УДК 52-854

# КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВАРИАЦИИ В ИОННЫХ ПОТОКАХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ И НА ЕГО ГРАНИЦЕ

© 2019 г. А. П. Кропоткин\*

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

> \*e-mail: apkrop@dec1.sinp.msu.ru Поступила в редакцию 04.12.2018 г. После доработки 04.03.2019 г. Принята к публикации 23.05.2019 г.

Результаты, получаемые при многоспутниковых одновременных наблюдениях в геомагнитном хвосте, на небольших удалениях ~ $10R_E$ , в двух близко расположенных областях внутри плазменного слоя геомагнитного хвоста и на границе этого слоя, указывают на кинетическую природу процессов в плазме геомагнитного хвоста. Наблюдаемая картина одновременных возмущений в ионных потоках и в их анизотропии возникает из-за присутствия тонкого кинетического токового слоя в хвосте. Он расположен на удалениях, бо́льших, чем области наблюдений в таком эксперименте. Как было показано ранее, тонкий токовый слой, вложенный в более толстый плазменный слой, является важнейшей составной частью магнитоплазменной структуры, отвечающей процессу магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы. Соответственно, те кинетические структуры, которые наблюдаются в таком эксперименте, оказываются проявлением типичного возмущения, отвечающего магнитному пересоединению на бо́льших удалениях.

DOI: 10.1134/S0016794019050067

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Новые возможности в понимании процессов в геомагнитном хвосте представляются благодаря одновременным *многоточечным измерениям*. Эти измерения позволяют обнаруживать быстрые плазменные потоки с разными пространственными масштабами [Liu et al., 2013, 2014; Runov et al., 2011; Gabrielse et al., 2017], наблюдать торможение потоков и формирование фронта диполизации [Runov et al., 2006, 2011; Sergeev et al., 2009; Zhou et al., 2011], прослеживать появление тонких токовых слоев [Baumjohann et al., 2007; Nakamura et al., 2006; Zhou et al., 2009], изучать динамику двухпотоковых ионных распределений в пограничной области плазменного слоя в ее соотношении с динамикой быстрых потоков в центральной части плазменного слоя [Zhou et al., 2012].

В наблюдениях, проводящихся в геомагнитном хвосте, в пограничной области плазменного слоя (PSBL), обычно видны ионные пучки, направленные вдоль магнитного поля, имеющие серповидную структуру функции распределения по скоростям. Соответствующие плазменные структуры в литературе называют бимлетами. Таким наблюдениям, а также некоторым аспектам их интерпретации посвящена обширная литература. Здесь мы ограничимся указанием на современный обзор [Зеленый и др., 2016]. До сих пор предполагалось, что эти потоки в PSBL происходят из источников, имеющих почти постоянную либо импульсную природу по времени, которые предположительно находятся в хвосте на больших или среднемасштабных удалениях. На самом деле, спутники CLUSTER многократно пересекали плазменный слой с небольшим удалением друг от друга по Х-координате и при разных, но близких значениях Z-координаты. Однако в попытках интерпретации этих измерений посредством теоретических и численных моделей не уделялось достаточного внимания взаимоотношению потоков в близлежащих областях PSBL и центрального плазменного слоя (CPS). Это было связано, во многом, с теоретическими представлениями о квазиадиабатическом механизме формирования бимлетов, когда их источник находится не в непосредственной близости от места наблюдения, а в более отдаленной части потоковой трубки, куда проектируется соответствующая силовая линия из PSBL, и этот процесс ускорения не связан непосредственно с нестационарной динамикой потоков плазмы в CPS.

Представляло существенную трудность установить механизм, который связывает пучки, наблюдаемые в PSBL, с их источниками в экваториальной области. Непосредственная трудность за-

ключалась в "тайминге", т.е., определении, в какой последовательности и через какие промежутки времени появляется возмущение в двух разных смежных областях, принадлежащих к PSBL и CPS. Для этого были необходимы одновременные непрерывные измерения в PSBL и в прилегающем CPS, проводимые на разных спутниках, разнесенных на  $1-2 R_E$  (это типичное значение толщины плазменного слоя) в направлении север-юг. Такая идеальная экспериментальная ситуация была реализована в 2009 г., когда в эксперименте THEMIS были получены данные с двух одинаковых спутников (Р4 и Р5), которые оказались вертикально разнесенными на 1  $R_{E}$ , находясь в ближней к Земле части геомагнитного хвоста [Zhou et al., 2012].

