

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТОСФЕРНОМ ТОКОВОМ СЛОЕ И В ТОКОВЫХ СЛОЯХ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

© 2022 г. И. В. Зимовец¹, *, А. С. Лукин^{1, 2}, А. В. Артемьев^{1, 3}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

³Калифорнийский университет, Лос-Анджелес, США

*ivanzim@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 29.06.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Пересоединение магнитных силовых линий представляет собой универсальный процесс высвобождения запасенной энергии магнитного поля и ее трансформации в тепловую энергию плазмы и энергию ускоренных заряженных частиц. Инициализация и протекание процесса магнитного пересоединения существенным образом связана с динамикой пространственно локализованной области сильных плазменных токов – токового слоя. Две наиболее изученные космические магнито-плазменные системы, содержащие токовые слои, – это хвостовая область земной магнитосферы и области с близко расположенными вытянутыми силовыми линиями магнитного поля противоположной полярности в солнечной короне (в частности, лучи корональных стримеров и эруптивные вспышки). Однако, если для земной магнитосферы основным источником информации о структуре и динамике токовых слоев являются многочисленные прямые измерения спутниковых миссий, то для солнечной короны некоторые характеристики токового слоя могут восстанавливаться на основе удаленных наблюдений квазипериодических осцилляций. Как следствие, для прояснения возможных механизмов, ответственных за данные осцилляции, представляется актуальным сопоставление свойств осцилляций токового слоя земной магнитосферы и токовых слоев солнечной короны. Именно такому сравнительному анализу и посвящена данная работа, в которой приводится небольшой обзор имеющейся информации о квазипериодической динамике магнитосферного токового слоя и обсуждается вероятная интерпретация данной динамики в терминах и параметрах наблюдений квазипериодических процессов в токовых слоях солнечной короны.

DOI: 10.31857/S0023420622060127

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование пространственно локализованной области с сильным током, токового слоя, и последующая неустойчивость такого слоя, приводящая к пересоединению силовых линий магнитного поля, является достаточно универсальным механизмом трансформации энергии магнитного поля в нагрев плазмы и ускорение заряженных частиц [21, 115, 108]. Похожие сценарии динамики магнитных полей и плазмы реализуются в магнитосферах планет [68], солнечном ветре [57, 113], солнечной короне [12, 115] и ряде астрофизических систем [4, 136]. При этом наиболее изученной системой с токовым слоем и магнитным пересоединением, помимо различных лабораторных экспериментов [49, 51, 158, 151], является хвостовая область земной магнитосферы [56]. Благодаря роли магнитного пересоединения магнитосферного токового слоя в ди-

намике радиационных поясов [19] и возмущениях ионосферы и магнитного поля на авроральных широтах [37], существенные усилия многочисленных спутниковых миссий [2, 24, 43] направлены на детальное изучение структуры и динамики плазмы и магнитных полей данного слоя [109, 123]. Следующими в списке на детальное изучение стоят многочисленные токовые слои, формирующиеся в активных областях (или над ними) солнечной короны. Магнитное пересоединение в данных слоях является триггером корональных выбросов массы (КВМ) – основного явления в гелиосфере, ответственного за космическую погоду на Земле [127, 152]. Ввиду сильной аналогии процесса магнитного пересоединения в токовых слоях солнечной короны и земной магнитосферы, закономерными являются многочисленные попытки провести детальное сопоставление этих процессов [11, 18, 137, 140]. Важность таких сопо-

ставлений связана с отсутствием прямых измерений плазмы и магнитного поля в корональных токовых слоях, при большом богатстве таких измерений в магнитосферных слоях. Как следствие, рассматривается возможность использовать многочисленные спутниковые измерения в хвостовой области магнитосферы для улучшения интерпретации результатов всевозможных не прямых измерений параметров плазмы и магнитных полей в токовых слоях солнечной короны [11, 118].

Следует отметить, что несмотря на общую схожесть процессов формирования интенсивных токов и их динамику, приводящую к магнитному пересоединению в токовых слоях земной магнитосферы и солнечной короны [11, 18, 137, 140], параметры плазмы и магнитного поля в этих системах существенно отличаются. Для токового слоя хвостовой области земной магнитосферы характерным является сильная вариация плазменного β (отношение теплового давления плазмы к магнитному давлению) поперек токового слоя: β достигает сотен в области локализации тока и падает до 1/10 на границах слоя [15]. Таким образом, магнитосферный токовый слой представляет собой область высоких β , и многие динамические процессы (включая различные моды колебаний) доминированы диамагнитными эффектами сжимаемых возмущений с жесткой антикорреляцией возмущений давления плазмы и давления магнитного поля. Для токовых слоев солнечной короны, напротив, характерным является режим малого β (сильные магнитные поля). Однако в непосредственной близости (пространственной и временной) от области магнитного пересоединения, интенсивность магнитного поля падает и вклады давления плазмы, обеспечивающие поперечные токи, растут, что приближает токовые слои солнечной короны к слоям земной магнитосферы. Наиболее выраженное сходство и по плазменным характеристикам и по геометрии магнитного поля можно наблюдать для слоев, формирующихся в корональных стримерах [38, 106, 107, 122].

Одним из наиболее перспективных направлений сопоставления токовых слоев хвостовой области земной магнитосферы и активных областей солнечной короны является, по всей видимости, сопоставление проявлений различных квазипериодических процессов, приводящих к динамике плазменных характеристик в токовых слоях [99, 101, 105, 161]. Если для магнитосферного токового слоя такие процессы представляют скорее второстепенный интерес по сравнению с наиболее важным динамическим явлением — формированием интенсивного тонкого токового слоя непосредственно перед магнитным пересоединением [111, 123], то для токовых слоев солнечной короны удаленное наблюдение квазипериодических процессов позволяет восстановить напрямую неиз-

меряемые характеристики плазмы и магнитного поля [1, 35, 89]. Так как мелкоамплитудные и низкоамплитудные периодические колебания силовых линий магнитного поля, плотности плазмы и плотности тока сохраняют свойства собственных мод крупномасштабных плазменных систем, то периоды этих колебаний и скорости их распространения зависят от фоновых плотностей и полей, что и позволяет дать оценку на амплитуды фоновых характеристик (наиболее разработана данная методика для колебаний систем корональных петель, см. [100, 102–104]). Однако геометрия магнитного поля, существенные градиенты плотности и давления плазмы в токовых слоях сильно осложняют теоретическую интерпретацию наблюдаемых осцилляционных мод, и, как следствие, дополнительная информация, которую можно получить в рамках изучения непосредственно измеряемых спутниками колебаний магнитосферного токового слоя, может оказаться очень полезной.

Для данной обзорной работы из многочисленных динамических явлений в магнитосферном токовом слое нами выбраны четыре квазипериодических процесса: (а) “вертикальные” крупномасштабные осцилляции токовых слоев (т.е. flapping waves [124, 129]), (б) изгибные деформации токовых слоев (т.н. tilted current sheet [125, 143]), (в) мелкоамплитудные сжимаемые осцилляции, представленные различными типами т.н. магнитных дыр [14, 135], (г) кинетические альфвеновские волны, наблюдаемые в окрестностях областей магнитного пересоединения и сильных плазменных потоков [26, 149]. Основным критерием, по которому был осуществлен выбор этих типов квазипериодических процессов в магнитосферном токовом слое, является критерий наличия существенного пространственно-периодического возмущения плотности тока и/или плотности плазмы, так как именно такие возмущения могут быть задетектированы в удаленных наблюдениях излучения от токовых слоев солнечной короны.

2. ОСЦИЛЛЯЦИИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В МАГНИТОСФЕРЕ И КОРОНЕ

В этом разделе разобраны основные характеристики четырех типов квазипериодических процессов, наблюдаемых в токовом слое земной магнитосферы, и для каждого из этих типов приведены возможные аналогии с участием токовых слоев в солнечной короне.

На рис. 1 схематично показана конфигурация силовых линий, плотности плазмы и тока в магнитосферном токовом слое в спокойном состоянии и при развитии каждого из этих процессов. В рамках описания магнитосферного токового слоя используется геоцентрическая солнечно-

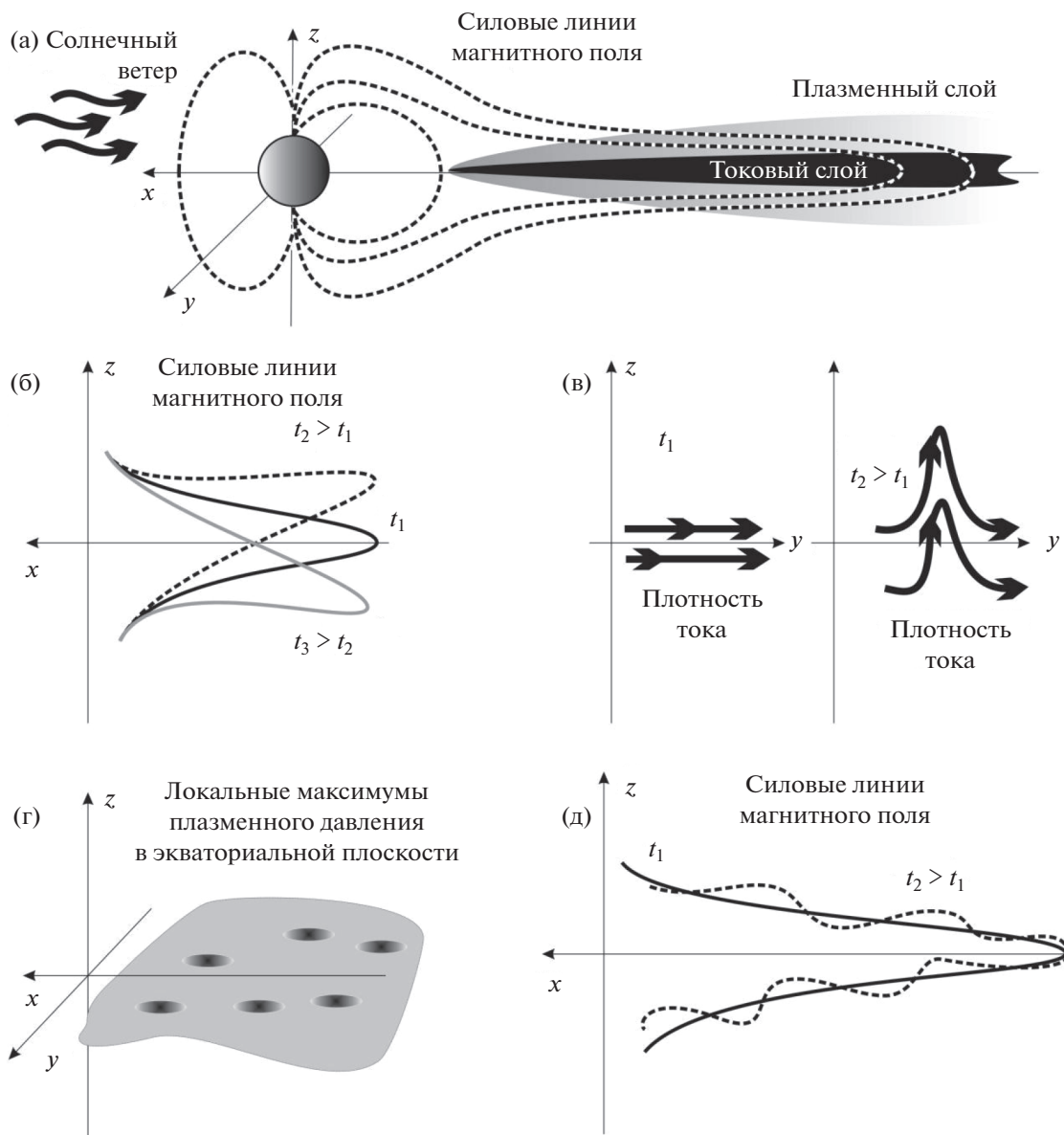


Рис. 1. Схематичное изображение токового слоя земной магнитосферы (а) и деформаций слоя при развитии: вертикальных крупномасштабных осцилляций (б), изгибных деформаций (в), мелкомасштабных сжимаемых возмущений (г), кинетических альфвеновских волн (д).

