Письма в ЖЭТФ, том 100, вып. 2, с. 83 – 88 © 2014 г. 25 июля

Вертикальные смещения токового слоя и токи Холла

А. Г. Франк[1], *С. Н. Сатунин*

Институт общей физики им. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 16 мая 2014 г.
После переработки 18 июня 2014 г.

Зарегистрированы вертикальные смещения периферийных областей токового слоя относительно его средней плоскости при формировании слоя в 3D магнитной конфигурации с X линией и продольной компонентой магнитного поля. Показано, что этот эффект обусловлен возбуждением токов Холла и появлением вертикально направленных сил. Обнаружено изменение знака вертикальных смещений на поздней стадии эволюции слоя, что свидетельствует о генерации противоположно направленных токов Холла при изменении направления основного тока у боковых краев слоя. Показано, что токи Холла оказывают значительное влияние на структуру токовых слоев, а вертикальные колебания периферийных областей токового слоя, возникающие благодаря разнонаправленным токам Холла, являются составной частью динамических процессов в токовых слоях.

DOI: 10.7868/S0370274X14140021

1. Согласно современным представлениям процессы магнитного пересоединения в токовых слоях лежат в основе многих нестационарных явлений в космической и лабораторной плазме, которые сопровождаются преобразованием энергии магнитного поля в тепловую и кинетическую энергию плазмы, в потоки ускоренных частиц и излучений [1, 2]. Исследования магнитного пересоединения и токовых слоев были стимулированы поиском механизмов, лежащих в основе грандиозных явлений в космическом пространстве, таких, как вспышки на Солнце. Развитие теоретических исследований инициировало постановку ряда целенаправленных лабораторных экспериментов, которые позволили детально изучать динамику и структуру токовых слоев в различных условиях (см. обзоры [3–5] и цитируемую там литературу). Благодаря измерениям с помощью различных спутниковых миссий (Geotail, Interball, Cluster, THEMIS и т.д.) к настоящему времени получен огромный объем данных, относящихся к токовым слоям в магнитосфере Земли. При этом по целому ряду существенных параметров обнаруживается фундаментальное сходство между магнитосферными и лабораторными токовыми слоями, несмотря на колоссальные различия в размерах, параметрах плазмы, величинах магнитных полей, токов и т.д. [6]. Это касается и влияния продольной компоненты магнитного поля, направленной вдоль тока, на структуру токового слоя. Измерения в магнитосферном токовом слое показали, что чем больше продольная компонента, тем меньше амплитуда тока в слое. Это соответствует теоретическим оценкам и численным расчетам, которые также демонстрируют уменьшение плотности тока и плазмы и увеличение толщины (меньшего поперечного размера) слоя [7]. В лабораторных экспериментах были зарегистрированы эффекты уменьшения амплитуды тока и плотности плазмы и увеличения толщины слоя с ростом продольной компоненты магнитного поля [8–10], а также появление изогнутых асимметричных слоев плазмы [11, 12]. На основе теоретического анализа движения ионов в магнитосферном токовом слое в присутствии продольной компоненты были получены асимметричные профили плотности плазмы [7]. Отсюда видно, что результаты лабораторных экспериментов помогают понять природу магнитоплазменных явлений в околоземном космическом пространстве.

Структура токового слоя и сосредоточенной в нем плазмы непосредственно зависит от взаимодействия токов с магнитными полями. Поэтому изучение особенностей пространственных распределений магнитного поля, тока и плазмы позволяет выяснить, какие физические процессы определяют динамику и эволюцию токовых слоев. Динамические эффекты в токовых слоях проявляются в целом ряде связанных между собой явлений, таких, как возбуждение токов Холла и деформация плазменного слоя в трехмерных (3D) магнитных конфигурациях [11–14], генерация сверхтепловых потоков плазмы [15–17], появление токов обратного направления и “утолщение” токового слоя [18, 19]. Обнаружение асимметричных плазменных слоев, возникающих в 3D магнитных по-

[1] e-mail: annfrank@fpl.gpi.ru

лях в присутствии продольной компоненты, позволило сделать вывод о возбуждении в слое токов Холла [11, 12, 20]. Однако до последнего времени открытым оставался вопрос о структуре собственно токового слоя в таких магнитных конфигурациях, т.е. о пространственном распределении основного тока, протекающего в слое, и о возможных изменениях структуры токового слоя со временем.

