Марков В.С., Франк А.Г.* Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 35. № 6. С. 232–235.
13. *Ono Y., Morita A., Katsurai M., Yamada M.* Phys. Fluids B. 1993. V. 5. № 10. P. 3691–3701.
<https://doi.org/10.1063/1.860840>
14. *Yamada M., Ji H., Hsu S. et al.* Phys. Plasmas. 1997. V. 14. № 5. P. 1936–1944.
<https://doi.org/10.1063/1.872336>
15. *Brown M.R.* Phys. Plasmas. 1999. V. 6. № 5. P. 1717–1724.
<https://doi.org/10.1063/1.873430>

16. Frank A.G. Plasma Phys. & Contr. Fusion. 1999. V. 41. № 3A. P. 687–697.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/3A/062>
17. Egedal J., Oiroset M., Fox W., Lin R.P. Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. № 2. P. 025006.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.025006>
18. Intrator T.P., Furno I., Ryutov D.D., et al. J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № A5. P. A05S90.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011995>
19. Сыроватский С.И. *Астрономический журнал*. 1966. Т. 43. С. 340–355.
20. Сыроватский С.И. *ЖЭТФ*. 1966. Т. 50. № 4. С. 1133–1147.
21. Франк А.Г. *Труды ФИАН*. 1974. Т. 74. С. 108–166.
22. Кирий Н.П., Марков В.С., Сыроватский С.И. и др. *Труды ФИАН*. 1979. Т. 110. С. 121–161.
23. Франк А.Г., Батанов Г.М. *Труды ФИАН*. 2000. Т. 227. С. 88–116.
24. Сыроватский С.И., Франк А.Г., Ходжаев А.З. *Журн. техн. физ.* 1973. Т. 43. С. 912–916.
25. Сыроватский С.И. *ЖЭТФ*. 1971. Т. 60. № 5. С. 1727–1741.
26. Дрейден Г.В., Кирий Н.П., Марков В.С. и др. *Физика плазмы*. 1977. Т. 3. С. 45–54.
27. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г., Ходжаев А.З. *Физика плазмы*. 1977. Т. 3. С. 538–544.
28. Дрейден Г.В., Марков В.С., Островская Г.В. и др. *Физика плазмы*. 1978. Т. 4. С. 14–18.
29. Bogdanov S.Yu., Dreiden G.V., Frank A.G. et al. *Physica Scripta*. 1984. V. 30. № 4. P. 282–283.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/30/4/012>
30. Furth H.P., Killen I.K., Rosenbluth M.N. *Physics of Fluids*. 1963. V. 227. № 4. P. 459–484.
<https://doi.org/10.1063/1.1706761>
31. Coppi B., Laval G., Pellat R. *Phys. Rev. Letters*. 1966. V. 227. № 26. P. 1207–1210.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.1207>
32. Сыроватский С.И. *Изв. АН СССР*. 1979. Т. 43. № 4. С. 695–707.
33. Bogdanov S.Yu., Frank A.G., Markov V.S. *Physica Scripta*. 1984. V. 30. № 4. P. 279–281.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/30/4/011>
34. Алтынцева А.Т., Красов В.И., Марков В.С. и др. *Физика плазмы*. 1978. Т. 4, 18–22.
35. Богданов С.Ю., Марков В.С., Франк А.Г. *Письма в ЖЭТФ*. 1990. Т. 51. № 11. С. 563–565.
36. Бейгман И.Л., Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Франк А.Г. *Журн. прикл. спектроскопии*. 1991. Т. 54. С. 1021–1024.
37. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. *Письма в ЖЭТФ*. 1992. Т. 56. № 2. С. 82–87.
38. Сыроватский С.И. *Письма в Астрономический журнал*. 1976. Т. 2. № 1. С. 35–38.
39. Франк А.Г. // *Труды ФИАН*. 1985. Т. 160. С. 93–121.
40. Буланов С.В., Догель В.А., Франк А.Г. *Письма в АЖ*. 1984. Т. 10. № 2. С. 149–153.
41. Bulanov S.V., Dogiel V.A., Frank A.G. // *Physica Scripta*. 1984. V. 29. № 1. P. 66–67.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/29/1/011>
42. Буланов С.В., Франк А.Г. *Физика плазмы*. 1991. Т. 18. № 12. С. 1535–1544.
43. Богданов С.Ю., Бурилина В.Б., Марков В.С., Франк А.Г. *Письма в ЖЭТФ*. 1994. Т. 59. № 8. С. 510–514.
44. Богданов С.Ю., Бурилина В.Б., Кирий Н.П. и др. *Труды ИОФАН*. 1996. Т. 51. С. 76–100.
45. Богданов С.Ю., Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. *Письма в ЖЭТФ*. 2000. Т. 71. № 2. С. 78–85.
46. Франк А.Г., Богданов С.Ю., Бурилина В.Б. *Изв. АН. Сер. Физ.* 1995. Т. 59. № 8. С. 41–52.
47. Frank A.G., Bogdanov S.Yu. *Earth, Planets & Space*. 2001. V. 53. № 6. P. 531–537.
<https://doi.org/10.1186/BF03353266>
48. Frank A.G. *Plasma Phys. Reports*. 2022. V. 48. № 5. P. 574–584.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22200144>
49. Frank A.G., Bogdanov S.Yu., Markov V.S. et al. *Phys. Plasmas*. 2005. V. 12. № 5. P. 05231.
<https://doi.org/10.1063/1.1896376>
50. Богданов С.Ю., Дрейден Г.В., Марков В.С. и др. *Физика плазмы*. 2006. Т. 32. № 12. С. 1121–1135.
51. Frank A.G., Bugrov S.G., Markov V.S. *Phys. Lett. A*. 2009. V. 373. № 16. P. 1460–1464.
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2009.02.037>
52. Frank A.G., Bogdanov S.Yu., Dreiden G.V. et al. *Phys. Lett. A*. 2006. V. 348. № 3–6. P. 318–325.
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2005.08.049>
53. Богданов С.Ю., Дрейден Г.В., Марков В.С. и др. *Физика плазмы*. 2007. Т. 33. № 11. С. 1014–1027.
54. Frank A.G., Bugrov S.G., Markov V.S. *Phys. Plasmas*. 2008. V. 15. № 9. P. 092102.
<https://doi.org/10.1063/1.2972158>
55. Франк А.Г., Сатунин С.Н. *Физика плазмы*. 2018. Т. 44. № 2. С. 144–156.
<https://doi.org/10.7868/S036729211802004X>
56. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. *Физика плазмы*. 2010. Т. 36. С. 387–394.

57. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. № 1. С. 17–22.
<https://doi.org/10.1134/S0021364012010067>
58. Кирий Н.П., Франк А.Г. Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1042–1053.
59. Франк А.Г., Сатунин С.Н. Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 10. С. 889–908.
60. Frank A.G., Kyrie N.P., Satunin S.N. Phys. Plasmas. 2011. V. 18. № 11. P. 111209.
<https://doi.org/10.1063/1.3647576>
61. Франк А.Г., Сатунин С.Н. Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. № 10. С. 667–673.
<https://doi.org/10.31857/S1234567820220061>
62. Кирий Н.П., Франк А.Г., Васильков Д.Г. Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 4. С. 313–322.
<https://doi.org/10.1134/S0367292119040036>
63. Кирий Н.П., Савинов С.А. Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 436–453.
64. Frank A.G., Kyrie N.P., Satunin S.N., Savinov S.A. Universe. 2021. V. 7. № 11. P. 400.
<https://doi.org/10.3390/universe7110400>
65. Франк А.Г., Сатунин С.Н. Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 1. С. 12–17.
<https://doi.org/10.31857/S036729212201005X>
66. Космическая электродинамика: основные принципы под ред. Г. Альвен, К.Г. Фельтхаммар. М.: Мир, 1967. 260 с.
67. Koeperke M.E. Rev. of Geophys. 2008. V. 46. P. 1–43.
<https://doi.org/10.1029/2005RG000168>
68. Zweibel E.G., Yamada M. Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2009. V. 47. № 1. P. 291–332.
<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101726>
69. Yamada M., Kurlsrud R., Ji H. Rev. Modern Phys. 2010. V. 82. № 1. P. 603–664.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.603>
70. Франк А.Г. УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 982–988.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201009h.0982>
71. Баранов В.Б. Космические исследования. 1969. Т. 7. № 1. С. 109–116.
72. Шиндлер К. Физика магнитосферы / под ред. Д. Вильемса, Дж. Мида. М.: Мир, 1972. С. 69–81.
73. Подгорный И.М., Сагдеев Р.З. Успехи физ. наук. 1969. Т. 98. № 3. С. 409–440.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0098.196907a.0409>
74. Frank A.G., Bogdanov S.Yu., Kyrie N.P., Markov V.S. AIP Conference Proc. 2004. V. 703. P. 431–436. *American Institute of Physics*, Melville, N. Y., USA.
75. Франк А.Г. Плазменная гелиогеофизика. Т. 2. Ред. Л.М. Зеленый, И.С. Веселовский. М.: Физматлит, 2008. С. 259–276.
76. Сыроватский С.И. Природа. 1978. Т. 2. С. 143–144.
77. Artemyev A.V., Petrukovich A.A., Frank A.G. et al. J. Geophys. Res. 2013. V. 118. № 6. P. 2789–2799.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50297>
78. Юшков Е.В., Франк А.Г., Артемьев А.В. и др. Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 1. С. 73–91.
<https://doi.org/10.7868/S0367292115010060>
79. Франк А.Г., Артемьев А.В., Зеленый Л.М. ЖЭТФ. 2016. Т. 150. № 4. С. 807–825.
<https://doi.org/10.7868/S0044451016100163>
80. Франк А.Г., Островская Г.В., Юшков Е.В. и др. Космические исследования. 2017. Т. 55. № 1. С. 48–58.
<https://doi.org/10.7868/S0023420617010058>
81. Юшков Е.В., Франк А.Г., Артемьев А.В. и др. Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 12. С. 983–991.
<https://doi.org/10.1134/S0367292118120119>
82. Frank A.G., Artemyev A.V., Lu S et al. Plasma Phys. Control. Fusion. 2023. V. 65. № 9. P. 095006.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ace73a>
83. Голант В.Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 327 с.
84. Аппаратура и методы плазменных исследований / под ред. А.В. Чернетский, О.А. Зиновьев, О.В. Козлов. М.: Атомиздат, 1965. 364 с.
85. Богданов С.Ю., Токаревская Н.П., Франк А.Г., Ходжаев А.З. Физика плазмы. 1975. Т. 1. С. 133–146.
86. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Физматгиз, 1960. 552 с.
87. Душин Л.А. СВЧ-интерферометры для измерения плотности плазмы. М.: Атомиздат, 1973. 128 с.
88. Богданов С.Ю., Бондарь Ю.Ф., Бурилина В.Б. и др. ЖТФ. 1994. Т. 64. № 9. С. 30–38.
89. Богданов С.Ю., Бурилина В.Б., Кирий Н.П. и др. Физика плазмы. 1998. Т. 24. № 6. С. 467–480.
90. Богданов С.Ю., Бурилина В.Б., Франк А.Г. ЖЭТФ. 1998. Т. 114. С. 1202–1214.
91. Франк А.Г., Кирий Н.П., Марков В.С. Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 1. С. 32–36.
<https://doi.org/10.1134/S0367292119010049>

