

## «Эволюция и динамика токовых слоев в неоднородных магнитных полях и вспышечные явления в плазме»

С.Г. Бугров, Г.С. Воронов, Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк

*Отдел физики плазмы ИОФ РАН*

Одной из актуальных задач астрофизики и физики плазмы является выяснение природы процессов, которые лежат в основе грандиозных явлений вспышечного типа, таких как вспышки на Солнце и звездах, суббури в магнитосферах Земли и планет, а также в основе неустойчивостей срыва в плазме токамаков и нестационарных процессов в Z- и  $\Theta$ -пинчах. Для вспышек на Солнце характерно колоссальное энерговыделение ( $\approx 10^{33}$  эрг) в течение весьма короткого интервала времени ( $\approx 10^2 - 10^3$  сек), и они оказывают сильное влияние на состояние межпланетного пространства, на атмосферу Земли и планет и, в конечном счете, на «космическую погоду». Анализ наблюдательных данных показал, что единственным источником энергии солнечных вспышек является энергия магнитного поля. Эта энергия может эффективно трансформироваться в другие виды благодаря **процессам магнитного пересоединения**, которые могут происходить при тесном сближении магнитных силовых линий различающихся направлений в выделенных областях пространства. В таких областях концентрируется электрический ток высокой плотности, и существенную роль играют диссипативные процессы; при этом может нарушаться одно из основных свойств высокопроводящей плазмы – свойство вмороженности магнитного поля в вещество. В результате процессов магнитного пересоединения происходит эффективная трансформация магнитной энергии в тепловую и кинетическую энергию плазмы, в энергию потоков сверхтепловых ускоренных частиц и излучений различных диапазонов электромагнитного спектра, от радиоволн до гамма лучей.

Выдающийся вклад в развитие теории в этой области внес С.И. Сыроватский, обосновавший концепцию **токовых слоев** как физической основы вспышечных явлений в замагниченной плазме. Согласно этой концепции, сравнительно медленное развитие токового слоя должно приводить к постепенной концентрации магнитной энергии, создавая предвспышечную ситуацию. Собственно вспышка – это быстрое разрушение слоя и высвобождение накопленной энергии за счет процессов магнитного пересоединения. В наших ранних работах были впервые получены экспериментальные подтверждения этой концепции. Вместе с тем, исчерпывающее теоретическое описание вспышечных явлений – это чрезвычайно сложная и пока ещё не реализованная задача, что обусловлено как нестационарностью и нелинейным характером вспышечных явлений, так и значительной пространственной неоднородностью токовых слоев. Это стимулировало постановку в различных странах мира целого ряда специальных лабораторных экспериментов, в которых изучаются явления такого рода.

В Отделе физики плазмы ИОФ РАН в течение более 20 лет проводятся экспериментальные исследования динамики токовых слоев и процессов магнитного пересоединения с целью выяснения физических основ вспышечных явлений в плазме, а также моделирования таких явлений в лабораторных условиях.

Токовые слои – это области с высокой концентрацией электрического тока, которые служат границей раздела магнитных полей различающихся направлений и аккумулируют избыточную магнитную энергию. **Формирование токового слоя является необходимой предпосылкой для осуществления процессов магнитного пересоединения и реализации вспышечных явлений в плазме.**

Основные теоретические исследования и ранние лабораторные эксперименты относились к изучению эволюции токовых слоев и магнитного пересоединения в двумерных (2D) конфигурациях магнитного поля с нулевой линией. Вместе с тем, очевидно, что наибольший интерес представляют трехмерные (3D) магнитные конфигурации, характерные для реальных условий (солнечная корона, магнитосфера Земли, установки для осуществления УТС). Поэтому основным направлением работ последнего времени, включенных в представляемый цикл, явился переход к 3D магнитным конфигурациям, в том числе к конфигурациям наиболее общего вида, с особыми линиями  $X$  типа, в которых можно предполагать развитие токовых слоев.

В работах цикла, опубликованных в 2005-2009 г.г., представлены результаты экспериментальных исследований структуры и динамики токовых слоев, которые развиваются в пространственно неоднородных магнитных полях с  $X$  линиями.