Основная цель настоящей работы состояла в том, чтобы обнаружить относительные изменения структуры токовых слоев при их формировании в 3D магнитных конфигурациях при различных значениях продольной компоненты в условиях, когда возможно возбуждение токов Холла. Значительный интерес представляло изучение эволюции распределений тока, в том числе при возбуждении у боковых краев слоя токов обратного направления, а также качественное сопоставление структуры токовых и плазменных слоев, которые формировались в идентичных условиях.

2. Исследование формирования и эволюции токовых слоев в 3D и 2D магнитных конфигурациях с особыми линиями X-типа [1] проводится с помощью экспериментальной установки ТС-3D [21–23]. Простейшая 3D-конфигурация с X-линией может быть представлена следующим образом:

$$\mathbf{B} = \{B_x, B_y, B_z\} = \{hy, hx, B_z^0\}. \qquad (1)$$

Здесь X-линия совмещена с осью z, магнитное поле в плоскости (xy) характеризуется постоянным градиентом h, а $B_z^0 \cong \mathrm{const}$ – однородная продольная компонента поля, направленная вдоль X-линии.

В установке ТС-3D квазистационарное магнитное поле (1) создается с помощью прямых проводников и катушек, которые расположены снаружи кварцевой цилиндрической вакуумной камеры диаметром 18 см и длиной 100 см. Ось камеры совмещена с X-линией (рис. 1). В экспериментах, представленных в данной работе, градиент магнитного поля составлял $h \cong (0.5-0.57)$ кГс/см. Продольной компоненте B_z^0 придавалось одно из трех значений: 0, +2.9, −2.9 кГс.

Вакуумная камера заполнялась Ar или Kr до давления $p = (28-36)$ мТор. Начальная плазма с концентрацией $N_e \approx 10^{14}\,\text{см}^{-3}$ создавалась с помощью Θ-разряда. Магнитное поле (1) и начальная плазма были практически однородны в z-направлении. С торцов в камеру вводились два электрода на расстоянии $\Delta z = 60$ см друг от друга. Между электродами прикладывалось импульсное напряжение, которое возбуждало в плазме ток J_z, изменяющийся во времени по синусоидальному закону с полупериодом $\cong 6$ мкс и амплитудой первого полупериода $\cong 45-50$ кА. Спустя 1–2 мкс после возбуждения тока J_z происходили формирование токового слоя и сжатие плазмы в слой. Для определенности будем считать, что токовый слой располагается горизонтально в окрестности плоскости $y = 0$, как это показано на рис. 1.

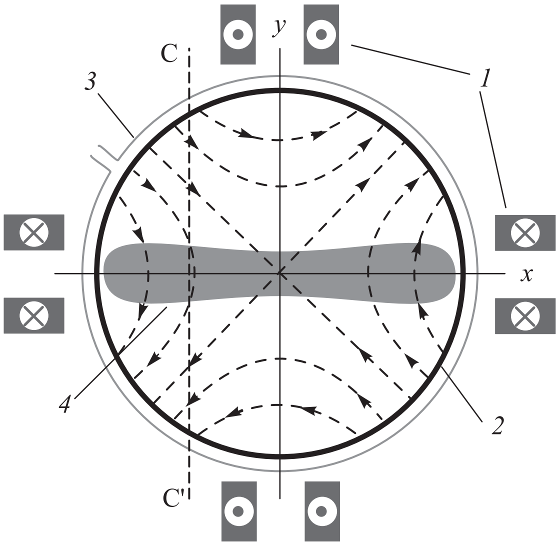

Рис. 1. Схема экспериментальной установки ТС-3D (поперечное сечение) (X-линия совмещена с осью Oz): *1* – прямые проводники с токами для возбуждения поперечного магнитного поля $\mathbf{B}_\perp^0 = h\{y, x, 0\}$, силовые линии которого показаны штриховыми линиями со стрелками; *2* – вакуумная камера; *3* – система витков Θ-разряда для создания начальной плазмы; *4* – токовый слой