магнитосферная (geocentric solar magnetospheric, GSM) система координат с осью x , направленной от Земли на Солнце, осью z , направленной вдоль проекции направления магнитного диполя Земли на плоскость, перпендикулярную оси x , и ось y дополняет правую тройку векторов. Конфигурация токового слоя хвостовой области магнитосферы в такой системе включает основную компоненту магнитного поля, B_x , меняющую знак на магнитном экваторе, в окрестности $z = 0$ (положение магнитного экватора и $z = 0$ плоскости может не совпадать из-за наклона магнитного диполя), и поддерживаемую током j_y , локализованном в

окрестности экватора на масштабах токового слоя ($|z| < L$, где L – толщина токового слоя), и компоненту $B_z > 0$ с градиентом $\partial B_z / \partial x > 0$.

Имея малую толщину порядка ионного гирорадиуса, что составляет ~ 0.1 – 100 м в солнечной короне, токовые слои сложно наблюдать на Солнце современными телескопами с характерным пространственным разрешением ~ 100 – 1000 км. Тем не менее, токовые слои окружены значительно более широкими слоями относительно более плотной и горячей плазмы, излучение от которых возможно детектировать различными способами и в различных спектральных диапазонах [30, 31,

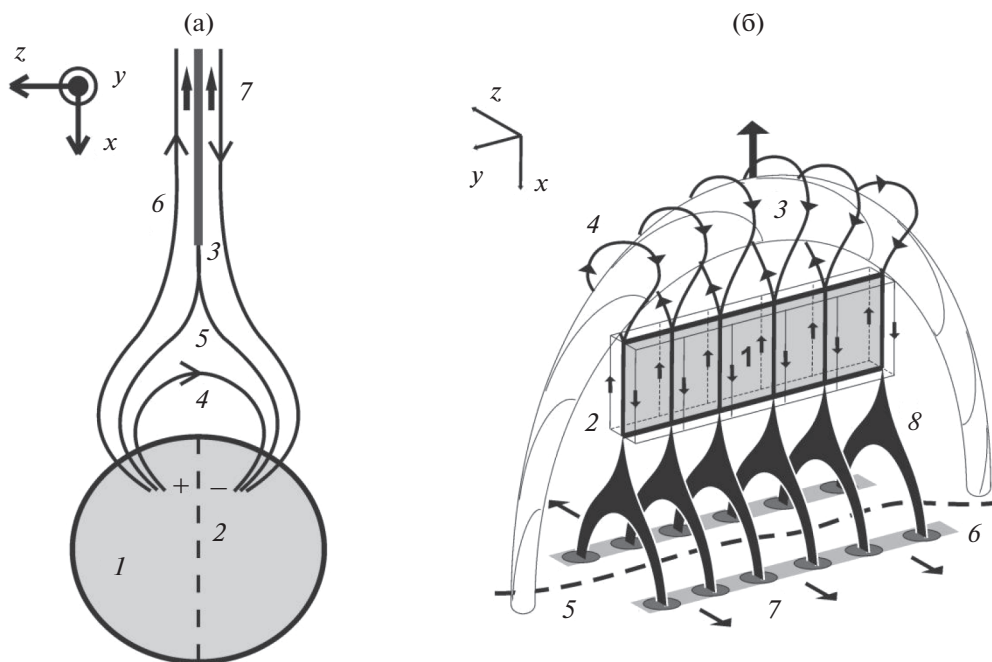


Рис. 2. Схематичная иллюстрация объектов на Солнце, содержащих токовые слои – коронального стримера в минимуме солнечной активности (а) и эруптивной солнечной вспышки (б). Направления осей координат выбраны по аналогии с системой GSM. Рисунок на (б) адаптирован из [116].

117, 119, 120, 147]. Среди таких объектов – квази-вертикальные шлемовидные лучи корональных стримеров (рис. 2а) [114, 148] и плазменные слои вокруг токовых слоев, формирующихся в результате вытягивания замкнутых силовых линий во время эруптивных солнечных вспышек (рис. 2б) [91, 116]. На рис. 2а с корональным стримером показаны: фотосфера Солнца (1), солнечный экватор (2), токовый слой (3), находящийся в центральной части лучей стримера, состоящих из открытых силовых линий (6), вдоль которых могут течь неоднородные потоки плазмы (7). Под слоем находится касп (5) над замкнутыми корональными петлями (4). Стримеры являются более крупномасштабными (несколько солнечных радиусов R_{\odot} в длину) квазистационарными (сутки и более) объектами, тогда как токовые слои, связанные с эруптивными вспышками, более компактные (обычно доли R_{\odot} в длину) короткоживущие (десятки минут–часы) динамичные объекты. Предполагается, что в первом случае токовый слой находится на границе ($B_x = 0$ на рис. 2а) между противоположно направленными открытыми силовыми линиями магнитного поля, проявляемыми при солнечных затмениях или на изображениях коронографов в виде квази-вертикальных лучей стримера на высотах более $1-2R_{\odot}$. В них наблюдаются неоднородные радиальные потоки плазмы, движущиеся со скоростями ~ 150 км/с на высоте $\sim 5R_{\odot}$ и достигающими ~ 300 км/с на $\sim 25R_{\odot}$ (Sheeley et al.,

1997). Во втором случае, квази-вертикальный токовый слой (1 на рис. 2б) возникает над линией инверсии магнитной полярности (5 на рис. 2б) под эруптивным магнитным жгутом (3 на рис. 2б), вытягивающим окружающие его силовые линии (4 на рис. 2б). В результате пересоединения в слое происходит нагрев плазмы и ускорение частиц, которые идут вниз по силовым линиям и тормозятся в плотной плазме в подножиях силовых линий (в переходном слое и хромосфере), в результате чего там наблюдаются источники тормозного жесткого рентгена (выше ~ 20 кэВ; 7 на рис. 2б). Нагреваемая высыпавшимися энергичными частицами и тепловыми потоками плотная плазма высвечивает в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах в виде вспышечных лент (6 на рис. 2б), а “испаряемая” наверх горячая плазма заполняет замкнутые вспышечные петли, которые светятся в диапазонах мягкого рентгена и экстремального ультрафиолета (8 на рис. 2б) (см. обзоры [17, 48]). Отметим, что рассматриваемые “крупномасштабные” токовые слои в солнечной короне являются принципиально трехмерными объектами, вытянутыми как в вертикальной плоскости (вдоль оси x на рис. 2), так и вдоль оси y . Последнее обусловлено тем, что эруптивные вспышки происходят не в плоских двухмерных петлях, а в вытянутых вдоль линии инверсии магнитных аркадах с широм, тогда как наблюдаемые на двумерных изображениях плоские стримеры в действительности представ-

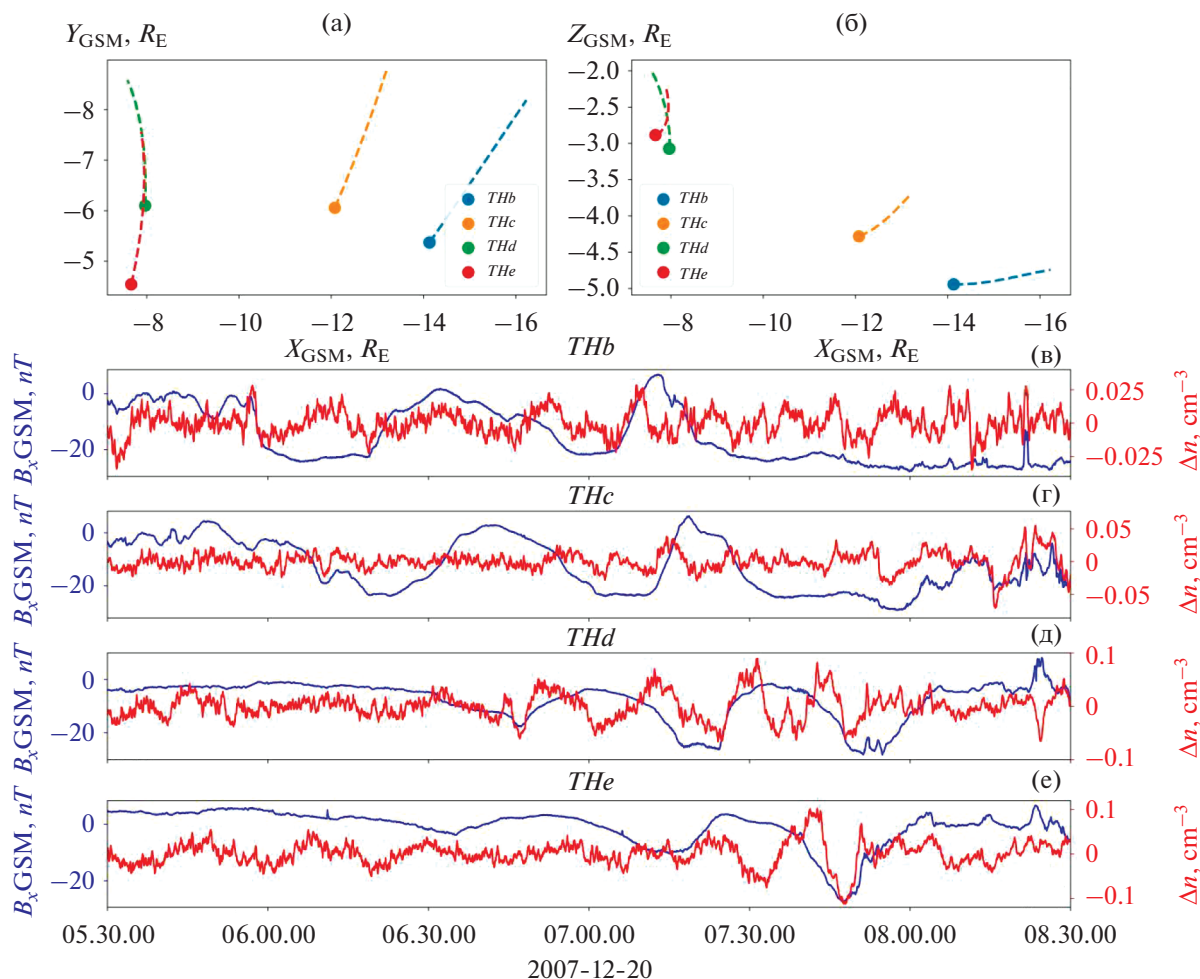


Рис. 3. Пример наблюдения вертикальных осцилляций магнитосферного токового слоя: (а)–(б) расположение спутников миссии *THEMIS* в экваториальной плоскости и плоскости $Y_{\text{GSM}} = 0$, (в)–(е) профили магнитного поля B_x и плотности плазмы с нескольких спутников *THEMIS*.

ляют собой проекцию протяженного пояса стримеров на картинную плоскость [44, 45].