92. Франк А.Г., Савинов С.А. Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 9. С. 830–837.
<https://doi.org/10.31857/S0367292120090036>
93. Бурилина В.Б., Марков В.С., Франк А.Г. Физика плазмы. 1995. Т. 21. С. 36–40.
94. Бюшер Шт., Кирий Н.П., Кунце Х.-Й., Франк А.Г. Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 2. С. 185–190.
95. Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Франк А.Г. Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 87. № 6. С. 916–921.
96. Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Франк А.Г. Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 3. С. 282–285.
97. Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Франк А.Г. Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 5. С. 476–480.
98. Frank A.G., Gavrilenko V.P., Kyrie N.P., Oks E.J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys. 2006. Т. 39. № 24. С. 5119.
<https://doi.org/10.1088/0953-4075/39/24/009>
99. Воронов Г.С., Кирий Н.П., Марков В.С. и др. Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 12. С. 1080–1097.
100. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. и др. Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 6. С. 563.
101. Frank A.G., Kyrie N.P. Plasma Phys. Reports. 2017. V. 43. № 6. P. 696–710.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X1706006X>
102. Франк А.Г., Кирий Н.П., Марков В.С., Воронова Е.В. Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 6. С. 483–491.
103. Кирий Н.П., Савинов С.А. Краткие сообщения по физике ФИАН. 2021. Т. 2. С. 25–34.
104. Kyrie N.P., Savinov S.A. Plasma Phys. Reports. 2021. V. 47. № 6. P. 611–622.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X21060106>
105. Кирий Н.П., Франк А.Г., Мингалева А.Р. и др. Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 1035–1045.
<https://doi.org/10.31857/S0367292122601102>
106. Кирий Н.П., Харлачев Д.Е., Шпаков К.В. Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 11. С. 1092–1100.
107. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. № 8. С. 419–421.
108. Воронов Г.С., Кирий Н.П., Франк А.Г. Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 10. С. 1004–1014.
109. Frank A.G., Gavrilenko V.P., Ispolatov Ya.O. et al. // Contributions to Plasma Phys. 1996. V. 36. P. 667–678.
110. Nakamura R., Baumjohann W., Mouikis C. et al. Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № 9. P. 9804.
<https://doi.org/10.1029/2004GL019558>
111. Juusola L., Hoilijoki S., Pfau-Kempf Y. et al. Ann. Geophys. 2018. V. 36. № 5. P. 1183–1199.
<https://doi.org/10.5194/angeo-36-1183-2018>
112. Hoshino M., Mukai T., Shinohara I., et al. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № A1. P. 337–347.
<https://doi.org/10.1029/1999JA900426>
113. Walia N.K., Seki K., Amano T.J. Geophys. Res. 2022. V. 127. № 5. P. 30066.
<https://doi.org/10.1029/2021JA030066>
114. <https://www.nanoscan.su>