Магнитные поля, создаваемые токами плазмы, измерялись трехкомпонентным магнитным зондом, который можно было перемещать в плазменном объеме внутри миниатюрных кварцевых трубок. Одна из них, расположенная при $x = -5$ см, показана на рис. 1 линией CC′ (подробнее см. [14, 18, 19, 9, 10]).

3. В настоящей работе изучалась эволюция распределений плотности тока по толщине токового слоя $j_z(y)$ в периферийной области слоя ($x = -5$ см) в зависимости от направления и величины продольной компоненты магнитного поля B_z^0. В силу симметрии токовых слоев, формируемых в лабораторных условиях [8–10, 14, 18], мы ограничились анализом распределений тока в одной половине слоя (при $x = -5$ см).

На основе данных, полученных при измерении магнитных полей, были рассчитаны распределения $j_z(y)$ в последовательные моменты времени в диапазоне $t = (1-5)$ мкс. Профили $j_z(y)$ для трех различных значений продольной компоненты магнитного поля B_z^0 представлены на рис. 2. Видно, что

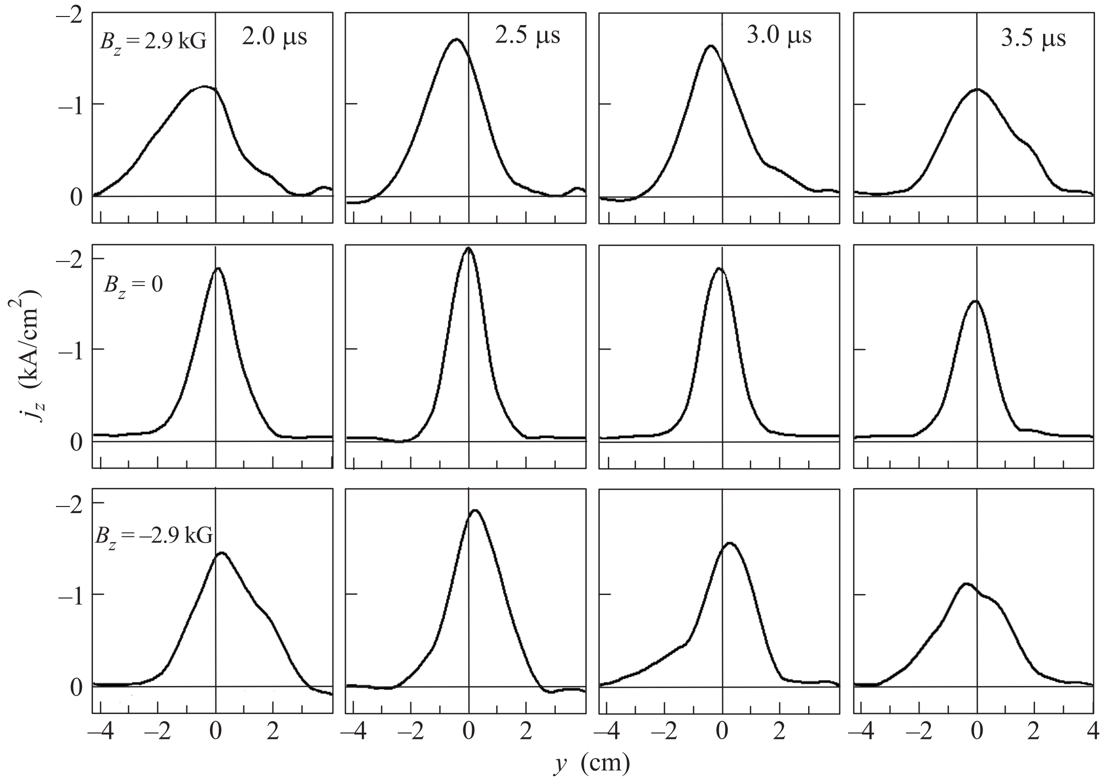

Рис. 2. Распределения плотности тока в токовых слоях $j_z(y)$ при $x = -5$ см в зависимости от времени и значения продольной компоненты магнитного поля B_z^0. Токовые слои формировались в Ar. Начальное давление $p = 28$ мТор. Градиент поперечного магнитного поля $h = 0.5$ кГс/см