**Впервые обнаружено, что формирование квазиодномерных токовых слоев и значительная концентрация магнитной энергии в окрестности слоя является универсальным свойством 3D магнитных конфигураций с  $X$  линией. Развитие токового слоя сопровождается эффективным сжатием вещества и увеличением плотности плазмы в слое в 5-10 раз.**

**Впервые обнаружено прогрессирующее уменьшение степени сжатия в слой тока и плазмы, по мере роста продольной компоненты магнитного поля, направленной вдоль  $X$  линии. Установлено, что это явление обусловлено усилением продольной компоненты в слое по сравнению с ее величиной вне слоя. Впервые зарегистрирован захват продольного магнитного поля в пределы токового слоя.**

**Обнаружено развитие деформированных асимметричных плазменных слоев, что обусловлено проявлением эффектов двухжидкостной магнитной гидродинамики, генерацией токов Холла и их взаимодействием с продольной компонентой. Впервые определена структура токов Холла, создающих в слое магнитные поля квадрупольного типа, и роль токов Холла в динамике плазмы.**

= Исследования проводились на установке ТС-3D (ИОФ РАН), преимущества которой по сравнению с зарубежными установками состоят в возможности изменений структуры исходных 3D магнитных полей и других условий эксперимента в довольно широких пределах. Диагностика осуществляется с помощью магнитных измерений, методами спектроскопии, голографической интерферометрии, регистрации изображений плазмы, рентгеновских измерений.

= Впервые показано, что образование квазиодномерных токовых слоев, в окрестности которых сконцентрирована значительная магнитная энергия, является универсальным свойством не только 2D, но и 3D магнитных конфигураций с особыми линиями  $X$  типа [5,7]. Распределение электрического тока в плазме приобретает типичную форму слоя, и в плоскости перпендикулярной к  $X$  линии характеризуется двумя существенно различающимися размерами: при ширине  $\cong 12 \div 15$  см, толщина слоя составляет  $\cong 0.9 \div 2.2$  см [5].

На стадии формирования токового слоя магнитное поле переносится течениями плазмы из периферийных областей в окрестность  $X$  линии благодаря «вмороженности» поля в плазму [11]. В результате напряженность магнитного поля у поверхности слоя возрастает в 5 – 8 раз по сравнению с начальным значением и достигает  $\cong 3$  кГс, при этом плотность тока в средней плоскости слоя составляет  $\cong 2 \div 3$  кА/см<sup>2</sup> [5].

Образование токового слоя сопровождается эффективным сжатием вещества в пределы протяженного плазменного слоя, в котором концентрация электронов,  $N_e \geq 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, в 5-10 раз превышает и начальную концентрацию электронов, и плотность плазмы вне слоя [1,3,8]. Наряду со сжатием начальной плазмы, к увеличению концентрации электронов в слое приводит также рост степени ионизации плазмы. Впервые установлено, что в центральной плоскости слоя эффективный заряд ионов может достигать величины  $Z_{\text{eff}} \approx 3 \div 4$  [10]. Таким образом, в средней плоскости слоя концентрация плазмы, ее температура и эффективный заряд ионов имеют максимальные значения [1,3,8,10]. При этом давление плотной нагретой плазмы, сосредоточенной в пределах слоя, уравнивается давлением магнитного поля снаружи слоя. Это означает, что плазменный параметр  $\beta$ , характеризующий отношение газокINETического давления к магнитному, в плазме токовых слоев достигает величины  $\beta \approx 1$  [7].

Получение компактных плазменных образований с указанными параметрами представляется перспективным с точки зрения разнообразных приложений, таких как разработка источников излучения в видимом диапазоне спектра и в ультрафиолете, генерация плазменных потоков и др.

= При изучении закономерностей развития и основных характеристик токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях удалось установить, что пространственные распределения концентрации электронов и плотности тока весьма чувствительны к структуре исходного магнитного поля. Впервые

обнаружено прогрессирующее уменьшение степени сжатия в слой как электрического тока, так и плазмы по мере увеличением продольной компоненты магнитного поля, направленной вдоль  $X$  линии [1,3,5,8]. Это проявляется в увеличении толщины слоя, в уменьшении максимальных значений плотности тока и плазмы, а также градиентов этих величин, тогда как полное число электронов в слое изменяется незначительно. Таким образом, с ростом продольной компоненты магнитного поля происходит эволюционный переход к динамике несжимаемой плазмы.