В настоящей работе мы обращаем внимание на тот факт, что существенные особенности ионных потоков, наблюдаемых одновременно в соседних областях PSBL и CPS, указывают на общее происхождение этих потоков из "слоя пересоединения" (reconnection layer) - плазменной структуры, спорадически возникающей как кинетический тонкий анизотропный токовый слой. Мы рассмотрим проблемы, которые возникают при интерпретации наблюдений без учета этого эффекта, а также связь быстрых потоков в центральной части плазменного слоя и двухпотоковой анизотропии на его периферии, которая объясняется в существующей теории [Domrin and Kropotkin, 2004; Кропоткин и Домрин, 2009; Кгоpotkin and Domrin, 2009; Kropotkin, 2013; Кропоткин, 2012, 2014].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ТРУДНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ, ПРОВЕДЕННОЙ ЕГО АВТОРАМИ

Именно при изучении данных такого многоточечного эксперимента THEMIS [Zhou et al, 2012], как для отдельных случаев, так и в статистическом плане, которые были получены одновременно в ближней к Земле части PSBL и в прилегающей области центрального плазменного слоя (CPS), была выяснена *нестационарная, импульсная природа пучков в* PSBL и их связь с кратковременными потоками плазмы (BBF), наблюдаемыми в CPS и с сопутствующими фронтами диполизации. Было показано, что пучки в PSBL обычно возникают за несколько минут до появления потока в CPS; а такой поток, в свою очередь, на несколько десятков секунд предшествует приходу фронта диполизации.

Авторы [Zhou et al., 2012] показали, что эти временные корреляции, серповидная структура в пучках PSBL, возрастания потока в CPS в направлениях к Земле и на утреннюю сторону, как и другие характеристики ионных распределений, мож-

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 59 № 5 2019

но воспроизвести в простой модели с отражением и ускорением ионов, происходящими на фронтах диполизации, распространяющимися к Земле, которые сопутствуют кратковременным потокам плазмы в CPS. Эти представления, как считают авторы [Zhou et al., 2012], дают объединенную картину импульсных процессов переноса в широтном направлении, происходящих в околоземной части плазменного слоя в геомагнитном хвосте.

Представляется однако, что такая трактовка наблюдательных данных, которые очень важны сами по себе, все же неправильна. Укажем здесь на некоторые существенные пункты.

2.1. В работах [Zhou et al., 2012; Nakamura et al., 2017] приведены результаты многоточечного исследования отдельных случаев, когда были получены ионные распределения в плазменном слое геомагнитного хвоста, в разных местах, находящихся, как авторы считают, вниз по течению от фронта диполизации, распространяющегося к Земле. Проведенное авторами моделирование, о котором сказано выше, опирается на определенный профиль радиальной зависимости магнитного поля В, отвечающий наличию фронта диполизации на большом расстоянии,  $21R_{E}$ , в глубине геомагнитного хвоста. Но, во-первых, выглядит сомнительным помещение фронта диполизации, который должен отвечать сгребанию магнитного потока к Земле при нестационарных быстрых плазменных движениях, отвечающих суббуревым возмущениям, на таком удалении. Те вариации, которые реально наблюдаются на  $11R_E$ , и в которых, действительно, виден фронт, это - совсем другое дело. Появление фронта диполизации именно на таких расстояниях происходит и в современных трехмерных МГД-моделях [Birn and Hesse, 2011; Wiltberger et al., 2015, и др.]. Во-вторых, сам задаваемый в [Zhou et al., 2012] профиль поля выглядит произвольным, он никак не соответствует имеющимся численным эмпирическим моделям поля в хвосте. В-третьих, моделирование проведено путем прослеживания траекторий пробных частиц – ионов в заданных полях, т.е. без самосогласованного решения кинетической задачи.