2.1. Вертикальные осцилляции токового слоя

Одним из наиболее распространенных типов осцилляций токового слоя являются так называемые flapping осцилляции [125, 128, 159]. Рис. 3 показывает пример таких осцилляций. Речь идет о вертикальных, вдоль z , движениях токового слоя, как целого, без существенной деформации силовых линий магнитного поля [112]. Такие движения периодичны и наблюдаются спутниками как серия пересечений нейтральной плоскости токового слоя $B_x = 0$. Вертикальные осцилляции токового слоя крупномасштабны, и часто наблюдаются сильно разнесенными в пространстве спутниками [124, 154]. Скорость вертикальных колебаний порядка ~ 10 км/с, что существенно меньше альфвеновских (~ 100 – 1000 км/с) и тепловых (для протонов ~ 500 – 2000 км/с) скоро-

стей в токовом слое [129]. Таким образом, речь идет об ультра-низко-частотных колебаниях, при которых меняют вертикальное положение как область пространственной локализации плотности тока (токовый слой, расположенный в окрестности $B_x = 0$), так и область пространственной локализации плотности плазмы (плазменный слой) (см. рис. 3).

В качестве основных причин развития таких вертикальных колебаний принято рассматривать быстрые потоки плазмы от области магнитного пересоединения (см. обсуждения в [129]) и собственные неустойчивости токового слоя [40, 52, 55, 157]. Наиболее естественной неустойчивостью, которая могла бы вызвать такие осцилляции, является изгибная неустойчивость токового слоя, развивающаяся за счет сильных потоков ионов, переносящих ток [33, 60]. Однако соответствующие ей частоты существенно превышают частоты вертикальных осцилляций слоя. Более того, в токовых слоях земной магнитосферы за

счет формирования сильных электрических полей, поляризующих токовый слой [20, 63, 156], потоки ионов практически отсутствуют и весь ток переносится электронами [7, 93, 94]. Для такой конфигурации токового слоя была предложена неустойчивость “двойного градиента” [41], которая раскачивается в пространственно локализованных областях с $\partial B_z / \partial x < 0$. Теоретический анализ данной неустойчивости [42, 76, 77] и сопоставление со спутниковыми данными [79] показывают перспективность данной неустойчивости в описании формирования вертикальных осцилляций токового слоя.

С точки зрения наблюдений токовых слоев в солнечной короне, такие вертикальные осцилляции плотности тока и плотности плазмы должны проявляться в виде квазипериодических пространственных смещений областей излучения. Визуально похожими на вертикальные осцилляции магнитосферного токового слоя являются поперечные волновые движения луча стримера, обычно распространяющиеся от Солнца (в направлении $-x$ на рис. 2а) по данным наблюдений коронографов в белом свете (томсоновское рассеяние оптических фотонов на свободных электронах плазмы). В основном осцилляции стримеров возбуждаются посредством импульсного взаимодействия с корональным выбросом массы — КВМ [28, 35, 84]. Однако известен случай наблюдения возбуждения осцилляций стримера без КВМ, который был интерпретирован как следствие развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [46]. Характерные периоды осцилляций стримеров составляют десятки–сотни минут, длины волн несколько солнечных радиусов R_\odot , амплитуда смещения доли солнечного радиуса, фазовые скорости $\sim 300\text{--}750$ км/с, что больше скорости звука и соответствует характерным для короны альфвеновским скоростям. Наблюдается линейная корреляция между длиной волны и периодом осцилляций. При этом не выявлено связи между скоростью КВМ и фазовой скоростью волны. Это указывает на то, что фазовая скорость волны определяется скорее свойствами самого стримера, а не КВМ. Исходя из обозначенных свойств, волновые движения стримеров интерпретируются обычно как быстрые магнитозвуковые изгибные волны. Аналогом движения плазмы со скоростями быстрых магнитозвуковых волн в магнитосфере являются быстрые плазменные потоки [3, 16], возбуждающие вертикальные колебания токового слоя [129]. Таким образом, существует некоторая аналогия между такими вертикальными колебаниями магнитосферного слоя и осцилляциями стримеров.

Схожие волновые движения с периодом около 0.5 ч также были детектированы в вытягивающемся под КВМ квазивертикальном слое (тол-

щиной до $0.1R_\odot$), наблюдаемом в белом свете и интерпретированном [92] как квазивертикальный пересоединяющийся токовый слой. Известный (и, вероятно, пока единственный) случай пространственно-разрешенных наблюдений поперечных осцилляций “горячего” токового слоя во время эруптивной вспышки был представлен в работе [89]. Анализ дифференциальной меры эмиссии, выполненный на основе наблюдений в каналах экстремального ультрафиолетового излучения *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) на борту *Solar Dynamics Observatory* (SDO), показал температуру плазмы вокруг токового слоя 5–10 МК (≤ 1 кэВ), уменьшающуюся с высотой. Осцилляции имели период около 11 мин, амплитуду 1.5 Мм при видимой в ультрафиолете длине слоя ~ 50 Мм и толщине 2–4 Мм, фазовую скорость 200 ± 30 км/с (порядка тепловой скорости и сопоставимой с альфвеновской скоростью в короне). Как и в случае осцилляций стримеров, эти осцилляции вспышечного токового слоя были интерпретированы как быстрые изгибные волны.

Таким образом, на данный момент, интерпретация наблюдаемых поперечных осцилляций токовых слоев в короне существенным образом привязана к оценкам фазовой скорости волны и ее сопоставлению с локальной альфвеновской скоростью, в то время как интерпретация вертикальных осцилляций токового слоя в магнитосфере Земли указывает на малые фазовые скорости самих колебаний, но не исключает больших скоростей плазменных потоков, возбуждающих такие колебания. Однако точно измерить альфвеновскую скорость в солнечной короне пока нельзя, из-за невозможности надежно измерить магнитное поле в короне, к тому же оценки концентрации плазмы из анализа ультрафиолетового и оптического излучения тоже могут иметь большие погрешности. Поэтому нельзя исключать, что по крайней мере часть наблюдаемых поперечных осцилляций корональных токовых слоев могут соответствовать малым, по отношению к альфвеновской, фазовым скоростям и иметь другое объяснение, в частности основанное на неустойчивости “двойного градиента”.

2.2. Изгибные деформации токового слоя

Если в центральной (около полуночи, $y = 0$) области магнитосферного токового слоя основным типом крупномасштабных осцилляций являются вертикальные осцилляции, то на флангах магнитосферы спутники наблюдают изгибные деформации слоя. Рис. 4 приводит пример таких деформаций. Речь идет об изгибах области максимальной плотности тока в плоскости (z, y) , с последующим распространением таких изгибов на фланги магнитосферы. Изгиб токового слоя

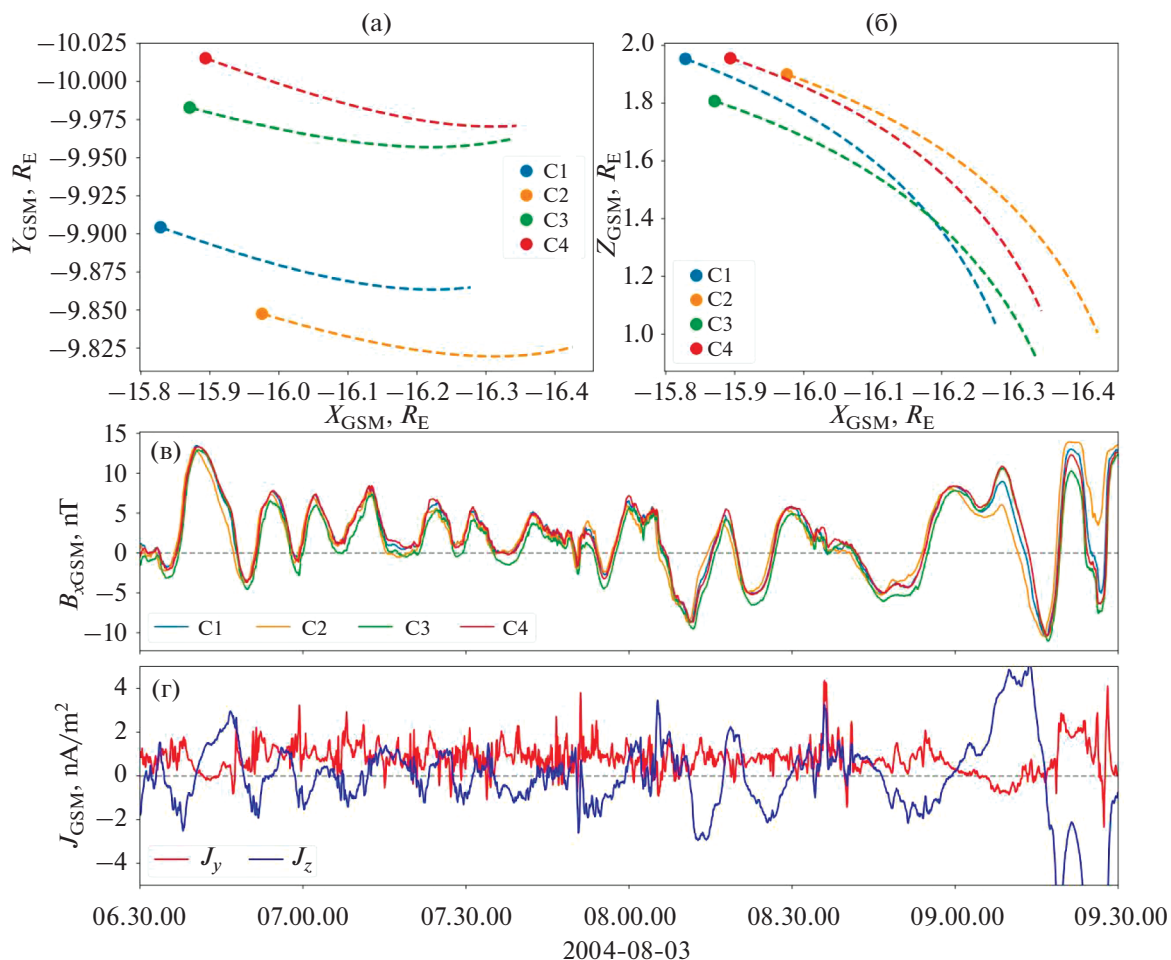


Рис. 4. Пример наблюдения изгибных деформаций магнитосферного токового слоя: (а)–(б) расположение спутников миссии *Cluster* в экваториальной плоскости и плоскости $Y_{GSM} = 0$, (в) профили магнитного поля B_x четырех спутников, (г) профиль плотности тока, посчитанного по методу градиентов магнитного поля.

характеризуется двумя существенными изменениями в его конфигурации: формированием сильно “вертикального” тока вдоль z [125, 143] и уменьшением толщины токового слоя (увеличением плотности тока [110]). Скорость распространения изгибных деформаций на фланги варьируется от 10 до 100 км/с, и, таким образом, приближается к типичным скоростям дрейфа ионов в токовых слоях [157]. Тем не менее, в отличие от ионного дрейфа, направленного с восхода на закат (от $y < 0$ к $y > 0$), изгибные деформации распространяются на фланги, то есть в положительном y направлении на $y > 0$ и в отрицательном y направлении на $y < 0$ [125, 129]. Как следствие, модели дрейфовой неустойчивости токового слоя не могут объяснить формирования таких изгибных деформаций (см. обсуждение в [69, 129]), и основной рабочей моделью является модель “двойного градиента”, предсказывающая неустойчивость токового слоя в отсутствие дрейфа ионов [41], когда направление распространения деформации

слоя может задать источник колебаний, например быстрый плазменный поток на $y \sim 0$ [42].

Важной для динамики токовых слоев солнечной короны особенностью изгибных деформаций токового слоя является существенный рост интенсивности тока на изгибах слоя, где ток преимущественно течет вдоль силовых линий магнитного поля (см. рис. 4 и [143]). Такие пространственно локализованные периодические всплески плотности тока могут приводить к периодическим пересоединениям силовых линий магнитного поля (см. описание неустойчивости “двойного градиента” для токовых слоев в солнечной короне в [5]).