RESEARCH ON THE EVOLUTION AND DYNAMICS OF CURRENT SHEETS IN MAGNETIC FIELDS AS A DIRECTION OF LABORATORY ASTROPHYSICS

A. G. Frank¹, N. P. Kyrie¹, V. A. Ivanov¹, S. A. Savinov², A. V. Oginov², A. R. Mingaleev²,
K. V. Shpakov², I. R. Nugaev¹, D. E. Kharlachev¹, and V. D. Stepakhin¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

²*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

A review is presented on the progress in experimental research of the physics of plasma current sheets in strong magnetic fields at the Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (GPI RAS). Most significant results were analysed and the basic features of the dynamics of current sheets were determined. The formation of a current sheet is accompanied by the accumulation of magnetic energy in the vicinity of the sheet. Then the processes of magnetic reconnection and sheet disruption can lead to a rapid release of the energy, plasma acceleration and heating, and the generation of high-energy electrons. Based on the analysis of experimental data, a physical analogy between characteristic phenomena in the course of the flare-type processes in laboratory current sheets and in space plasma has been established. Proposals have been formulated for evolving a project for research in the physics of plasma current sheets at the National Center for Physics and Mathematics (NCPHM). There are plans to build up a new experimental device with significantly higher parameters combined with a diagnostic complex based on modern technical achievements. This project will open up prospects for experimental modeling of flare-type phenomena in plasma of the solar corona and the Earth's magnetosphere at a novel level, as well as create opportunities for predicting such phenomena