

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

Дивин Андрей Викторович

**КИНЕТИЧЕСКОЕ И МГД МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ  
ГЕЛИОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ**

Научная специальность

1.3.1. Физика космоса, астрономия

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2023

## Оглавление

	стр.
Введение .....	3
Цели и задачи работы .....	8
Современное состояние исследований и описание результатов, полученных соискателем .....	10
Основные положения, выносимые на защиту .....	24
Список работ соискателя .....	26
Список литературы .....	32

## Введение

Земля, планеты и другие тела солнечной системы окружены бесстолкновительной горячей плазмой солнечного ветра и подвергаются её постоянному воздействию. Характер взаимодействия зависит от наличия у небесного тела внутреннего магнитного поля или присутствия атмосферы. Если солнечный ветер отклоняется внутренним магнитным полем на большом расстоянии от планеты, то формируется полость в солнечном ветре, называемая магнитосферой. Подобными крупномасштабными магнитосферами обладают почти все планеты солнечной системы, при этом земная магнитосфера является наиболее детально исследованным объектом. Под действием солнечного ветра магнитосфера сжимается на дневной стороне; на ночной стороне формируется магнитный хвост, представляющий собой сильно вытянутые линии магнитного поля, разделенные токовым слоем. Характерной особенностью магнитосфер такого типа является чрезвычайно разнообразная внутренняя динамика, проявляющаяся в процессах медленного накопления магнитной энергии и её быстрого выделения, что сопровождается генерацией ускоренных частиц, нагревом плазмы и, как следствие, возмущениями во всем комплексе магнитосфера-ионосфера-атмосфера. Широкий круг явлений, происходящих в околоземном пространстве под воздействием гелиофизических факторов, называют “космической погодой”. Исследование эффектов космической погоды на технические системы и здоровье людей, а также её прогноз, является актуальной фундаментальной и практической задачей.

Крупномасштабные плазменные процессы сопровождаются изменением топологии магнитного поля под действием магнитного пересоединения, которое собственно и задаёт скорость трансформации энергии, а также контролирует величину пропускаемого внутрь магнитосферы магнитного потока из солнечного ветра. Понимание работы магнитосферы в целом требует детального анализа основных параметров магнитного пересоединения, а именно: его скорости, пространственного масштаба диффузионной области, структуры окрестности магнитного пересоединения при наличии примесей, а также получения оценок его энергоэффективности, что в случае бесстолк-

новительной плазмы наиболее полно раскрывается посредством численного моделирования.

Луна и астероиды представляют собой взаимодействие качественно другого типа. Отсутствие атмосферы и глобального магнитного поля приводит к тому, что солнечный ветер и высокоэнергичные частицы высыпаются прямо на поверхность нашего естественного спутника. Однако, предоставить защиту от неблагоприятного воздействия способны так называемые лунные магнитные аномалии, где присутствуют мелкомасштабные области остаточной намагниченности коры. Актуальность исследований в данном направлении обусловлена повышенным интересом к освоению Луны в настоящее время Россией, Китаем, США, ЕС и Индией, а также перспективой основания там обитаемой лунной станции. Данная задача требует прогнозирования радиационных рисков на поверхности Луны, для чего является необходимым создание точной картины магнитного поля Луны, а также изучение структуры течений плазмы под воздействием локальных магнитных полей.

Ещё больше отличаются от “обычных” магнитосфер структуры, формирующиеся при взаимодействии солнечного ветра с кометами. Ядро кометы представляет собой глыбу, состоящую из рыхлой смеси льда (как водяного, так и сухого льда), камней и некоторых более сложных соединений. Вдали от Солнца ядро кометы ведёт себя подобно астероиду, однако по мере приближения к Солнцу вещество кометного ядра испаряется в процессе дегазации, формируя обширную атмосферу — кому. Размер этой атмосферы может на много порядков превосходить размер ядра кометы, при этом слабая сила притяжения кометы не способна предотвратить убежание кометного вещества в космос. Основное взаимодействие происходит вследствие постепенной ионизации нейтрального газа и внедрения тяжёлых ионов кометного происхождения в солнечный ветер. Существовавшие ранее подходы к численному моделированию кометной атмосферы были основаны на приближении сплошной среды, но в настоящее время стало очевидно, что это приближение не способно адекватно объяснить экспериментальные спутниковые данные, особенно в режиме слабой кометы.

Существующий термин “космическая погода” относится, в основном, к физике солнечно-земных связей. Освоение человеком гелиосферы требует

создания высокоточных моделей взаимодействия различных тел с солнечным ветром, оценки интенсивности потоков энергичных частиц и прогноза динамики плазмы при различных параметрах солнечного ветра. Принимая во внимание недостаточность экспериментальных данных (что особенно характерно для наблюдений окололунного пространства и комет), численное моделирование выступает основным (если не единственным) доступным инструментом исследования.