По всей видимости, напрямую изгибные деформации токовых слоев в короне пока не наблюдаются современными телескопами. Тем не менее, имеются косвенные свидетельства, которые могут интерпретироваться в рамках этого сценария. Из наблюдений солнечных вспышек известно, что область магнитного пересоединения может перемещаться вдоль линии инверсии

магнитной полярности (вдоль оси y в GSM, см. рис. 26). Это проявляется в виде: 1) систематического последовательного возгорания “горячих” петель вспышечной аркады, наблюдаемых в диапазонах мягкого рентгеновского и экстремально-го ультрафиолетового излучения [121, 146], 2) систематического перемещения источников жесткого рентгеновского излучения от подножий к подножиям петель вспышечной аркады [22, 58, 83] и систематического перемещения микроволновых источников вдоль вершины аркады [72, 82], 3) сопровождения вспышки последовательными всплесками (или квазипериодическими пульсациям, КПП) вспышечного излучения в различных диапазонах спектра (чаще, нетеплового жесткого рентгеновского и радио излучения). Скорости перемещения источников $\sim 10\text{--}200$ км/с, что меньше характерных звуковой и альфвеновской скоростей во вспышечных аркадах. Расстояние между соседними источниками составляет $\sim 1\text{--}10$ Мм, которое можно рассматривать как длину волны деформации слоя, период пульсаций $\sim 1\text{--}100$ с. В работе [5] показано, что при вполне реалистичных характеристиках токового слоя в короне мода перетяжек рассматриваемой деформации удовлетворяет указанным параметрам. Однако надо отметить, что этот механизм является не единственным для объяснения перечисленных наблюдательных свойств солнечных вспышек (см. обсуждение в [161]) и нужно искать дополнительные способы его проверки. Необходимо отметить, что само магнитное пересоединение, ускорение частиц и испускаемого ими электромагнитного излучения не моделировалось в работе [5] и это представляет значительный интерес для дальнейшего поиска наблюдательных проявлений этого механизма. Ситуация осложняется тем, что процесс пересоединения развивается как вдоль тока (по y в GSM), так и поперек тока, в вертикальном направлении (по x в GSM). Во время вспышек последнее проявляется в виде расхождения вспышечных лент и парных источников жесткого рентгена в подножиях петель вспышечной аркады в разные стороны от линии инверсии магнитной полярности.

2.3. Мелкомасштабные низкочастотные осцилляции

Вертикальные и изгибные деформации токового слоя достаточно крупномасштабны, чтобы изменять конфигурацию всего слоя, в то время как сам слой может служить фоном для мелкомасштабных деформаций. Характерными для магнитосферного токового слоя и представляющими интерес в контексте сопоставления с данными наблюдений токовых слоев в солнечной короне являются деформации типа “магнитных дыр”. Магнитные дыры — это локальные мини-

мумы интенсивности экваториального магнитного поля B_z , заполненные горячей плазмой [14, 53]. Размеры магнитных дыр варьируются от суб-ионных масштабов в несколько сотен км [54, 135, 160] до масштабов, сопоставимых с толщиной токового слоя [138]. Основными механизмами, ответственными за генерацию магнитных дыр, принято считать зеркальную неустойчивость [25, 80] или ее аналог в плазме с много-температурной электронной популяцией [62, 133]. При этом магнитные дыры представляют собой нелинейные самосогласованные магнито-плазменные равновесия [81, 88, 132], которые достаточно долго могут дрейфовать в плазменном потоке токового слоя.

На рис. 5 показан пример наблюдений магнитных дыр в хвостовой области земной магнитосферы. Для данного события сопоставление токов, рассчитанных по прямым измерениям плазмы и по оценке градиента магнитного поля, показало, что скорость распространения магнитных дыр не превышает нескольких десятков км/с [135, 160], что существенно меньше локальных альфвеновских и тепловых скоростей. Таким образом, речь идет о пространственно локализованных пиках плазменного давления, медленно распространяющихся в плоскости токового слоя. Такие пики давления являются источниками параллельных токов и видны в проекции на ионосферу Земли как мелкомасштабные флуктуации потоков высыпающихся электронов [134]. Как следствие, формирование таких магнитных дыр в токовых слоях солнечной короны (речь идет о достаточно больших расстояниях, на которых плазменная β будет существенной для формирования подобных диамагнитных структур) может проявлять себя в локализованных и мелкомасштабных пиках светимости, соответствующих пикам плазменного давления (потока энергии заряженных частиц). Следует отметить, что высоко в короне на расстояниях $\sim 36R_\odot$ и более от Солнца действительно фиксируются магнитные дыры, переносимые потоком солнечного ветра от солнечной короны [153] на огромные расстояния [126].

В силу малости пространственного масштаба этих неоднородностей их сложно напрямую наблюдать (т.е. пространственно разрешать) современными телескопами в токовых слоях в короне. Тем не менее, мелкомасштабные неоднородности концентрации плазмы все же обнаруживаются в короне, в частности, по наблюдениям радиовсплесков IIIb типа или стрия всплесков [34, 75]. Обычные радиовсплески III типа являются быстродрейфующими всплесками (десятки—сотни МГц/с и выше), связанными с прохождением популяции (пучка) ускоренных ($\sim(0.1\text{--}0.6)c$) электронов через плазму короны. Они возбуждают ленгмюровские колебания плазмы на плазменной частоте и гармонике, которые трансформируются в

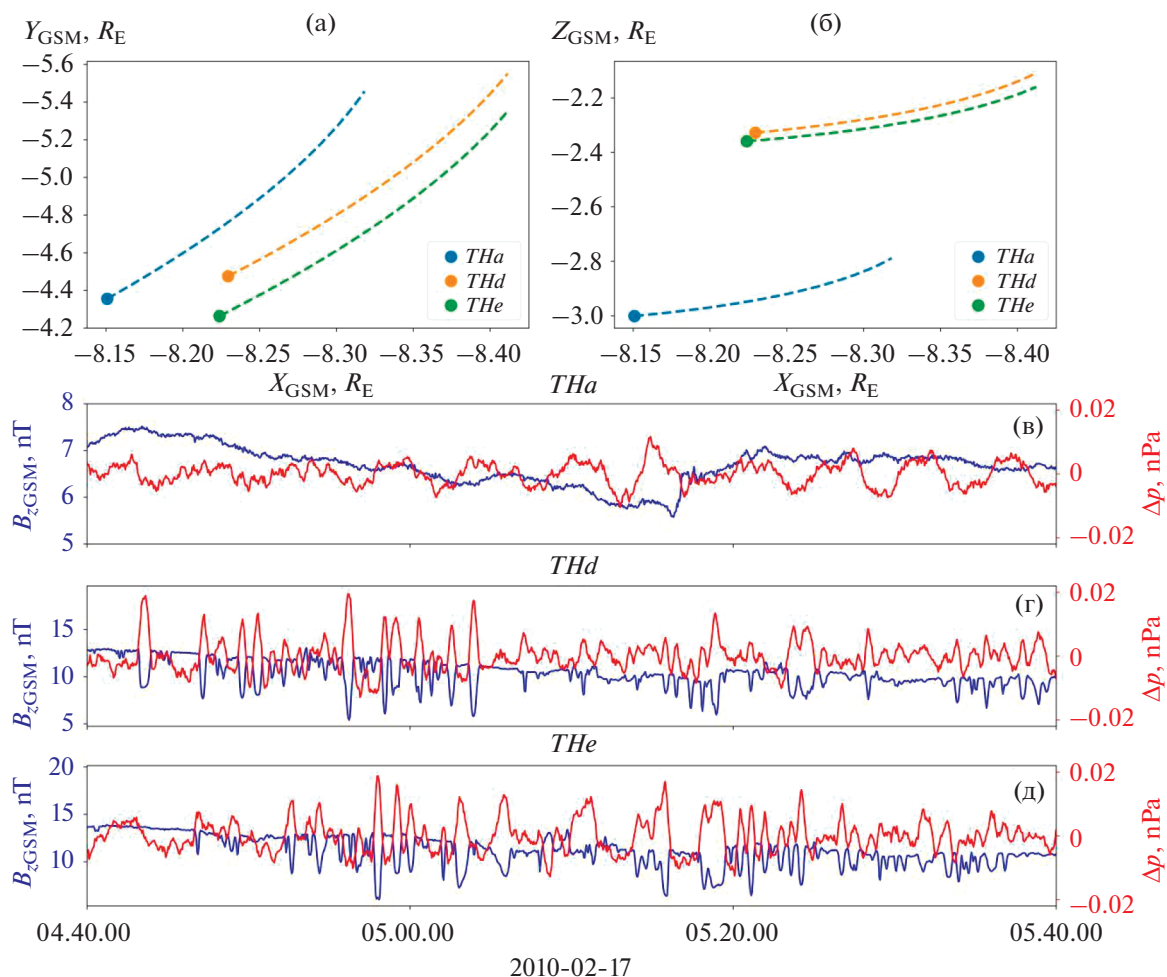


Рис. 5. Пример мелкомасштабных сжимаемых флуктуаций в магнитосферном токовом слое: (а)–(б) расположение спутников миссии *THEMIS* в экваториальной плоскости и плоскости $Y_{GSM} = 0$, (в)–(д) профили магнитного поля B_z и флуктуаций плазменного давления с трех спутников *THEMIS*.

электромагнитные волны (в короне частоты сотни-десятки МГц). Так как концентрация плазмы падает с высотой в короне, наблюдается частотный дрейф всплеска от высоких частот к низким. Во всплесках IIIb типа наблюдается модуляция интенсивности излучения в виде узкочастотных (~ 30 – 300 кГц) квазипериодических полосок (стрий) со значительно меньшей скоростью дрейфа (до ~ 0.3 МГц/с). Эти полоски могут быть связаны с неоднородностями концентрации плазмы порядка $\Delta n/n \sim \times 10^{-3}$ [74, 130]. Характерный размер и скорость распространения этих плазменных неоднородностей 200–800 км и 400–800 км/с, соответственно [73, 130]. Их скорость превышает тепловую скорость плазмы и может быть близка к альфвеновской скорости в короне. По этой причине считается, что такие квазипериодические флуктуации плазмы могут быть вызваны модуляцией быстрыми магнитозвуковыми волнами [73]. Так как скорости обсуждаемых мелкомасштаб-

ных низкочастотных осцилляций токового слоя ниже тепловой и альфвеновской скоростей, то маловероятно, что всплески IIIb типа связаны напрямую с ними. Однако всплески IIIb типа наглядно демонстрируют, что имеющимися радиоспектрометрами и многочастотными радиогелиографами (например, *LOFAR*) вполне можно было бы детектировать мелкомасштабные (порядка толщины плазменного слоя вокруг токового слоя) низкоамплитудные флуктуации концентрации плазмы в корональном токовом слое при распространении вдоль него (вдоль оси x в GSM) пучка энергичных ($v \sim (0.1$ – $0.6)c$) электронов, ускоренных в области пересоединения в слое. В дальнейшем представляет интерес исследовать спектры флуктуаций всплесков III и IIIb типов, связанных с прохождением пучков энергичных электронов вдоль токовых слоев в корональных стримерах для сопоставления со спектрами мелкомасштабных осцилляций, детектируемых в магнитосферном токовом слое.