максимальные значения плотности тока $j_z^{\max}$ в слое, сформированном при $B_z^0 = 0$, несколько превышают значения, полученные при $B_z^0 \neq 0$, а толщина слоя $2\Delta y_{0.5}$, которая определялась по уровню $0.5 j_z^{\max}$, при $B_z^0 \neq 0$ больше, чем при $B_z^0 = 0$ (см. также рис. 3). Эти данные хорошо согласуются с полученными ранее [9, 10]. Для токовых слоев, которые формировались в присутствии продольной компоненты, типичны асимметричные профили $j_z(y)$ (рис. 2a и c) в отличие от симметричных профилей, полученных при $B_z^0 = 0$ (рис. 2b). Асимметрия проявляется в том, что одно из крыльев профиля $j_z(y)$ является более крутым, а другое – более пологим. Характер асимметрии изменяется при изменении направления B_z^0. Так, при $t = 2$ мкс и $B_z^0 = +2.9$ кГс профиль $j_z(y)$ имеет более крутое правое крыло ($y > 0$) и пологое левое ($y < 0$), тогда как при $B_z^0 = -2.9$ кГс левое крыло – более крутое, а правое – более пологое (рис. 2a и c).

Наиболее интересный результат состоит в обнаружении вертикальных (вдоль оси y) смещений максимумов профилей тока $j_z^{\max}$ в присутствии продольной компоненты магнитного поля ($B_z^0 = +2.9, -2.9$ кГс). Как видно из рис. 2b, если $B_z^0 = 0$, то в течение всего времени эволюции максимум плотности тока расположен в плоскости симметрии слоя ($y = 0$). Однако если слой формируется при $B_z^0 \neq 0$, максимум плотности тока смещается по вертикали относительно плоскости $y = 0$ на некоторую величину δy (рис. 2a и c). Зависимости этих смещений от времени при трех значениях продольной компоненты ($B_z^0 = 0, +2.9, -2.9$ кГс), представлены на рис. 4 (при формировании токового слоя в Kr) и рис. 5 (при формировании слоя в Ar). Направление смещения токового слоя (или его знак, $\pm\delta y$) определяется направлением B_z^0: при изменении направления B_z^0 на противоположное максимум профиля тока $j_z^{\max}$ также смещается в противоположную сторону относительно плоскости $y = 0$ (рис. 4 и 5).

Максимальные абсолютные величины смещений $|\delta y|$ наблюдаются на ранней стадии эволюции токовых слоев. Со временем эти смещения уменьшаются и при формировании слоя в Kr асимптотически стремятся к нулю (рис. 4). В каждый из моментов времени смещения $|\delta y|$ в плазме с более тяжелыми ионами Kr заметно превышают смещения в Ar (ср. рис. 4 и 5).

Новый необычный эффект был обнаружен на поздней стадии эволюции токовых слоев, которые