Обнаруженный эффект был нами интерпретирован как свидетельство значительного усиления продольной компоненты в токовом слое по сравнению с ее начальным значением (аналог парамагнитного эффекта), и появлением дополнительных сил Ампера, препятствующих сжатию [1,3]. Непосредственные доказательства усиления продольной компоненты в токовом слое были впервые получены на основе магнитных измерений [11]. Показано, что еще на стадии формирования слоя продольная компонента переносится течениями плазмы за счет вмороженности поля в вещество, и таким образом происходит «захват» поля в слой. В сформированном слое превышение захваченного поля над начальным уровнем составило  $\geq 1.2$  кГс, и его направление во всех случаях совпадает с направлением продольной компоненты в исходной магнитной конфигурации с  $X$  линией [11].

= При исследовании структуры плазмы токовых слоев, которые развивались в 3D магнитных полях, в плазме с тяжелыми ионами, обнаружено необычное явление: появление деформированных асимметричных плазменных слоев [2,6,8]. Эти результаты позволили нам предложить гипотезу о проявлении эффектов двухжидкостной магнитной гидродинамики и генерации токов Холла в токовых слоях [2,6]. При взаимодействии токов Холла с продольной компонентой магнитного поля возникают дополнительные динамические эффекты, которые могут вызывать деформацию слоя.

В последующих экспериментах получены прямые подтверждения генерации токов Холла, в том числе при развитии токовых слоев в 2D магнитном поле с нулевой линией [9]. Впервые определена структура токов Холла и их эволюция во времени. Обнаружено, что в плоскости перпендикулярной к основному току в слое токи Холла образуют четыре замкнутых контура, которые создают квадрупольное магнитное поле параллельно  $X$  линии [9]. Отметим, что возбуждение токов Холла в слое, сформированном в 2D магнитной конфигурации, приводит к ее превращению в более сложную 3D конфигурацию.

В последнее время возможность генерации токов Холла в токовых слоях привлекает к себе пристальное внимание, и явления такого рода изучаются в экспериментах, которые проводятся в США и Японии. Влияние двухжидкостных эффектов на процессы магнитного пересоединения, в том числе в приложении к процессам в магнитосфере Земли, исследуется во многих теоретических работах.

= Одним из принципиальных результатов экспериментального изучения токовых слоев является обнаружение высокой стабильности слоя. Вместе с тем, при специальном выборе начальных условий удалось реализовать разрыв токового слоя, или импульсную фазу магнитного пересоединения, и наблюдать сопутствующие нестационарные явления. Спонтанное возникновение и развитие импульсной фазы пересоединения, которая приводит к разрушению слоя, наиболее детально исследованы в 2D магнитных конфигурациях [7]. Обнаружены резкие изменения топологии магнитного поля, обусловленные перераспределением тока в слое, генерация потоков плазмы, возбуждение индукционных электрических полей, ускорение электронов до энергий, превышающих  $10 \text{ кэВ}$ . Показано, что имеется качественная аналогия между основными процессами в токовых слоях, которые создаются в лабораторных экспериментах, и вспышечными явлениями в космической плазме [7]. Сопоставление на основе безразмерных параметров физических условий в активных областях солнечной короны и в установке ТС-3D демонстрирует удовлетворительное количественное согласие (в рамках ограниченного моделирования) [7]. В связи с этим, результаты данного цикла работ могут быть использованы для анализа нестационарных вспышечных явлений в космических условиях.