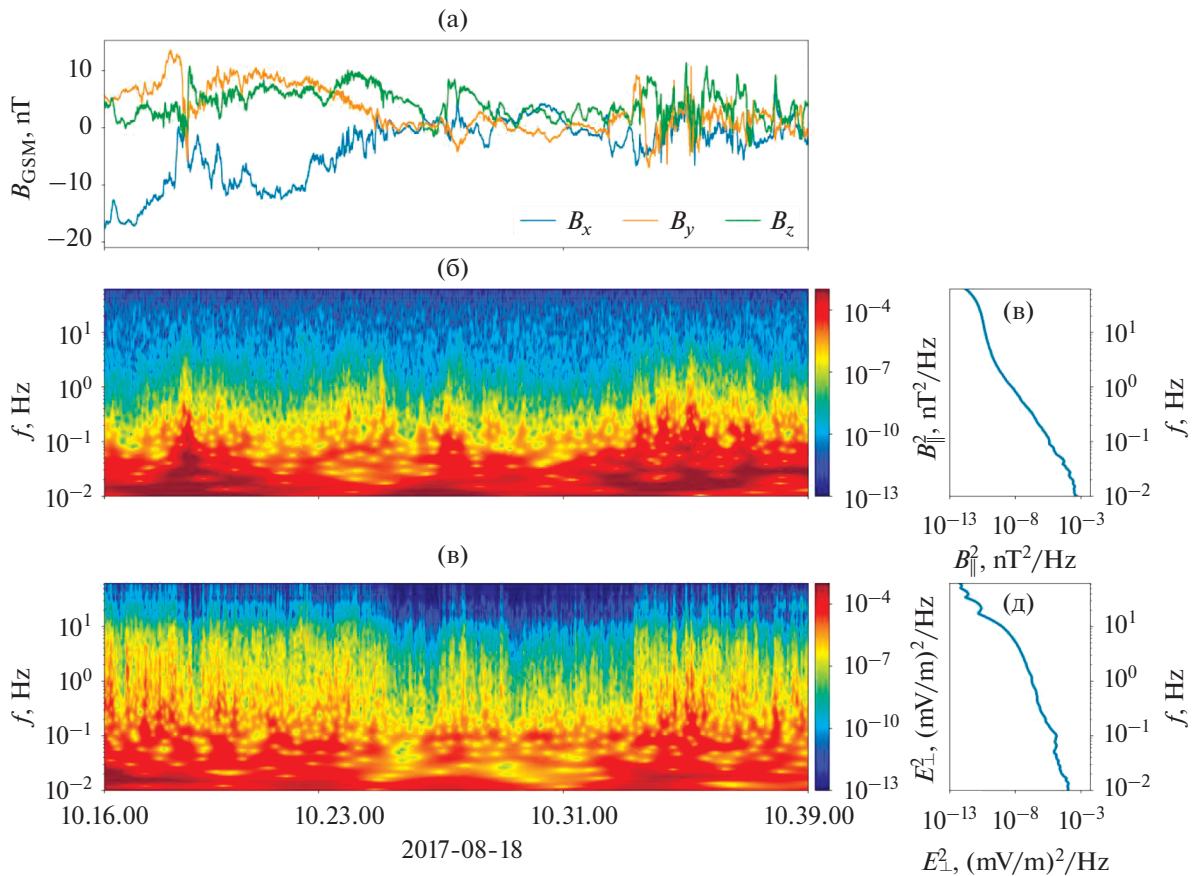


Рис. 6. Пример кинетических альфвеновских волн в магнитосферном токовом слое: (а) три компоненты магнитного поля со спутника *MMS1*, (б) вейвлет спектр вариации продольной компоненты магнитного поля, (в) усредненный за период наблюдения вейвлет спектр вариации продольной компоненты магнитного поля, (г) вейвлет спектр вариации поперечной компоненты электрического поля, (д) усредненный за период наблюдения вейвлет спектр вариации поперечной компоненты электрического поля.

2.4. Кинетические альфвеновские волны

Альфвеновские волны – наиболее распространенный тип низкочастотных колебаний в космической плазме, однако эти волны несжимаемые и не переносят флуктуаций плотности, что делает их существенно менее интересными при изучении осцилляций в токовых слоях солнечной короны. Однако, спутниковые наблюдения в магнитосферном токовом слое показали, что при наличии популяции горячих ионов дисперсионное соотношение альфвеновских волн меняется, и сами волны трансформируются в кинетические альфвеновские волны, КАВ [139]. КАВы распространяются под углом к внешнему магнитному полю и за счет эффекта конечного гирорадиуса ионов переносят параллельное электрическое поле и флуктуации плотности [78, 96, 98, 142]. В спутниковых наблюдениях КАВ определяются по широкому спектру интенсивности волн, доминированному эффектом Доплера для коротковолновых возмущений (см. рис. 6 и [26, 27, 39]). При этом КАВ являются естественной волновой

модой для токового слоя, и их раскачка осуществляется как кинетическими неустойчивостями потоков ионов [29, 36, 90], так и трансформацией низкочастотных флуктуаций в КАВ [85, 87]. Важной особенностью КАВ является перенос сильных параллельных токов [86, 95] и ускорение электронов параллельными полями [9, 32, 97]. Соответствующие квазипериодические “высыпания” ускоренных электронов и потоки энергии из хвостовой области магнитосферы в ионосферу наблюдаются в виде излучения на наземных камерах [70, 71].

Можно провести следующую аналогию с солнечными вспышками. Предположим, пересоединяющийся токовый слой находится в солнечной короне на высоте $h \sim 10^4 - 10^5$ км над фотосферой и в нем ускоряются электроны до начальной энергии $\sim 10 - 100$ кэВ (со скоростью $v \sim 10^4 - 10^5$ км/с). Покинувшие область ускорения электроны распространяются вдоль пересоединившихся силовых линий магнитного поля вниз к подножиям сило-

вых линий (см. рис. 2б). Согласно [47], часть выделенной в области пересоединения энергии трансформируется в КАВ, бегущие вниз с альфвеновской скоростью $v_A \sim 10^3 - 10^4$ км/с. Характерный период КАВ $P_{КАВ} \sim h/v_A \sim 1-100$ с. Часть популяции энергичных электронов может захватываться КАВ и приобретать дополнительную энергию [10]. Следовательно, можно ожидать, что в хромосферу будут высыпаться промодулированные с периодом $P_{КАВ}$ потоки ускоренных электронов. В результате кулоновского взаимодействия с плотной плазмой в хромосфере эти электроны будут испускать тормозное жесткое рентгеновское излучение > 10 кэВ [23, 141], поток которого будет промодулирован с характерным периодом $P_{КАВ}$. Также можно ожидать квазипериодические всплески ультрафиолетового и оптического излучения за счет модуляции нагрева хромосферной плазмы. Действительно, квазипериодические пульсации с периодами в диапазоне $\sim 1-100$ с детектируются в значительной доле солнечных вспышек [101, 161]. Дополнительно здесь отметим, не углубляясь в детали, что частотный спектр интенсивности рентгеновского излучения вспышек зачастую имеет спадающий степенной вид [59], на фоне которого могут выделяться отдельные статистически значимые пики, соответствующие квазипериодическим пульсациям [61, 67]. Вопрос о физических механизмах, ответственных за функциональный вид частотных спектров излучения вспышек, открыт. Не исключено, что это просто совпадение, но частотные спектры флуктуаций магнитного поля и электрического тока в магнитосферном токовом слое, связанных с КАВ, тоже имеют спадающий степенной вид (см. рис. 6).

Важный открытый вопрос — какова амплитуда модуляции потока ускоренных электронов, вызываемая доускорением КАВ, т.е. можно ли детектировать соответствующие квазипериодические пульсации на фоне флуктуаций и пульсаций потоков излучения, связанных с другими сопутствующими процессами и механизмами, происходящими во вспышечной области. В частности, с точки зрения наблюдений ситуация осложняется тем, что источники жесткого рентгеновского излучения не стационарны и обычно перемещаются во время вспышки на масштабах времени нескольких секунд, что связано, по всей видимости, с перемещением области пересоединения и вовлечением новых силовых линий в процесс пересоединения (см. раздел 2.2). При этом на фоне появления новых ярких источников современных рентгеновские телескопы практически не способны фиксировать источники, загоревшиеся в предыдущие моменты времени и не могут детектировать потоки их излучения на протяжении не-

скольких периодов $P_{КАВ}$. Как вариант, можно было бы попытаться детектировать квазипериодические пульсации, связанные с КАВ-модулированными высыпавшимися электронами, с помощью телескопов оптического и ультрафиолетового излучения, обладающих более высоким динамическим диапазоном. Однако здесь ситуация осложняется более комплексными и инерционными процессами высвечивания оптически толстой тепловой плазмы (время высвечивания $\tau > P$), которые могут замыкать малоамплитудные осцилляции, связанные с КАВ. Тем не менее, если в дальнейшем телескопы позволят детектировать излучения вспышек, действительно модулированные КАВ, то это может дать полезную возможность оценивать высоту токового слоя в короне, а также делать диагностику высотного профиля альфвеновской скорости на силовых линиях, по которым распространяются ускоренные частицы.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Мы рассмотрели на качественном уровне наиболее распространенные и перспективные (в плане сравнения магнитосферного токового слоя и слоев в солнечной короне) квазипериодические движения токового слоя: два типа крупномасштабных осцилляций и два локализованных волновых процесса. Вертикальные и изгибные осцилляции магнитосферного токового слоя по своим характеристикам и проявлениям наиболее близки к различным типам деформаций токовых слоев корональных стримеров, конфигурация которых существенным образом напоминает конфигурацию магнитосферного слоя [18, 118, 140]. Однако, существенным и важным отличием токовых слоев корональных стримеров является наличие быстрых потоков плазмы с динамическим давлением, заметно превышающим тепловое давление плазмы. Фактически, токовый слой коронального стримера погружен в плазменный поток, и градиенты динамического давления плазмы определяют структуру слоя и конфигурацию силовых линий магнитного поля [38, 106, 107, 122]. Как следствие, развитие различных крупномасштабных деформаций токового слоя и их динамика наблюдаются в связи с быстрым потоком вдоль токового слоя. При этом в магнитосферном токовом слое быстрые плазменные потоки наблюдаются лишь как результат магнитного пересоединения [56], и даже для таких потоков вклад динамического давления в общую структуру токового слоя не столь существенен [6, 64, 65]. Тем не менее, для обеих систем (магнитосферный токовый слой и токовые слои корональных стримеров) крупномасштабные осцилляции являются характерным типом движения слоя, и, как следствие, накопленный материал по свойствам таких осцилляций в магнитосфере может оказаться край-

не полезным для моделирования и интерпретации наблюдений осцилляций токового слоя корональных стримеров.

Наблюдаемые в магнитосферном токовом слое мелкомасштабные (порядка кинетических масштабов ионов) флуктуации плазменного давления и параллельных электрических полей (магнитные дыры и кинетические альфвеновские волны) из-за своих небольших масштабов не имеют прямых аналогов в наблюдениях солнечной короны. Однако теоретические работы предсказывают формирование кинетических альфвеновских волн в токовых слоях солнечной короны [144, 145], а спутниковые наблюдения солнечного ветра указывают на формирование магнитных дыр в плазме на открытых силовых линиях [153]. Важность кинетических альфвеновских волн для токового слоя связана с их ролью в формировании эффективной проводимости в бесстолкновительной плазме [66, 155] и с возможностью ускорять электроны, высыпаящиеся в область повышенной плотности (ионосфера или хромосфера) из областей первичного энерговыделения (области магнитного пересоединения). Важность магнитных дыр обусловлена наличием пиков плазменного давления в таких структурах [135, 160] и формированием за счет градиента давления систем мелкомасштабных параллельных токов [134], играющих существенную роль в перекачке энергии из областей большого плазменного β (токовый слой в окрестности магнитного пересоединения) в области малого β (ионосфера или хромосфера).