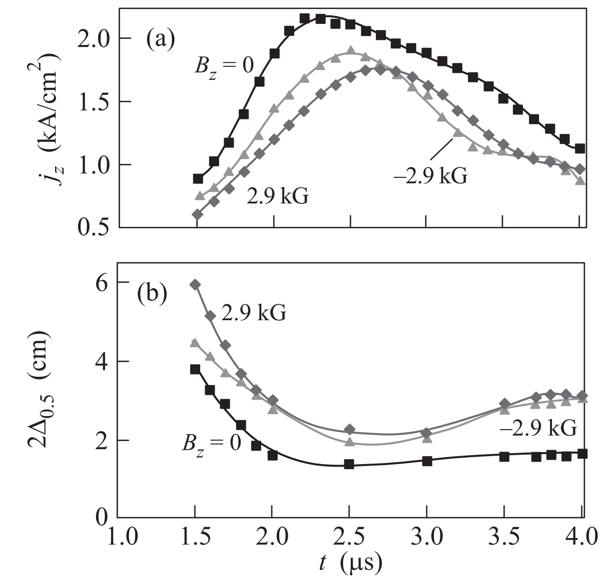

Рис. 3. Зависимости от времени максимальной плотности тока $j_z^{\max}$ (a) и толщины токовых слоев $2\Delta y_{0.5}$ на уровне $0.5 j_z^{\max}$ (b) при $B_z^0 = 0$, $+2.9$ и -2.9 кГс. Токовые слои формировались в Ar. Начальное давление $p = 28$ мТор. Градиент поперечного магнитного поля $h = 0.5$ кГс/см

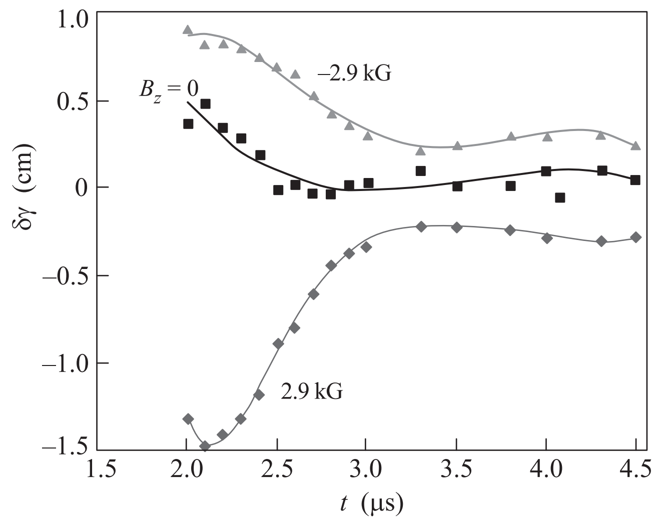

Рис. 4. Смещения δy максимумов плотности тока от средней плоскости токового слоя ($y = 0$) в зависимости от времени при $B_z^0 = 0$, $+2.9$ и -2.9 кГс. Токовые слои формировались в Kr. Начальное давление $p = 36$ мТор. Градиент поперечного магнитного поля $h = 0.57$ кГс/см

развивались в Ar в присутствии B_z^0-компоненты. Оказалось, что смещение периферийной области токового слоя может довольно резко изменить свое направление относительно плоскости $y = 0$ (рис. 5). Так, при $B_z^0 = -2.9$ кГс периферия слоя смещена

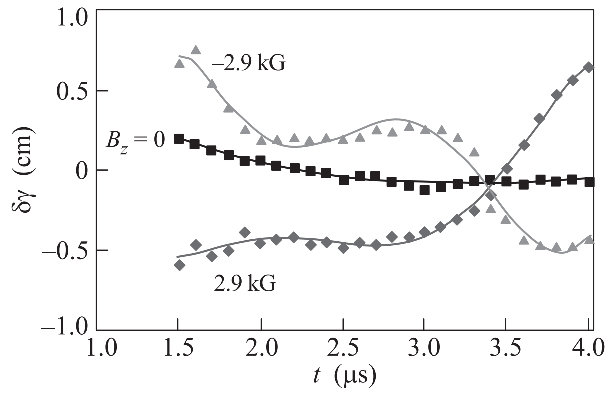

Рис. 5. Смещения δy максимумов плотности тока от средней плоскости токового слоя ($y = 0$) в зависимости от времени при $B_z^0 = 0$, $+2.9$ и -2.9 кГс. Токовые слои формировались в Ar. Начальное давление $p = 28$ мТор. Градиент поперечного магнитного поля $h = 0.5$ кГс/см