Эксперимент является отправной точкой в исследовании, его фундаментом, на котором строятся дальнейшие теоретические и вычислительные построения. Постоянное увеличение точности измерений (спутниковых, оптических, лабораторных), а также качества экспериментальных данных требует создания всё более точных моделей для интерпретации природы происходящих явлений. За последние десятилетия целый ряд спутниковых миссий был направлен на исследование динамики преобразования энергии и сопутствующих процессов в околоземном космическом пространстве, например: Cluster (запущенные в 2000 году европейские спутники), MMS (спутники запущены в 2015 года специально для исследования магнитного пересоединения и его последствий). Спутниковые наблюдения предоставляют данные лишь в одной (или нескольких) точках, что, к сожалению, даёт косвенную информацию о физических процессах во всём пространстве в динамической, движущейся среде. Именно теоретические и численные модели на основе экспериментальных данных способны построить количественную самосогласованную модель процесса, которая дополняет и интерпретирует наблюдения.

Сложность поставленных задач такова, что единственным исчерпывающим средством исследования для изучения мультимасштабных процессов в большом диапазоне параметров является компьютерное моделирование. Сложность вычислений балансирует между желаемым разрешением и размером вычислительной области с одной стороны, и доступными вычислительными ресурсами, с другой. Для некоторых численных расчётов достаточно обычных рабочих станций (но потребуется большое время для проведения расчётов, дни и недели). Для многих вычислительных задач на передовом крае науки такой подход неприменим в силу, например, требований по объёму оперативной памяти. Типичным в таких случаях является ис-

пользование суперкомпьютеров, которые представляют из себя отдельные сервера, соединенные в единый вычислительный комплекс быстрой сетью.

Современный вычислительный код является сложным программным продуктом, разработка которого является трудоемкой задачей. Для использования доступных суперкомпьютерных ресурсов необходим параллельный алгоритм, который эффективно разбивает вычислительную проблему на нити, исполняемые на отдельных процессорах (ядрах). Вычислительный код при этом сшивает результат вычислений, организует обмен данными между нитями и сохраняет результат в постоянную память. Создание, отладка, тестирование и адаптация такого продукта под конкретную физическую задачу занимает годы и требует кооперации достаточно разнородной по составу группы, состоящей из программистов, математиков, физиков и конечных пользователей. Каждый созданный код является уникальным вычислительным средством со своими особенностями и оптимизациями. Помимо собственно расчётного модуля, большую роль играют методы пост-обработки и визуализации результатов, что критически важно при интерпретации результатов больших трехмерных вычислений.

Существует несколько подходов к описанию динамики плазмы. Уравнения магнитогидродинамики (МГД) и представляют собой уравнения сохранения массы, импульса и энергии сплошной среды. В этом приближении плазма рассматривается как проводящий газ, взаимодействующий с магнитным полем. В каждой точке существует локальное термодинамическое равновесие, и состояние плазмы описывается однозначно таким набором параметров, как плотность, температура, скорость, магнитное поле. Данный подход применяется для моделирования объектов, которые велики по сравнению с характерными масштабами плазмы (например, ионный гирорадиус). В настоящее время существует ряд глобальных динамических МГД моделей магнитосферы Земли и других гелиосферных объектов, которые успешно используются как для изучения фундаментальных явлений, так и для прогноза космической погоды. Качественно другой подход требуется при описании процессов, при которых в плазме формируются функции распределения, далёкие от локального термодинамического равновесия. В таких процессах функция распределения может принимать достаточно сложный вид, и для адекватного воспроизведения динамики плазмы требуется либо

использовать метод макрочастиц, либо полностью разрешать пространство скоростей.

Диссертация посвящена численному моделированию процессов в бесстолкновительной плазме магнитосферы и гелиосферы методом “Частица-в-ячейке”. Для вычислений используется параллельный открытый код iPIC3D [1], в своей базовой версии представленный на сайте <https://github.com/CmPA/iPic3D>. В коде реализован полунеявный метод моментов (implicit moment method). Соискатель является одним из авторов кода iPIC3D и принимал активное участие в его поддержке и развитии. Вычисления по теме диссертации проводились с использованием как российских вычислительных ресурсов (суперкомпьютер “Ломоносов” НИВЦ МГУ), так и зарубежных (суперкомпьютеры Curie, Beskow, Pleiades и другие). Высокая эффективность кода проверена в расчетах с использованием до 10000 ядер. Исследование носит в основном теоретический характер; некоторые вычисления были апробированы на спутниковых наблюдениях.

Достоверность полученных результатов обусловлена корректной постановкой численных экспериментов, подтверждена сопоставлением со спутниковыми измерениями и апробацией в ведущих научных журналах.

## Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является исследование эффектов магнитного пересоединения как важнейшего элемента магнитосферной активности, а также создание моделей взаимодействия солнечного ветра и оценка эффектов космической погоды в окрестности Луны и комет. Соискателем развивается **новое в России направление: численное моделирование кинетических процессов в плазме солнечной системы с помощью суперкомпьютерных методов исследования**. Численное моделирование плазменного окружения Луны и слабых комет носит новаторский характер, так как только в последнее десятилетие появились доступные вычислительные ресурсы, достаточные для трехмерного моделирования плазмы в полностью кинетическом приближении.