2.2. Потоки плазмы и возмущения магнитного поля в геомагнитном хвосте, сопровождающие возмущение в его удаленной части, так или иначе искусственно моделирующее взрыв магнитного пересоединения, воспроизводятся неплохо в указанных трехмерных МГД моделях [Birn and Hesse; Wiltberger et al., 2015 и др.]. Однако из указанной работы [Zhou et al., 2012] отчетливо видно, что есть и важные наблюдаемые проявления, которые не могут быть воспроизведены в МГД-модели: только процессы в бесстолкновительной кинетике могут приводить к двухпотоковой структуре ионных распределений в PSBL, причем вдали от области пересоединения. Это – отклики тех кинетических процессов, которые, как мы считаем, в зоне пересоединения приводят к формированию анизотропного кинетического тонкого слоя [Кропоткин, 2012, 2014; Кропоткин и Домрин, 2009; Kropotkin, 2013; Kropotkin and Domrin, 2009].

## 3. СВЯЗЬ БЫСТРЫХ ПОТОКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ И ДВУХПОТОКОВОЙ АНИЗОТРОПИИ НА ЕГО ПЕРИФЕРИИ: СУЩЕСТВУЮЩАЯ ТЕОРИЯ

Как показано в нашей недавней работе [Кропоткин, 2019], механизм возникновения локализованных быстрых плазменных потоков в геомагнитном хвосте, которые были идентифицированы и исследованы в недавних спутниковых экспериментах (bursty bulk flows, BBF: dipolarizing flux bundles, DFB) [Liu et al., 2013; Liu et al., 2014; Runov et al., 2011], тесно связан с тонкими токовыми слоями, обнаруженными в тех же экспериментах CLUSTER, THEMIS [Runov et al., 2006; Nakamura et al., 2006; Baumjohann et al., 2007; Zhou et al., 2009]. Теория тонкого анизотропного токового слоя в кинетике бесстолкновительной плазмы была построена уже достаточно давно [Kropotkin and Domrin, 1996; Kropotkin et al., 1997; Sitnov et al., 2000], а динамика его возникновения была установлена в последующих исследованиях, проведенных теоретически и посредством численного моделирования [Domrin and Kropotkin. 2004; Домрин и Кропоткин, 2007; Kropotkin and Domrin, 2009; Кропоткин и Домрин, 2009; Зеленый и др. 2009; Домрин и др., 2016]. Согласно этой теории, в разных частях плазменного слоя, на различных удалениях от центральной плоскости, анизотропия имеет разный характер. В пограничной области плазменного слоя, вне зоны сильного тока, возникает двухпотоковое распределение ионов.

Появление тонкой токовой структуры с сильно анизотропной функцией ионного распределения, вложенной в более толстый плазменный слой, является результатом самоорганизации в нелинейной диссипативной системе. Следуя работе [Зеленый и др. 2009], кратко опишем последовательные стадии эволюции системы. Как известно, характерная особенность медленной квазистатической эволюции глобальной магнитосферной равновесной конфигурации, предшествующей быстрым суббуревым возмущениям, состоит в сильном утоньшении плазменного слоя в геомагнитном хвосте. После такого утоньшения плазменного слоя в нем становятся возможными локальные (среднемасштабные,  $\leq 10R_E$  вдоль геомагнитного хвоста) срывы равновесия — нарушения баланса магнитного натяжения и продольного градиента давления. Эти нарушения происходят в результате быстрых перестроек магнитного поля в геомагнитном хвосте, характеризующихся малой длительностью распространения МГД-сигнала в долях хвоста.

Динамический процесс, следующий за потерей равновесия, характеризуется намного большей длительностью, что обусловлено малостью нормальной компоненты магнитного поля и значительной массовой плотностью плазмы в слое. Эта эволюция была численно промоделирована с применением метода частиц [Домрин и Кропоткин, 2007].