по вертикали в область $y > 0$ в течение интервала времени $t = (1.5{-}3.3)$ мкс. Однако затем ($t \approx$ $\approx (3.5{-}4)$ мкс) направление смещения δy изменяется на противоположное и слой перемещается в область $y < 0$, т.е. происходит переориентация токового слоя. При $B_z^0 = +2.9$ кГс ситуация обратная: слой из области $y < 0$, пройдя через среднюю плоскость $y = 0$, смещается в область $y > 0$. Другими словами, в течение времени эволюции токового слоя, сформированного в Ar в присутствии продольной компоненты B_z^0 обоих направлений, периферийная область слоя, расположенная при $x = -5$ см, испытывает разнонаправленные вертикальные смещения, т.е. совершает колебания относительно средней плоскости $y = 0$ (рис. 5).

4. Характер вертикальных смещений периферии токового слоя позволяет связать этот эффект с появлением дополнительных сил, возникающих в результате возбуждения в слое токов Холла и их взаимодействия с продольной B_z-компонентой магнитного поля. Такая интерпретация была предложена ранее для объяснения структуры наклонных асимметричных плазменных слоев, которые наблюдались в идентичных условиях [11, 12].

Согласно обобщенному закону Ома [24] плотность токов Холла $\mathbf{j}^{\mathrm{H}}$ может быть представлена следующим образом:

$$\mathbf{j}^{\mathrm{H}} = -(\sigma/ceN_e)[\mathbf{j}_z \times \mathbf{B}_\perp]. \qquad (2)$$

Здесь $\mathbf{j}_z$ – плотность основного тока в слое, $\mathbf{B}_\perp$ – поперечное магнитное поле в плоскости (xy). Токи Холла $\mathbf{j}^{\mathrm{H}}$ протекают в плоскости (xy) и образуют в пределах токового слоя четыре замкнутых контура, создавая дополнительное магнитное поле B_z квадрупольного типа [14]. В средней плоскости слоя ($y = 0$) токи Холла $j_x^{\rm H}$ в большинстве случаев направлены от обоих боковых концов слоя к его середине навстречу друг другу, т.е. при $x > 0$ и $x < 0$ токи $j_x^{\rm H}$ направлены в противоположные стороны, а вблизи X-линии $j_x^{\rm H} \approx 0$.

В результате наряду с силами, вызывающими сжатие тока и плазмы в пределы слоя, в присутствии продольной компоненты магнитного поля B_z возникают дополнительные силы

$$f_y = -1/c \cdot (j_x^{\rm H} B_z), \tag{3}$$

которые в областях $x > 0$ и $x < 0$ вызывают разнонаправленные вертикальные смещения токового и плазменного слоев (см. [11, 12]). При изменении направления B_z^0 на противоположное изменяются направления действия сил f_y и, соответственно, направления вертикальных смещений токовых слоев δy. Этот эффект можно пронаблюдать на рис. 2, 4 и 5 (см. также [11, 12]).

Ускорение ионов вдоль поверхности слоя от середины к боковым краям приводит к постепенному затуханию токов Холла; с увеличением массы ионов плазмы характерное время существования токов Холла возрастает [14]. По мере затухания токов Холла силы f_y уменьшаются. В результате могут уменьшаться абсолютные величины вертикальных смещений периферийных областей токовых слоев $|\delta y|$ (см. зависимости $\delta y(t)$ на рис. 4 и 5). При этом в интервале 2–3 мкс отклонения $|\delta y|$ токовых слоев, которые развивались в Ar, уменьшаются значительно быстрее, чем в плазме с более тяжелыми ионами Kr. Подобная зависимость характерна и для плазменных слоев [11, 12].

Как было обнаружено в настоящей работе, в поздние моменты времени вновь происходит увеличение вертикального смещения $|\delta y|$ периферийной области токового слоя, сформированного в Ar (рис. 5). Существенно, что на этой стадии смещение слоя относительно плоскости $y = 0$ имеет противоположное направление по сравнению с предыдущими моментами времени.