В заключение стоит отметить, что наиболее существенным препятствием при проведении аналогий между динамическими процессами в токовых слоях хвостовой области магнитосферы и солнечной короны является заметная разница в конфигурациях магнитных полей, обусловленная разницей в плазменных β : если для магнитосферного токового слоя с большим β свойственны сильные поперечные токи, обеспеченные диамагнитным дрейфом горячих ионов, то для токовых слоев солнечной короны с малыми β более типичными являются конфигурации бессиловых токовых слоев с сильными продольными токами. Эта разница менее заметна при сопоставлении магнитосферного токового слоя и слоев корональных стримеров, но становится принципиальной для токовых слоев вспышечных областей солнечной короны. Как следствие, еще одним перспективным направлением дальнейших исследований аналогии данных плазменных систем является изучение бессиловых слоев в магнитосфере [50, 158]. Такие слои формируются в областях малых градиентов плазменного давления [8, 150], и существенно меньше изучены по сравнению с типичными конфигурациями магнитосферного токового слоя. Однако именно такие относительно

редкие наблюдения бессиловых токовых слоев в хвостовой области магнитосферы представляют основной интерес в контексте сопоставления их динамических свойств со свойствами токовых слоев в солнечной короне.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-20134).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anfinogentov S.A., Antolin P., Inglis A.R. et al.* Novel Data Analysis Techniques in Coronal Seismology // *Space Sci. Rev.* 2022. V. 218. P. 9. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00869-w>
2. *Angelopoulos V.* The THEMIS Mission // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 141. P. 5–34. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9336-1>
3. *Angelopoulos V., Baumjohann W., Kennel C.F. et al.* Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 4027–4039. <https://doi.org/10.1029/91JA02701>
4. *Arons J.* Pulsar Wind Nebulae as Cosmic Pevatrons: A Current Sheet's Tale // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 173. P. 341–367. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9885-1>
5. *Artemyev A.V., Zimovets I.* Stability of Current Sheets in the Solar Corona // *Sol. Phys.* 2012. V. 277. P. 283–298. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9908-1>
6. *Artemyev A.V., Angelopoulos V., Runov A. et al.* Hot Ion Flows in the Distant Magnetotail: ARTEMIS Observations From Lunar Orbit to \sim –200 R_{\oplus} (E) // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 9898–9909. <https://doi.org/10.1002/2017JA024433>
7. *Artemyev A.V., Baumjohann W., Petrukovich A.A. et al.* Proton/electron temperature ratio in the magnetotail // *Annales Geophysicae.* 2011. V. 29. P. 2253–2257. <https://doi.org/10.5194/angeo-29-2253-2011>
8. *Artemyev A.V., Petrukovich A.A., Frank A.G. et al.* Intense current sheets in the magnetotail: Peculiarities of electron physics. // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2789–2799. <https://doi.org/10.1002/jgra.50297>
9. *Artemyev A.V., Rankin R., Blanco M.* Electron trapping and acceleration by kinetic Alfvén waves in the inner magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 10. <https://doi.org/10.1002/2015JA021781>
10. *Artemyev A.V., Zimovets I.V., Rankin R.* Electron trapping and acceleration by kinetic Alfvén waves in solar flares // *Astron. Astrophys.* 2016. V. 589. P. A101. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527617>
11. *Artemyev A., Zimovets I., Sharykin I. et al.* Comparative Study of Electric Currents and Energetic Particle Fluxes in a Solar Flare and Earth Magnetospheric Substorm // *Astrophys. J.* 2021. V. 923. P. 151. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2dfc>
12. *Aschwanden M.J.* Particle acceleration and kinematics in solar flares – A Synthesis of Recent Observations and Theoretical Concepts // *Space Sci. Rev.* 2002. V. 101. P. 1–227. <https://doi.org/10.1023/A:1019712124366>
13. *Balikhin M.A., Gedalin M., Reeves G.D. et al.* Time scaling of the electron flux increase at GEO: The local energy diffusion model vs observations // *J. Geophys.*

- Res. 2012. V. 117. P. 10208.
<https://doi.org/10.1029/2012JA018114>
14. *Balikhin M.A., Sibeck D.G., Runov A. et al.* Magnetic holes in the vicinity of dipolarization fronts: Mirror or tearing structures? // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. A08229.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017552>
 15. *Baumjohann W., Paschmann G., Cattell C.A.* Average plasma properties in the central plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 6597–6606.
<https://doi.org/10.1029/JA094iA06p06597>
 16. *Baumjohann W., Paschmann G., Luehr H.* Characteristics of high-speed ion flows in the plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 3801–3809.
<https://doi.org/10.1029/JA095iA04p03801>
 17. *Benz A.O.* Flare Observations // *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2017. V. 14. P. 2.
<https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3>
 18. *Birn J., Battaglia M., Fletcher L. et al.* Can Substorm Particle Acceleration Be Applied to Solar Flares? // *Astrophys. J.* 2017. V. 848. P. 116.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8ad4>
 19. *Birn J., Runov A., Khotyaintsev Y.* Magnetotail Processes / Ed. Maggiolo R., André N., Hasegawa H., Welling D.T. // *Magnetospheres in the Solar System.* 2021. V. 2. P. 245.
<https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch17>
 20. *Birn J., Schindler K., Hesse M.* Thin electron current sheets and their relation to auroral potentials // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. 2217.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010303>
 21. *Biskamp D.* *Magnetic Reconnection in Plasmas.* Cambridge, UK: Cambridge University Press. Cambridge monographs on plasma physics, 2000.
 22. *Bogachev S.A., Somov B.V., Kosugi T. et al.* The motions of the hard X-ray sources in solar flares: images and statistics // *Astrophys. J.* 2005. V. 630. P. 561–572.
<https://doi.org/10.1086/431918>
 23. *Brown J.C.* The Deduction of Energy Spectra of Non-Thermal Electrons in Flares from the Observed Dynamic Spectra of Hard X-Ray Bursts // *Sol. Phys.* 1971. V. 18. P. 489–502.
<https://doi.org/10.1007/BF00149070>
 24. *Burch J.L., Moore T.E., Torbert R.B. et al.* Magnetospheric Multiscale Overview and Science Objectives // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 5–21.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0164-9>
 25. *Califano F., Hellinger P., Kuznetsov E. et al.* Nonlinear mirror mode dynamics: Simulations and modeling // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A08219.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012898>
 26. *Chaston C.C., Bonnell J.W., Clausen L. et al.* Energy transport by kinetic-scale electromagnetic waves in fast plasma sheet flows // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. 9202.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017863>
 27. *Chaston C.C., Bonnell J.W., Wygant J.R. et al.* Observations of kinetic scale field line resonances // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 209–215.
<https://doi.org/10.1002/2013GL058507>
 28. *Chen Y., Song H.Q., Li B. et al.* Streamer Waves Driven by Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.* 2010. V. 714. P. 644–651.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/714/1/644>
 29. *Cheng L., Lin Y., Perez J.D. et al.* Kinetic Alfvén Waves From Magnetotail to the Ionosphere in Global Hybrid Simulation Associated With Fast Flows // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020. V. 125. P. e27062.
<https://doi.org/10.1029/2019JA027062>
 30. *Cheng X., Li Y., Wan L.F. et al.* Observations of Turbulent Magnetic Reconnection within a Solar Current Sheet // *Astrophys. J.* 2018. V. 866. P. 64.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aadd16>
 31. *Ciaravella A., Raymond J.C., Li J. et al.* Elemental Abundances and Post-Coronal Mass Ejection Current Sheet in a Very Hot Active Region // *Astrophys. J.* 2002. V. 575. P. 1116–1130.
<https://doi.org/10.1086/341473>
 32. *Damiano P.A., Johnson J.R., Chaston C.C.* Ion gyroradius effects on particle trapping in kinetic Alfvén waves along auroral field lines // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. P. 10831–10844.
<https://doi.org/10.1029/2016JA022566>
 33. *Daughton W.* Kinetic theory of the drift kink instability in a current sheet // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 29429–29444.
<https://doi.org/10.1029/1998JA900028>
 34. *de La Noe J., Boischoat A.* The Type III B Burst // *Astron. Astrophys.* 1972. V. 20. P. 55.
 35. *Decraemer B., Zhukov A.N., Van Doorselaere T.* Properties of Streamer Wave Events Observed during the STEREO Era // *Astrophys. J.* 2020. V. 893. P. 78.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8194>
 36. *Dwivedi A.K., Varma P., Tiwari M.S.* Ion and electron beam effects on kinetic Alfvén waves in an inhomogeneous magnetosphere // *Planet Space Sci.* 2002. V. 50. P. 93–99.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(01\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(01)00070-8)
 37. *Eastwood J.P., Hapgood M.A., Biffis E. et al.* Quantifying the Economic Value of Space Weather Forecasting for Power Grids: An Exploratory Study // *Space Weather.* 2018. V. 16. P. 2052–2067.
<https://doi.org/10.1029/2018SW002003>
 38. *Endeve E., Holzer T.E., Leer E.* Helmet Streamers Gone Unstable: Two-Fluid Magnetohydrodynamic Models of the Solar Corona // *Astrophys. J.* 2004. V. 603. P. 307–321.
<https://doi.org/10.1086/381239>
 39. *Ergun R.E., Goodrich K.A., Stawarz J.E. et al.* Large-amplitude electric fields associated with bursty bulk flow braking in the Earth's plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 1832–1844.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020165>
 40. *Erkaev N.V., Semenov V.S., Biernat H.K.* Magnetic Double-Gradient Instability and Flapping Waves in a Current Sheet // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99. P. 235003.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.235003>
 41. *Erkaev N.V., Semenov V.S., Biernat H.K.* Magnetic double gradient mechanism for flapping oscillations of a current sheet // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L02111.
<https://doi.org/10.1029/2007GL032277>
 42. *Erkaev N.V., Semenov V.S., Kubysheva I.V. et al.* MHD model of the flapping motions in the magnetotail current sheet // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. 3206.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013728>
 43. *Escoubet C.P., Fehringer M., Goldstein M.* Introduction: The Cluster mission // *Ann. Geo.* 2001. V. 19. P. 1197–1200.
<https://doi.org/10.5194/angeo-19-1197-2001>