Нестационарное решение содержит быстрое возмущение, убегающее в обе стороны от центральной плоскости токового слоя (ТС) как автомодельная быстрая магнитозвуковая волна разрежения. Возникающее при этом индукционное электрическое поле  $E_y$ , проникает внутрь TC. В разных зонах с этим полем связаны разные эффекты. На периферии ТС происходит перенос электромагнитной энергии и конвекция холодной плазмы по направлению к центру. Внутри слоя электрическое поле ускоряет пролетные ионы. Они формируют на периферии ТС встречный поток вдоль магнитных силовых линий. Область двухпотокового движения медленно расширяется. А внутри слоя под действием скрещенных полей  $E_v$  и малой нормальной к слою компоненты  $B_z$ плазма быстро движется вдоль оси x (в солнечномагнитосферной системе координат). За время порядка 10  $\Omega_0^{-1}$  ( $\Omega_0$  – гирочастота иона в поле  $B_0$  вне TC) спонтанно формируется очень тонкая почти стационарная структура. Таким образом, процесс самоорганизации приводит плазму в центральной области в новое состояние равновесия, где магнитное натяжение сбалансировано силой инерции ионов с анизотропным распределением по скоростям. Возникающая равновесная конфигурация представляет собой вынужденный кинетический токовый слой (ВКТС), на котором электромагнитная энергия трансформируется в кинетическую энергию ускоренных ионных потоков.

Такая токовая структура существенным образом связана с процессами магнитного пересоединения: указанная быстрая трансформация энергии магнитного поля в энергию плазменных потоков происходит сразу на больших продольных пространственных масштабах, вне окрестности нулевой линии, что и обеспечивает высокую скорость пересоединения.

Таким образом, обнаруженное в эксперименте [Zhou et al, 2012] "сосуществование" быстрых плазменных потоков в центральной части плазменного слоя и встречных ионных пучков в его пограничной части было предсказано нашей теорией [Domrin and Kropotkin, 2004; Домрин и Кро-

565

поткин, 2007; Kropotkin and Domrin, 2009; Кропоткин и Домрин, 2009]. Оно оказывается естественным следствием процессов магнитного пересоединения в геомагнитном хвосте, происходящих в его более удаленной зоне, чем область наблюдения на  $11R_E$ . В отличие от интерпретации авторов эксперимента [Zhou et al., 2012], мы считаем, что этот эффект не имеет отношения к возникновению фронта диполизации. Этот фронт появляется на существенно меньших расстояниях при приближении быстрого плазменного потока к Земле.

При этом наша теория формирования тонких кинетических токовых структур, которое происходит вследствие локальных (среднемасштабных,  $\leq 10R_E$  вдоль геомагнитного хвоста) нарушений продольного равновесия в плазменном слое, позволяет понять и наблюдаемый "тайминг" в области  $x \approx 10R_E$ . Более быстрые продольные потоки в PSBL, со скоростью близкой к  $2V_{A0}$ , приходят раньше, чем потоки в CPS, приходящие со скоростью  $\approx V_{A0}$ . Здесь  $V_{A0}$  – значение альвеновской скорости в геомагнитном хвосте, вне плазменного слоя; типичное значение этой скорости – порядка 1000 км/с. Фронт диполизации, обусловленный сгребанием плазмы в CPS, должен соответственно появляться еще позже.