В соответствии с изложенной выше интерпретацией вертикальные смещения токового слоя определяются силами f_y (3), направления которых зависят как от направлений токов Холла $j_x^{\rm H}$, так и от направления продольной компоненты магнитного поля B_z. Поскольку направление B_z в течение всего времени существования слоя остается постоянным, изменение знака вертикальных смещений указывает на то, что изменилось направление токов Холла. Такое изменение можно связать с генерацией у боковых краев слоя токов j_z обратного направления по отношению к основному току в центральной области. Появление обратных токов на поздней стадии эволюции токового слоя было сравнительно недавно обнаружено в экспериментах [18, 19] в соответствии с теоретическим предсказанием [25]. Действительно, как видно из соотношения (2), направление основного тока в слое j_z однозначно определяет направление токов Холла, так как направление поперечного магнитного поля $B_\perp$ остается неизменным.

Подчеркнем, что переориентация слоя происходит только при его формировании в Ar (рис. 5), тогда как в Kr данный эффект отсутствует (рис. 4). В связи с этим отметим, что, как было установлено в работе [18], возбуждение обратных токов j_z наиболее отчетливо проявляется при формировании токового слоя в Ar, а в Kr обратные токи либо малы, либо полностью отсутствуют. Это указывает на то, что именно генерация обратных токов у боковых краев токового слоя вызывает появление противоположно направленных токов Холла, которые вновь приводят к вертикальным отклонениям периферийных областей слоя, но уже противоположного знака. Эффект переориентации токового слоя на поздней стадии эволюции служит еще одним (косвенным) доказательством возбуждения в токовом слое обратных токов, которые возникают в результате движения высокоскоростных потоков плазмы в сильном магнитном поле [18, 19].

Таким образом, разнонаправленные вертикальные отклонения периферийных областей токового слоя на всех этапах эволюции связаны с возбуждением в слое токов Холла и их взаимодействием с продольной компонентой магнитного поля B_z.

Измеренные отклонения максимумов плотности тока от средней плоскости на краях слоя удовлетворительно согласуются с величинами отклонений максимумов концентрации плазмы. Изменения во времени обоих отклонений также близки друг другу. Таким образом, имеется корреляция между распределениями плотности тока и плотности плазмы в асимметричных токовых слоях.

5. Итак, в настоящей работе впервые зарегистрированы вертикальные смещения периферийных областей токового слоя относительно его средней плоскости при формировании слоя в 3D магнитной конфигурации с продольной компонентой магнитного поля B_z^0, направленной вдоль X-линии. При изменении направления B_z^0 знак вертикального смещения изменяется. Абсолютная величина смещения возрастает с увеличением массы ионов плазмы. Полученные зависимости, а также характер изменения со временем смещений концов слоя свидетельствуют о том, что данный эффект возникает в результате возбуждения токов Холла и появления вертикально направленных сил в присутствии продольной компоненты магнитного поля B_z. Отметим, что основные характеристики вертикальных смещений токовых слоев качественно согласуются с особенностями деформации плазменных слоев в аналогичных условиях.

Обнаружено, что знак вертикальных смещений периферийных областей токовых слоев может изменяться на противоположный на поздней стадии эволюции, что свидетельствует об изменении направления токов Холла. Эффект переориентации был зарегистрирован при развитии токового слоя в Ar, т.е. только в условиях, при которых происходит генерация токов обратного направления в периферийных областях слоя. Действительно, при изменении направления основного тока в слое должно изменяться и направление токов Холла, что в конечном итоге вызывает переориентацию токового слоя. В отличие от Ar, при развитии слоя в Kr ни обратных токов, ни переориентации токового слоя не наблюдалось. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии токов Холла на структуру токовых слоев, развивающихся в 3D магнитных конфигурациях.