= Генерация аномальных электрических полей в плазме токового слоя наблюдалась в ряде наших работ, в том числе в [4], а также в работах других российских и зарубежных авторов. Развитие плазменной турбулентности часто рассматривается в качестве «триггера» импульсной фазы магнитного пересоединения и разрушения слоя. Однако экспериментальные данные свидетельствуют о том, что турбулентность плазмы является, по-видимому, вторичным процессом. Согласно нашим представлениям, наиболее вероятной причиной разрушения слоя и высвобождения предварительно накопленной магнитной энергии является сверхбыстрое локальное увеличение тепловой энергии плазмы, что вызывает нарушение поперечного равновесия слоя [7]. В настоящее время исследования в этом направлении продолжаются.

Работы представленного цикла выполнены в рамках проектов РФФИ (1993-2009 г.г.), INTAS, МНТЦ (2002-05 г.г.), CRDF (2004-06 г.г.) и проектов, поддержанных Программами фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН (2003-2008 г.г.), в том числе Программой ОФН-15 «Плазменные процессы в солнечной системе» (2009 г.).

1. A.G. Frank, S.Yu. Bogdanov, V.S. Markov, G.V. Dreiden, G.V. Ostrovskaya.. Experimental study of plasma compression into the sheet in three-dimensional magnetic fields with singular X lines. // *Physics of Plasmas* 2005 V.12, P. 052316 (1-11).
2. A.G. Frank, S.Yu. Bogdanov, G.V. Dreiden, V.S. Markov, G.V. Ostrovskaya.

- Structure of the current sheet plasma in the magnetic field with an X line as evidence of the two-fluid plasma properties. // *Physics Letters A*, V. 348(3-6), P.318-325. (2006).
3. С.Ю. Богданов, Г.В. Дрейден, В.С. Марков, Г.В. Островская, А.Г. Франк. Структура и динамика плазмы токовых слоев в трехмерных магнитных полях с X линией – исследования методом голографической интерферометрии. // *Физика плазмы*. 2006 Т. 32(12). С. 1121-1135.
  4. A.G. Frank, V.P. Gavrilenko, N.P. Kyrie, E. Oks. Spectroscopic study of anomalous electric fields in peripheral regions of a current sheet plasma. // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 2006. V.39. P.5119-5129.
  5. С.Ю. Богданов, С.Г. Бугров, В.П. Грицына, О.В. Зверев, Г.В. Карпов, В.С. Марков, Д.В. Репин, А.Г. Франк. Магнитная структура токовых слоев в магнитных полях с особой линией X типа. // *Физика плазмы*. 2007 Т. 33(6). С. 483-492.
  6. С.Ю. Богданов, Г.В. Дрейден, В.С. Марков, Г.В. Островская, А.Г. Франк. Проявления двухжидкостных свойств плазмы при формировании токовых слоев в тяжелых инертных газах – исследования методом голографической интерферометрии. // *Физика плазмы* 2007. Т.33(11). С. 1014-1027.
  7. А.Г. Франк. Лабораторное моделирование: эволюция и динамика токовых слоев в плазме как основа вспышечных явлений. // В кн.: *Плазменная гелиогеофизика в 2-х томах*, под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. Физматлит. 2008 г. Т.2. Гл. 9, разд.9.1. С. 259-276.
  8. А.Г. Франк, В.П. Гавриленко, Н.П. Кирий, Г.В. Островская. Оптика и спектроскопия плазмы токовых слоев.// В кн.: *Оптика низкотемпературной плазмы*, под ред. В.Н. Очкина. Серия *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*, изд. «Янус», 2008г. С. 353-402.
  9. A.G. Frank, S.G. Bugrov, V.S. Markov. Hall currents in a current sheet: structure and dynamics // *Physics of Plasmas* 2008. V.15(9), P. 092102 (1-10).
  10. Г.С. Воронов, Н.П. Кирий, В.С. Марков, Г.В. Островская, А.Г. Франк. Спектроскопические измерения температуры электронов, температуры и эффективного заряда ионов в токовых слоях, сформированных в двумерных и трехмерных магнитных конфигурациях // *Физика плазмы* 2008. Т. 34, С. 1080-1097.
  11. A.G. Frank, S.G. Bugrov, V.S. Markov. Enhancement of the guide field during the current sheet formation in the three-dimensional magnetic configuration with an X line // *Physics Letters A* 2009. V.373, P. 1460-1464.