Пример результатов численного моделирования показан на рис. 1 согласно [Kropotkin and Domrin, 2009; Кропоткин и Домрин, 2009; Кгоpotkin, 2013]. Схематически к разным областям в геомагнитном хвосте (плазменный слой выделен цветом) отнесены изображения расчетной функции ионного распределения – распределения по компонентам скорости:  $v_x$  – в направлении к Земле и  $v_v$  – в направлении с утра на вечер. Как видно, важная особенность верхней диаграммы состоит в двухпотоковом характере анизотропии с быстрым потоком, направленным вдоль силовой линии к Земле. А для нижней диаграммы она состоит в сложной, пальцеобразной структуре, центр тяжести которой смещен относительно точки  $v_x = v_y = 0$  по направлению к Земле. Такая пальцеобразная структура имеет объяснение в известных свойствах неадиабатической траектории иона. Ион приходит извне к токовому слою, колеблется затем много раз около его центральной плоскости, совершая движение в проекции на саму эту плоскость в направлении утро-вечер, и затем уходит от токового слоя. При этом, двигаясь в токовом слое, ион ускоряется в электрическом поле утро-вечер. Толстыми черными отрезками на диаграммах показаны значения характерных скоростей, отвечающих каждой из этих двух диаграмм: 2V<sub>A0</sub> – для потоков вне центральной области плазменного слоя и  $V_{A0}$  – для потока в этой центральной области.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В литературе имеется большое число работ, относящихся к исследованиям продольных потоков ионов, наблюдаемых в пограничном слое плазменного слоя, например, обзор [Зеленый и др., 2016] и ссылки, приведенные там. Теоретическая интерпретация таких наблюдаемых "бимлетов" проводится путем привлечения понятия о "резонансных" ионах, многократно приходящих к токовому слою и уходящих от него без рассеяния по фазам ларморовского вращения. Однако мы считаем, что трудно представить себе настолько стационарный токовый слой, что условие резонанса будет сохраняться при таких возвращениях. На самом деле, для ускорения ионов и образования их пучка (на удвоенной альвеновской скорости) достаточно одного пролета при наличии электрического поля утро-вечер, отвечающего магнитному пересоединению в хвосте магнитосферы, как это видно из цитируемых выше наших работ, и условие резонанса представляется несущественным.

Авторы [Zhou et al., 2012] выделяют наличие серповидной структуры в функции распределения как заметную особенность ионных потоков в пограничной области плазменного слоя. Возможная причина этого может состоять в том, что ионы срываются с меандровой траектории внутри токового слоя раньше совершения полуоборота в поле В<sub>n</sub> и уходят от слоя с разными питч-углами, сильно отличными от нуля. Но почему это может происходить? Здесь может влиять наличие компоненты  $B_v \neq 0$  либо переменность поля во времени на масштабе ионного гиропериода в поле  $B_n$ . Однако, по-видимому, эти возможности не играют большой роли: должен был бы возникать большой разброс по энергии, а не только по питч-углу. Возможно, больше подходит взаимодействие волна – частица, происходящее на волнах, возбуждаемых потоковой неустойчивостью возникающего ионного пучка, о котором речь шла выше. При таком механизме, как известно, рассеяние по питч-углу может доминировать над энергетическими потерями.

Интересно, что в наблюдательных результатах, полученных на магнитопаузе, например, [Retinò et al., 2005; Bavassano Cattaneo et al., 2006], а также в работе [Кропоткин, 2014], таких серповидных структур не видно. По-видимому, играет роль то, что в другой фоновой плазме существуют другие условия для раскачки неустойчивости.

Отметим, что представления о связи пучков в PSBL с ускорением на диполяризационном фронте вслед за работой [Zhou et al., 2012], позже были развиты в работах [Birn et al., 2017а; JGR, 2017b]. Однако, следует обратить внимание, что там авторы используют combined MHD/test particle simu-



**Рис. 1.** Схематически показано положение в геомагнитном хвосте тех областей, где численное моделирование [Kropotkin and Domrin, 2009] дает картины ионного распределения, приведенные вверху и внизу. Градациями серого цвета показана плотность функции ионного распределения, полученная из численного моделирования.

lations, т.е. несамосогласованный подход, в котором пробные частицы запускаются в модельные поля, формируемые при предполагаемой МГД эволюции системы. Получаемые при таком подходе результаты, хотя и могут быть похожи на наблюдательные данные экспериментов THEMIS и MMS, как это утверждают авторы, но, по-видимому, не могут служить для надежного теоретического объяснения эффектов возникновения анизотропии в ионных распределениях.

Подводя итог, мы считаем, что результаты, получаемые при многоспутниковых одновременных наблюдениях в близко расположенных, но разных областях плазменного слоя, дают важные указания на кинетическую природу геомагнитной активности, происходящей в хвосте магнитосферы. Именно такая картина почти одновременных возмущений в ионных потоках должна наблюдаться при появлении тонкого кинетического токового слоя в хвосте, расположенного на удалениях, больших, чем у области наблюдений в данном эксперименте. Как показано в наших ранних работах, такой слой, вложенный в более толстый плазменный слой, является важнейшей составной частью магнитоплазменной структуры в геомагнитном хвосте, отвечающей процессу магнитного пересоединения. Таким образом, кинетические структуры, наблюдаемые при возмущениях в хвосте на небольших удалениях  $\sim 10R_{F}$ , оказываются проявлением типичного возмущения, отвечающего магнитному пересоединению на больших удалениях.