Подчеркнем, что токи Холла возбуждаются с самого начала формирования токового слоя, а их постепенное затухание обусловлено ускорением плазмы вдоль поверхности слоя от центральной области к обоим боковым краям. Внедрение ускоренных плазменных потоков в периферийные области слоя, где нормальная компонента магнитного поля имеет значительную напряженность, приводит к генерации электрических полей и токов, направление которых противоположно направлению тока в центральной (большей) части слоя. Обратные токи на краях слоя вызывают возбуждение токов Холла, которые направлены противоположно по отношению к токам Холла на начальной стадии эволюции. Таким образом, вертикальные колебания периферийных областей токового слоя, которые возникают при возбуждении разнонаправленных токов Холла в присутствии продольной компоненты магнитного поля, являются естественной составной частью динамических процессов в токовых слоях.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ОФН-15 РАН “Плазменные процессы в космосе и в лаборатории” и грантом РФФИ # 12-02-00553а.

1. S. I. Syrovatskii, Ann. Rev. Astron. & Astrophys. **19**, 163 (1981).
2. Э. Прист, Т. Форбс, *Магнитное пересоединение*, Физматлит, М. (2005).
3. E. G. Zweibel and M. Yamada, Ann. Rev. Astron. & Astrophys. **47**, 291 (2009).
4. M. Yamada, R. Kulsrud, and H. Ji, Rev. Mod. Phys. **82**, 603 (2010).
5. А. Г. Франк, УФН **180**, 982 (2010).
6. A. V. Artemyev, A. A. Petrukovich, A. G. Frank, R. Nakamura, and L. M. Zelenyi, J. Geophys. Res. **118**, 2789 (2013).
7. H. V. Malova, V. Y. Popov, O. V. Mingalev, I. V. Mingalev, M. N. Mel?nik, A. V. Artemyev, A. A. Petrukovich, D. C. Delcourt, C. Shen, and L. M. Zelenyi, J. Geophys. Res. **117**, A04212 (2012).
8. A. G. Frank, S. Yu. Bogdanov, V. S. Markov, G. V. Ostrovskaya, and G. V. Dreiden, Phys. Plasmas **12**, 052316 (2005).
9. С. Ю. Богданов, С. Г. Бугров, В. П. Грицына, О. В. Зверев, Г. В. Карпов, В. С. Марков, Д. В. Репин, А. Г. Франк, Физика плазмы **33**, 483 (2007).
10. A. G. Frank, S. G. Bugrov, and V. S. Markov, Phys. Lett. A **373**, 1460 (2009).
11. A. G. Frank, S. Yu. Bogdanov, G. V. Dreiden, V. S. Markov, and G. V. Ostrovskaya, Phys. Lett. A **348**, 318 (2006).
12. С. Ю. Богданов, Г. В. Дрейден, В. С. Марков, Г. В. Островская, А. Г. Франк, Физика плазмы **33**, 1014 (2007).
13. M. Yamada, Y. Ren, H. Ji, J. Breslau, St. Gerhardt, R. Kulsrud, and A. Kuritsyn, Phys. Plasmas **13**, 052119 (2006).
14. A. G. Frank, S. G. Bugrov, and V. S. Markov, Phys. Plasmas **15**, 092102 (2008).
15. Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Физика плазмы **36**, 387 (2010).
16. Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ **95**, 17 (2012).
17. Н. П. Кирий, А. Г. Франк, Физика плазмы **38**, 1042 (2012).
18. А. Г. Франк, С. Н. Сатунин, Физика плазмы **37**, 889 (2011).
19. A. G. Frank, N. P. Kyrie, and S. N. Satunin, Phys. Plasmas **18**, 111209 (2011).
20. Г. В. Островская, А. Г. Франк, Физика плазмы **40**, 24 (2014).
21. С. Ю. Богданов, В. Б. Бурилина, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ **59**, 510 (1994).
22. A. G. Frank, Plasma Phys. & Contr. Fusion **41**(3A), A687 (1999).
23. С. Ю. Богданов, Н. П. Кирий, В. С. Марков, А. Г. Франк, Письма в ЖЭТФ **71**, 72 (2000).
24. А. С. Кингсеп, К. В. Чукбар, В. В. Яньков, *Вопросы теории плазмы*, Энергоатомиздат, М. (1987), вып. 16, с. 209.
25. С. И. Сыроватский, ЖЭТФ **60**, 1727 (1971).