44. *Eselevich M.V., Eselevich V.G.* The Structure of the Coronal-Streamer Belt // *Astron. Rep.* 2005. V. 49. P. 71–78.
<https://doi.org/10.1134/1.1850207>
45. *Eselevich M.V., Eselevich V.G.* Streamer belt in the solar corona and the Earth's orbit // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2007. V. 47. P. 291–298.
<https://doi.org/10.1134/S0016793207030036>
46. *Feng L., Inhester B., Gan W.Q.* Kelvin-Helmholtz Instability of a Coronal Streamer // *Astrophys. J.* 2013. V. 774. P. 141.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/141>
47. *Fletcher L., Hudson H.S.* Impulsive Phase Flare Energy Transport by Large-Scale Alfvén Waves and the Electron Acceleration Problem // *Astrophys. J.* 2008. V. 675. P. 1645–1655.
<https://doi.org/10.1086/527044>
48. *Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S. et al.* An Observational Overview of Solar Flares // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 159. P. 19–106.
<https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8>
49. *Frank A.G.* Dynamics of current sheets underlying flare-type events in magnetized plasmas // *Phys. Uspekhi.* 2010. V. 53. P. 941–947.
<https://doi.org/doi:10.3367/UFNe.0180.201009h.0982>
50. *Frank A.G., Artemyev A.V., Zelenyi L.M.* Current sheets in the Earth's magnetosphere and in laboratory experiments: The magnetic field structure and the Hall effect // *J. Exp. Theor. Phys.* 2016. V. 123. P. 699–715.
<https://doi.org/10.1134/S1063776116090119>
51. *Frank A.G., Kyrie N.P., Satunin S.N.* Plasma dynamics in laboratory-produced current sheets // *Phys. Plasm.* 2011. V. 18. 111209.
<https://doi.org/10.1063/1.3647576>
52. *Fruit G., Louarn P., Tur A. et al.* On the propagation of magnetohydrodynamic perturbations in a Harris-type current sheet 1. Propagation on discrete modes and signal reconstruction // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1411.
<https://doi.org/10.1029/2001JA009212>
53. *Ge Y.S., McFadden J.P., Raeder J. et al.* Case studies of mirror-mode structures observed by THEMIS in the near-Earth tail during substorms // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. A01209.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015546>
54. *Gershman D.J., Dorelli J.C., Viñas A.F. et al.* Electron dynamics in a subproton-gyroscale magnetic hole // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 4112–4118.
<https://doi.org/10.1002/2016GL068545>
55. *Golovchanskaya I.V., Maltsev Y.P.* On the identification of plasma sheet flapping waves observed by Cluster // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. 2102.
<https://doi.org/10.1029/2004GL021552>
56. *Gonzalez W., Parker E.* Magnetic Reconnection: Concepts and Applications // *Astrophys. and Space Sci. Lib.* 2016. V. 427.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-26432-5>
57. *Gosling J.T.* Magnetic Reconnection in the Solar Wind // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 172. P. 187–200.
<https://doi.org/10.1007/s11214-011-9747-2>
58. *Grigis P.C., Benz A.O.* The Evolution of Reconnection along an Arcade of Magnetic Loops // *Astrophys. J. Lett.* 2005. V. 625. P. L143–L146.
<https://doi.org/10.1086/431147>
59. *Gruber D., Lachowicz P., Bissaldi E. et al.* Quasi-periodic pulsations in solar flares: new clues from the Fermi Gamma-Ray Burst Monitor // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 533. P. A61.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117077>
60. *Gubchenko V.M.* Stratification in a neutral current sheet with counterstreaming plasma // *Sov. J. Plasma Phys.* 1985. V. 11. P. 467–476.
61. *Hayes L.A., Inglis A.R., Christe S. et al.* Statistical Study of GOES X-Ray Quasi-periodic Pulsations in Solar Flares // *Astrophys. J.* 2020. V. 895. P. 50.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8d40>
62. *Hellinger P., Štverák Š.* Electron mirror instability: particle-in-cell simulations // *J. Plasma Phys.* 2018. V. 84. P. 905840402.
<https://doi.org/10.1017/S0022377818000703>
63. *Hesse M., Winske D., Birn J.* On the ion-scale structure of thin current sheets in the magnetotail // *Physica Scripta.* 1998. V. 74. P. 63–66.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/1998/T74/012>
64. *Hoshino M., Mukai T., Yamamoto T. et al.* Ion dynamics in magnetic reconnection: Comparison between numerical simulation and Geotail observations // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 4509–4530.
<https://doi.org/10.1029/97JA01785>
65. *Hoshino M., Saito Y., Mukai T. et al.* Origin of hot and high speed plasmas in plasma sheet: plasma acceleration and heating due to slow shocks // *Adv. Space Res.* 1997. V. 20. P. 973–982.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00505-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00505-X)
66. *Huang S.Y., Zhou M., Sahraoui F. et al.* Observations of turbulence within reconnection jet in the presence of guide field // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. 11104.
<https://doi.org/10.1029/2012GL052210>
67. *Inglis A.R., Ireland J., Dennis B.R. et al.* A Large-scale Search for Evidence of Quasi-periodic Pulsations in Solar Flares // *Astrophys. J.* 2016. V. 833. P. 284.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/284>
68. *Jackman C.M., Arridge C.S., André N. et al.* Large-Scale Structure and Dynamics of the Magnetotails of Mercury, Earth, Jupiter and Saturn // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 182. P. 85–154.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0060-8>
69. *Karimabadi H., Pritchett P.L., Daughton W. et al.* Ion-ion kink instability in the magnetotail: 2. Three-dimensional full particle and hybrid simulations and comparison with observations // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 1401.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010109>
70. *Keiling A.* Alfvén Waves and Their Roles in the Dynamics of the Earth's Magnetotail: A Review // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 142. P. 73–156.
<https://doi.org/10.1007/s11214-008-9463-8>
71. *Keiling A., Thaller S., Dombeck J. et al.* Temporal Evolution of Substorm-Driven Global Alfvén Wave Power Above the Auroral Acceleration Region // *J. Geophys. Res. Space Phys.* V. 125. P. e27444.
<https://doi.org/10.1029/2019JA027444>
72. *Kim S., Masuda S., Shibasaki K. et al.* Systematic Microwave Source Motions along a Flare-Arcade Observed by Nobeyama Radioheliograph and AIA/SDO // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013. V. 65. P. S2.
<https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S299>
73. *Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Kontar E.P.* Origin of the Modulation of the Radio Emission from the Solar Corona by a Fast Magnetoacoustic Wave // *Astrophys.*

- J. 2018. V. 861. P. 33.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac77e>
74. *Kontar E.P.* Dynamics of electron beams in the solar corona plasma with density fluctuations // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 375. P. 629–637.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010807>
 75. *Kontar E.P., Yu S., Kuznetsov A.A. et al.* Imaging spectroscopy of solar radio burst fine structures // *Nature Comm.* 2017. V. 8. P. 1515.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-01307-8>
 76. *Korovinskiy D.B., Divin A.V., Erkaev N.V. et al.* The double-gradient magnetic instability: Stabilizing effect of the guide field // *Phys. Plasm.* 2015. V. 22. P. 012904.
<https://doi.org/10.1063/1.4905706>
 77. *Korovinskiy D.B., Divin A., Erkaev N.V. et al.* MHD modeling of the double-gradient (kink) magnetic instability // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 1146–1158.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50206>
 78. *Kostarev D.V., Mager P.N., Klimushkin D.Y.* Alfvén Wave Parallel Electric Field in the Dipole Model of the Magnetosphere: Gyrokinetic Treatment // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021. V. 126. e28611.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028611>
 79. *Kubyshkina D.I., Sormakov D.A., Sergeev V.A. et al.* How to distinguish between kink and sausage modes in flapping oscillations? // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 3002–3015.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019477>
 80. *Kuznetsov E.A., Passot T., Sulem P.L.* Dynamical Model for Nonlinear Mirror Modes near Threshold // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. P. 235003.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.235003>
 81. *Kuznetsov E.A., Passot T., Ruban V.P. et al.* Variational approach for static mirror structures. *Phys. Plasm.* 2015. V. 22. P. 042114.
<https://doi.org/10.1063/1.4919027>
 82. *Kuznetsov S.A., Zimovets I.V., Melnikov V.F. et al.* Spatio-temporal Evolution of Sources of Microwave and Hard X-ray Pulsations of the Solar Flare using the NoRH, RHESSI, and AIA/SDO Observation Data // *Geom. Aeron.* 2017. V. 57. P. 1067–1072.
<https://doi.org/10.1134/S001679321708014X>
 83. *Kuznetsov S.A., Zimovets I.V., Morgachev A.S. et al.* Spatio-temporal Dynamics of Sources of Hard X-Ray Pulsations in Solar Flares // *Sol. Phys.* 2016. V. 291. P. 3385–3426.
<https://doi.org/10.1007/s11207-016-0981-3>
 84. *Kwon R.-Y., Ofman L., Olmedo O. et al.* STEREO Observations of Fast Magnetosonic Waves in the Extended Solar Corona Associated with EIT/EUV Waves // *Astrophys. J.* 2013. V. 766. P. 55.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/766/1/55>
 85. *Leonovich A.S., Mazur V.A.* Linear transformation of the standing Alfvén wave in an axisymmetric magnetosphere // *Planet Space Sci.* 1995. V. 43. P. 885–893.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(94\)00207-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(94)00207-8)
 86. *Leonovich A.S., Kozlov D.A., Vlasov A.A.* Kinetic Alfvén Waves Near a Dissipative Layer // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021. V. 126. P. e29580.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029580>
 87. *Leonovich A., Mazur V., Kozlov D.* MHD-waves in the geomagnetic tail: A review // *Solnechno-Zemnaya Fizika.* 2015. V. 1. P. 4–22.
<https://doi.org/10.12737/7168>
 88. *Li J.-H., Yang F., Zhou X.-Z. et al.* Self-consistent kinetic model of nested electron- and ion-scale magnetic cavities in space plasmas // *Nature Comm.* 2020. V. 11. P. 5616.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-19442-0>
 89. *Li L.P., Zhang J., Su J.T. et al.* Oscillation of Current Sheets in the Wake of a Flux Rope Eruption Observed by the Solar Dynamics Observatory // *Astrophys. J. Lett.* 2016. V. 829. P. L33.
<https://doi.org/10.3847/2041-8205/829/2/L33>
 90. *Liang J., Lin Y., Johnson J.R. et al.* Kinetic Alfvén waves in three-dimensional magnetic reconnection // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. P. 6526–6548.
<https://doi.org/10.1002/2016JA022505>
 91. *Lin J., Murphy N.A., Shen C. et al.* Review on Current Sheets in CME Development: Theories and Observations // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 194. P. 237–302.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0209-0>
 92. *Ling A.G., Webb D.F., Burkepile J.T. et al.* Development of a Current Sheet in the Wake of a Fast Coronal Mass Ejection // *Astrophys. J.* 2014. V. 784. P. 91.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/784/2/91>
 93. *Lu S., Artemyev A.V., Angelopoulos V. et al.* The Hall Electric Field in Earth's Magnetotail Thin Current Sheet // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2019. V. 124. P. 1052–1062.
<https://doi.org/10.1029/2018JA026202>
 94. *Lu S., Lin Y., Angelopoulos V. et al.* Hall effect control of magnetotail dawn-dusk asymmetry: A three-dimensional global hybrid simulation // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. P. 11.
<https://doi.org/10.1002/2016JA023325>
 95. *Lysak R.L.* Magnetosphere-ionosphere coupling by Alfvén waves at midlatitudes // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. A07201.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010454>
 96. *Lysak R.L., Lotko W.* On the kinetic dispersion relation for shear Alfvén waves // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 5085–5094.
<https://doi.org/10.1029/95JA03712>
 97. *Lysak R.L., Song Y.* Kinetic theory of the Alfvén wave acceleration of auroral electrons // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 8005.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009406>
 98. *Lysak R.L., Song Y.* Development of parallel electric fields at the plasma sheet boundary layer // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. A00K14.
<https://doi.org/10.1029/2010JA016424>
 99. *McLaughlin J.A., Nakariakov V.M., Dominique M. et al.* Modelling Quasi-Periodic Pulsations in Solar and Stellar Flares // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. P. 45.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0478-5>
 100. *Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y.* Magneto-hydrodynamic Waves in the Solar Corona // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2020. V. 58. P. 441–481.
<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-032320-042940>
 101. *Nakariakov V.M., Melnikov V.F.* Quasi-Periodic Pulsations in Solar Flares // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 149. P. 119–151.
<https://doi.org/10.1007/s11214-009-9536-3>
 102. *Nakariakov V.M., Ofman L.* Determination of the coronal magnetic field by coronal loop oscillations // *Astrophys. J.* 2001. V. 372. P. L53–L56.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010607>