Заметим в заключение, что, конечно, базовые представления о возникающих ионных распределениях в наших с В.И. Домриным работах 2004— 2009 гг., опираются на хорошо известное неадиабатическое поведение ионов в тонких токовых слоях. Однако, самосогласованная кинетическая модель, построенная нами, позволяет проследить динамику: как именно возникают предельно тонкие анизотропные TC и соответствующие анизотропные ионные распределения, проследить, как развивается reconnection layer — "слой магнитного пересоединения".

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Домрин В.И., Кропоткин А.П. Динамика срыва равновесия и трансформации электромагнитной энергии в геомагнитном хвосте: теория и моделирование методом частиц. 3. Варианты формирования тонких токовых слоев // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 5. С. 591–600. 2007.

— Домрин В.И., Малова Х.В., Артемьев А.В., Кропоткин А.П. Особенности формирования тонкого токового слоя в хвосте земной магнитосферы // Космич. исслед. Т. 54. № 6. С. 463–478. 2016.

— Зеленый Л.М., Кропоткин А.П., Домрин В.И., Артемьев А.В., Малова Х.В., Попов В.Ю. Разрывная мода в

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 59 № 5 2019

тонких токовых слоях магнитосферы Земли: сценарий перехода в неустойчивое состояние // Космич. исслед. Т. 47. № 5. С. 388–396. 2009.

– Зеленый Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю. Тонкие токовые слои: от работ Гинзбурга – Сыроватского до наших дней // Успехи физических наук. Т. 186. № 11. С. 1153–1188. 2016.

*— Кропоткин А.П.* Магнитосферная суббуря: срыв магнитоплазменного равновесия как нелинейная динамическая бифуркация // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 2. С. 1–7. 2012.

- Кропоткин А.П. Конверсия энергии и магнитное пересоединение в космической плазме: роль нелинейных кинетических процессов и структур // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 4. С. 435–443. 2014.

 Кропоткин А.П. Силовые трубки диполизации // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 2. С. 175–182. 2019.

- Кропоткин А.П., Домрин В.И. Динамика геомагнитного хвоста: разные типы равновесий и переходы между ними // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 2. С. 180–190. 2009.

- Baumjohann W., Roux A., Le Contel O., Nakamura R., Birn J., Hoshino M., Lui A.T.Y., Owen C.J., Sauvaud J.-A., Vaivads Andris, Fontaine D., Runov A. Dynamics of thin current sheets: Cluster observations // Ann. Geophys. V. 25. № 6. P. 1365–1389. 2007.

- Bavassano Cattaneo M.B. et al. Kinetic signatures during a quasi-continuous lobe reconnection event: Cluster Ion Spectrometer (CIS) observations // J. Geophys. Res. V. 111, A09212. 2006.

https://doi.org/10.1029/2006JA011623

- Birn J., Nakamura R., Panov E. V., Hesse M. Bursty bulk flows and dipolarization in MHD simulations of magnetotail reconnection // J. Geophys. Res. V. 116, A01210. 2011. https://doi.org/10.1029/2010JA016083

- Birn J., Runov A., Zhou X.Z. Ion velocity distributions in dipolarization events: Distributions in the central plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 122. P. 8014–8025. 2017a.

*– Birn J., Chandler M., Moore T., Runov A., Zhou X.Z.* Ion velocity distributions in dipolarization events: Beams in the vicinity of the plasma sheet boundary // J. Geophys. Res. V. 122. P. 8026–8036. 2017b.

*– Domrin V.I., Kropotkin A.P.* Forced current sheet structure, formation and evolution: application to magnetic reconnection in the magnetosphere// Ann. Geophys. V. 22. P. 2547–2553. 2004.

https://doi.org/10.5194/angeo-22-2547-2004

Gabrielse C., Angelopoulos V., Harris C., Artemyev A., Kepko L., Runov A. Extensive electron transport and energization via multiple, localized dipolarizing flux bundles // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 122. P. 5059–5076. 2017.

https://doi.org/10.1002/2017JA023981

- *Kropotkin A.P.* Processes in current sheets responsible for fast energy conversion in the magnetospheric collisionless plasma // http://arxiv.org/abs/1302.2795. 2013.

- *Kropotkin A.P., Domrin V.I.* Theory of a thin one-dimensional current sheet in collisionless space plasma // J. Geophys. Res. V. 101. P. 19893–19902. 1996.

- Kropotkin A.P., Domrin V.I. Kinetic thin current sheets: their formation in relation to magnetotail mesoscale turbu-

lent dynamics // Ann. Geophys. V. 27. № 7. P. 1353–1362. 2009

- *Kropotkin A.P., Malova H.V., Sitnov M.I.* The self-consistent structure of a thin anisotropic current sheet // J. Geophys. Res. V. 102. P. 22099–22106. 1997.

- Liu J., Angelopoulos V., Runov A., Zhou X.-Z. On the current sheets surrounding dipolarizing flux bundles in the magnetotail: The case for wedgelets // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 118. P. 2000–2020. 2013.

https://doi.org/10.1002/jgra.50092

- *Liu J., Angelopoulos V., Zhou X.-Z., Runov A.* Magnetic flux transport by dipolarizing flux bundles // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 119. P. 909–926. 2014. https://doi.org/10.1002/2013JA019395

- Nakamura R., Baumjohann W., Runov A., Asano Y. Thin current sheets in the magnetotail observed by Cluster // Space Sci. Rev. V. 122. № 1–4. P. 29–38. 2006.

- Nakamura R., Nagai T., Birn J. et al. Near-Earth plasma sheet boundary dynamics during substorm dipolarization // Earth, Planets and Space. V. 69. P. 129–142. 2017. https://doi.org/10.1186/s40623-017-0707-2

– Retinò A., Bavassano Cattaneo M.B., Marcucci M.F. et al. Cluster multispacecraft observations at the high-latitude duskside magnetopause: implications for continuous and component magnetic reconnection // Ann. Geophys. V. 23. P. 461–473. 2005.

– Runov A., Sergeev V.A., Nakamura R. et al. Local structure of the magnetotail current sheet: 2001 Cluster observations // Ann. Geophys. V. 24. P. 247–262. 2006.

- Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z., Zhang X.J., Li S., Plaschke F., Bonnell J. A THEMIS multicase study of dipolarization fronts in the magnetotail plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 116. A05216. 2011.

https://doi.org/10.1029/2010JA016316

- Sergeev V.A., Angelopoulos V., Apatenkov S., Bonnell J., Ergun R., Nakamura R., McFadden J.P., Larson D., Runov A. Kinetic structure of the sharp injection/dipolarization front in the flow braking region // Geophys. Res. Lett. V. 36. L21105. 2009.

https://doi.org/10.1029/2009GL040658

- Sitnov M.I., Zelenyi L.M., Malova H.V., Sharma A.S. Thin current sheet embedded within a thicker plasma sheet: Selfconsistent theory // J. Geophys. Res. V. 105. № A6. P. 13029–13043. 2000.

- Wiltberger M., Merkin V., Lyon J.G., Ohtani S. High-resolution global magnetohydrodynamic simulation of bursty bulk flows // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 120. P. 4555– 4566. 2015.

https://doi.org/10.1002/2015JA021080

*– Zhou X.-Z., Angelopoulos V., Runov A. et al.* Thin current sheet in the substorm late growth phase: Modeling of THEMIS observations // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 114. № A03223. 2009.

https://doi.org/10.1029/2008JA013777

− Zhou X.-Z., Angelopoulos V., Sergeev V., Runov A. On the nature of precursor flows upstream of advancing dipolarization fronts // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 116.  $N^{\circ}$  A03222. 2011.

https://doi.org/10.1029/2010JA016165

- Zhou X.-Z., Angelopoulos V., Runov A., Liu J., Ge Y.S. Emergence of the active magnetotail plasma sheet boundary from transient, localized ion acceleration // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 117. № A10216. 2012. https://doi.org/10.1029/2012JA018171