103. *Nakariakov V.M., Verwichte E.* Coronal Waves and Oscillations // *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2005. V. 2. P. 3. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2005-3>
104. *Nakariakov V.M., Ofman L., Deluca E.E. et al.* TRACE observation of damped coronal loop oscillations: Implications for coronal heating // *Science*. 1999. V. 285. P. 862–864. <https://doi.org/10.1126/science.285.5429.862>
105. *Nakariakov V.M., Pilipenko V., Heilig B. et al.* Magnetohydrodynamic Oscillations in the Solar Corona and Earth's Magnetosphere: Towards Consolidated Understanding // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 200. P. 75–203. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0233-0>
106. *Ofman L., Abbo L., Giordano S.* Multi-fluid Model of a Streamer at Solar Minimum and Comparison with Observations // *Astrophys. J.* 2011. V. 734. P. 30. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/734/1/30>
107. *Ofman L., Provornikova E., Abbo L. et al.* Three-dimensional multi-fluid model of a coronal streamer belt with a tilted magnetic dipole // *Ann. Geophys.* 2015. V. 33. P. 47–53. <https://doi.org/10.5194/angeo-33-47-2015>
108. *Paschmann G., Øieroset M., Phan T.* In-Situ Observations of Reconnection in Space // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 178. P. 385–417. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9957-2>
109. *Petrakovich A.A., Artemyev A.V., Vasko I.Y. et al.* Current sheets in the Earth magnetotail: plasma and magnetic field structure with Cluster project observations // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 188. P. 311–337. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0126-7>
110. *Petrakovich A.A., Baumjohann W., Nakamura R. et al.* Formation of current density profile in tilted current sheets // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 3669–3676. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-3669-2008>
111. *Petrakovich A.A., Baumjohann W., Nakamura R. et al.* Thinning and stretching of the plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. 10213. <https://doi.org/10.1029/2007JA012349>
112. *Petrakovich A.A., Zhang T.L., Baumjohann W. et al.* Oscillatory magnetic flux tube slippage in the plasma sheet // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P. 1695–1704. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-1695-2006>
113. *Phan T.D., Bale S.D., Eastwood J.P. et al.* Parker Solar Probe In Situ Observations of Magnetic Reconnection Exhausts during Encounter 1 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2020. V. 246. P. 34. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab55ee>
114. *Pneuman G.W., Kopp R.A.* Gas-Magnetic Field Interactions in the Solar Corona // *Sol. Phys.* 1971. V. 18. P. 258–270. <https://doi.org/10.1007/BF00145940>
115. *Priest E.R., Forbes T.G.* The magnetic nature of solar flares // *Astron. Astrophys. Rev.* 2002. V. 10. P. 313–377. <https://doi.org/10.1007/s001590100013>
116. *Priest E., Forbes T.* *Magnetic Reconnection*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
117. *Reeves K.K., Golub L.* Atmospheric Imaging Assembly Observations of Hot Flare Plasma // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 727. P. L52. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/727/2/L52>
118. *Reeves K.K., Guild T.B., Hughes W.J. et al.* Postruptive phenomena in coronal mass ejections and substorms: Indicators of a universal process? // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A00B02. <https://doi.org/10.1029/2008JA013049>
119. *Reeves K.K., Linker J.A., Mikić Z. et al.* Current Sheet Energetics, Flare Emissions, and Energy Partition in a Simulated Solar Eruption // *Astrophys. J.* 2010. V. 721. P. 1547–1558. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1547>
120. *Reva A.A., Ulyanov A.S., Kuzin S.V.* Current Sheet Structures Observed by the TESIS EUV Telescope during a Flux Rope Eruption on the Sun // *Astrophys. J.* 2016. V. 832. P. 16. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/832/1/16>
121. *Reva A., Shestov S., Zimovets I. et al.* Wave-like Formation of Hot Loop Arcades // *Sol. Phys.* 2015. V. 290. P. 2909–2921. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0769-x>
122. *Réville V., Velli M., Rouillard A.P. et al.* Tearing Instability and Periodic Density Perturbations in the Slow Solar Wind // *Astrophys. J.* 2020. V. 895. P. L20. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab911d>
123. *Runov A., Angelopoulos V., Artemyev A.V. et al.* Global and local processes of thin current sheet formation during substorm growth phase // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2021. V. 220. P. 105671. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105671>
124. *Runov A., Angelopoulos V., Sergeev V.A. et al.* Global properties of magnetotail current sheet flapping: THEMIS perspectives // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 319–328. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-319-2009>
125. *Runov A., Sergeev V.A., Baumjohann W. et al.* Electric current and magnetic field geometry in flapping magnetotail current sheets // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23. P. 1391–1403. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-1391-2005>
126. *Russell C.T., Jian L.K., Luhmann J.G. et al.* Mirror mode waves: Messengers from the coronal heating region // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L15101. <https://doi.org/10.1029/2008GL034096>
127. *Schwenn R.* *Space Weather: The Solar Perspective* // *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2006. V. 3. P. 2. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-2>
128. *Sergeev V.A., Runov A., Baumjohann W. et al.* Orientation and propagation of current sheet oscillations // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. 5807. <https://doi.org/10.1029/2003GL019346>
129. *Sergeev V.A., Sormakov D.A., Apatenkov S.V. et al.* Survey of large-amplitude flapping motions in the midtail current sheet // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P. 2015–2024. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-2015-2006>
130. *Sharykin I.N., Kontar E.P., Kuznetsov A.A.* LOFAR Observations of Fine Spectral Structure Dynamics in Type IIIb Radio Bursts // *Sol. Phys.* 2018. V. 293. P. 115. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1333-2>
131. *Sheeley N.R., Wang Y.M., Hawley S.H. et al.* Measurements of Flow Speeds in the Corona Between 2 and 30 R_{sun} // *Astrophys. J.* 1997. V. 484. P. 472–478. <https://doi.org/10.1086/304338>
132. *Shustov P.I., Artemyev A.V., Vasko I.Y. et al.* Kinetic models of sub-ion cylindrical magnetic hole // *Phys. Plasm.* 2016. V. 23. P. 122903. <https://doi.org/10.1063/1.4972093>
133. *Shustov P.I., Artemyev A.V., Volokitin A.S. et al.* Electron magnetosonic waves and sub-ion magnetic holes in the magnetotail plasma // *Phys. Plasm.* 2022. V. 29.

- P. 012902.
<https://doi.org/10.1063/5.0075938>
134. *Shustov P.I., Nishimura Y., Artemyev A.V. et al.* In-situ and optical observations of sub-ion magnetic holes // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020. V. 208. P. 105365.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105365>
 135. *Shustov P.I., Zhang X.J., Pritchett P.L. et al.* Statistical Properties of Sub-Ion Magnetic Holes in the Dipolarized Magnetotail: Formation, Structure, and Dynamics // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2019. V. 124. P. 342–359.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025852>
 136. *Sironi L., Spitkovsky A.* Acceleration of Particles at the Termination Shock of a Relativistic Striped Wind // *Astrophys. J.* 2011. V. 741. P. 39.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/741/1/39>
 137. *Sitnov M.I., Birn J., Ferdousi B. et al.* Explosive Magnetotail Activity // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215. P. 31.
<https://doi.org/10.1007/s11214-019-0599-5>
 138. *Soucek J., Lucek E., Dandouras I.* Properties of magnetosheath mirror modes observed by Cluster and their response to changes in plasma parameters // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A04203.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012649>
 139. *Stasiewicz K., Bellan P., Chaston C. et al.* Small Scale Alfvénic Structure in the Aurora // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 92. P. 423–533.
<https://doi.org/10.1023/A:1005207202143>
 140. *Syrovatskii S.I.* Pinch sheets and reconnection in astrophysics // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1981. V. 19. P. 163–229.
<https://doi.org/10.1146/annurev.aa.19.090181.001115>
 141. *Syrovatskii S.I., Shmeleva O.P.* Heating of Plasma by High-Energy Electrons, and Nonthermal X-Ray Emission in Solar Flares // *Sov. Astr.* 1972. V. 16. P. 273.
 142. *Tikhonchuk V.T., Rankin R.* Parallel potential driven by a kinetic Alfvén wave on geomagnetic field lines // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1104.
<https://doi.org/10.1029/2001JA000231>
 143. *Vasko I.Y., Artemyev A.V., Petrukovich A.A. et al.* The structure of strongly tilted current sheets in the Earth magnetotail // *Ann. Geophys.* 2014. V. 32. P. 133–146.
<https://doi.org/10.5194/angeo-32-133-2014>
 144. *Voitenko Y.M.* Excitation of Kinetic Alfvén Waves in a Flaring Loop // *Sol. Phys.* 1998. V. 182. P. 411–430.
<https://doi.org/10.1023/A:1005049006572>
 145. *Voitenko Y., Goossens M.* Competition of damping mechanisms for the phase-mixed Alfvén waves in the solar corona // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 357. P. 1086–1092.
 146. *Vorpahl J.A.* The triggering and subsequent development of a solar flare // *Astrophys. J.* 1976. V. 205. P. 868–873.
<https://doi.org/10.1086/154343>
 147. *Vršnak B., Poletto G., Vujčić E. et al.* Morphology and density structure of post-CME current sheets // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 499. P. 905–916.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810844>
 148. *Wang Y.M., Sheeley J., Howard R.A. et al.* Origin and Evolution of Coronal Streamer Structure During the 1996 Minimum Activity Phase // *Astrophys. J.* 1997. V. 485. P. 875–889.
<https://doi.org/10.1086/304467>
 149. *Wygant J.R., Keiling A., Cattell C.A. et al.* Evidence for kinetic Alfvén waves and parallel electron energization at 4–6 R_{\oplus} altitudes in the plasma sheet boundary layer // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1201.
<https://doi.org/10.1029/2001JA900113>
 150. *Xu S., Runov A., Artemyev A. et al.* Intense Cross-Tail Field-Aligned Currents in the Plasma Sheet at Lunar Distances // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 4610–4617.
<https://doi.org/10.1029/2018GL077902>
 151. *Yamada M., Kulsrud R., Ji H.* Magnetic reconnection // *Rev. Modern Phys.* 2010. V. 82. P. 603–664.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.603>
 152. *Yermolaev Y.I., Yermolaev M.Y.* Solar and interplanetary sources of geomagnetic storms: Space weather aspects // *Izv. Atm. Ocean. Phys.* 2010. V. 46. P. 799–819.
<https://doi.org/10.1134/S0001433810070017>
 153. *Yu L., Huang S.Y., Yuan Z.G. et al.* Characteristics of Magnetic Holes in the Solar Wind Revealed by Parker Solar Probe // *Astrophys. J.* 2021. V. 908. P. 56.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb9a8>
 154. *Yushkov E.V., Artemyev A.V., Petrukovich A.A. et al.* Current sheet flapping in the near-Earth magnetotail: peculiarities of propagation and parallel currents // *Ann. Geophys.* 2016. V. 34. P. 739–750.
<https://doi.org/10.5194/angeo-34-739-2016>
 155. *Zelenyi L.M., Artemyev A.V.* “Effective” collisions in weakly magnetized collisionless plasma: importance of Pitaevski’s effect for magnetic reconnection // *J. Plasm. Phys.* 2016. V. 82. P. 305820101.
<https://doi.org/10.1017/S0022377816000118>
 156. *Zelenyi L.M., Artemyev A.V., Petrukovich A.A.* Earthward electric field in the magnetotail: Cluster observations and theoretical estimates // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. P. 6105.
<https://doi.org/10.1029/2009GL042099>
 157. *Zelenyi L.M., Artemyev A.V., Petrukovich A.A. et al.* Low frequency eigenmodes of thin anisotropic current sheets and Cluster observations // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 861–868.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-861-2009>
 158. *Zelenyi L.M., Frank A.G., Artemyev A.V. et al.* Formation of sub-ion scale filamentary force-free structures in the vicinity of reconnection region // *Plasm. Phys. Contr. Fus.* 2016. V. 58. P. 054002.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/58/5/054002>
 159. *Zhang T.L., Baumjohann W., Nakamura R. et al.* A wavy twisted neutral sheet observed by CLUSTER // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 190000.
<https://doi.org/10.1029/2002GL015544>
 160. *Zhang X.-J., Artemyev A., Angelopoulos V. et al.* Kinetics of sub-ion scale magnetic holes in the near-Earth plasma sheet // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. V. 122. P. 10304–10317.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024197>
 161. *Zimovets I.V., McLaughlin J.A., Srivastava A.K. et al.* Quasi-Periodic Pulsations in Solar and Stellar Flares: A Review of Underpinning Physical Mechanisms and Their Predicted Observational Signatures // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. P. 66.
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00840-936>