Для достижения данной цели автором были поставлены и решены следующие технические задачи:

1. Создать набор двух- и трёхмерных численных моделей бесстолкновительного магнитного пересоединения для изучения особенностей процесса при разных параметрах втекающей плазмы (плотность, температура, состав) и выявления новых закономерностей процесса. Большой набор моделей позволяет досконально изучить такие тонкие эффекты, как скорость магнитного пересоединения, структура диффузионной области, баланс сил в окрестности нейтральной линии.

2. Изучить влияние эффектов волновой активности на процесс магнитного пересоединения; провести самосогласованный учёт энергетики взаимодействия волна-частица в окрестности фронтов и сепаратрис. Основной технической задачей здесь является углубленная пост-обработка и визуализация результатов трёхмерных вычислений. Проведение апробации полученной модели на спутниковых данных.

3. Создать численную модель мини-магнитосфер на поверхности Луны, изучить структуру мини-магнитосфер, картину высыпания частиц и динамику отражения ионов. Адаптировать вычислительный метод для решения этой задачи. Разработать ряд новых версий кода iPIC3D, в которых в качестве внешнего магнитного поля выступают: магнитный диполь, магнитный квадруполь, эмпирическое магнитное поле Луны [2]. Учитывая

разрозненность данных и малый масштаб магнитных аномалий, апробация расчётов на данных пролётных спутников носит качественный характер. Однако, трёхмерное моделирование позволяет получить распределение высыпания частиц на поверхность, благодаря чему можно сравнить полученные результаты с оптическими наблюдениями.

4. Изучить характерные кинетические особенности плазменного окружения слабой кометы. Адаптировать код для проведения численного моделирования взаимодействия солнечного ветра с кометой 67P/Чурюмова-Герасименко. Выбор именно этой кометы базируется на доступности экспериментальных наблюдений спутником Rosetta в ее окрестности. Помимо этого, комета находилась в режиме слабой дегазации на расстоянии 3—4 астрономических единиц от Солнца в начале миссии Rosetta, что предполагает необходимость кинетического подхода к моделированию.

5. Добавить в код iPIC3D солвер МГД уравнений с целью изучения крупномасштабных осцилляций токового слоя магнитного хвоста (“флэппинг”-неустойчивость). Предусмотреть в МГД модуле возможность задания сложных начальных условий для оценки влияния изгиба хвоста на срыв магнитосферной суббури. Использование собственного кода вместо адаптации известных параллельных МГД кодов обосновывается тем, что для изучения медленной динамики требуется точно оценивать численные эффекты схемы и влияние граничных условий.

## Современное состояние исследований и описание результатов, полученных соискателем

### 1. Численное моделирование магнитного пересоединения и модель электронной диффузионной области

Магнитное пересоединение это универсальный плазменный процесс, который играет важную роль во взаимодействии солнечного ветра и магнитосферы, инициировании корональных выбросов массы, солнечных вспышках, в астрофизической и лабораторной плазме. Самые первые модели магнитного пересоединения появились в середине XX века [3], [4]. В данной модели (“Свита-Паркера”) было проведено теоретическое исследование скорости преобразования накопленной магнитной энергии в энергию ускоренных потоков плазмы в токовом слое с однородной проводимостью. Был приведен теоретический скейлинг, который, однако, давал характерные скорости пересоединения на несколько порядков меньше наблюдаемых. Так, характерные времена развития солнечной вспышки, предсказанные моделью Свита-Паркера оказывались порядка  $10^7$  с, вместо наблюдаемых 10-100 с. В модели Петчека [5] постулируется существование ударных волн, на которых ускоряется втекающая плазма. Микроскопический токовый слой Свита-Паркера в данной модели присутствует в окрестности нейтральной линии и необходим для изменения топологии магнитных силовых линий. Основным процесс преобразования магнитной энергии при этом происходит на ударных волнах. Большим преимуществом модели Петчека является слабая (логарифмическая) зависимость от сопротивления плазмы. Модели Свита-Паркера и Петчека были первыми количественными моделями магнитного пересоединения. Их базовые элементы легли в основу множества дальнейших работ, в которых учитывается электронная и ионная кинетика. Подробная дискуссия о границах применимости МГД приближения в плазме приведена, например, в книге [6].

Классическое сопротивление за счет бинарных столкновений между частицами плазмы обеспечивает диссипацию в модели Свита-Паркера и нарушает условие замороженности магнитного поля в плазму в диффузионной области. С помощью анализа обобщенного закона Ома в ранних работах о

магнитном пересоединении в бесстолкновительной плазме [7] было показано, что роль классического сопротивления может выполнять инерция электронов, если выражение  $\nabla \cdot \mathbf{P}_e$  вносит вклад в баланс сил в нейтральной линии (в тензоре электронного давления  $\mathbf{P}_e$  присутствуют недиагональные компоненты). Несмотря на то, что первые модели магнитного пересоединения в приближении МГД появились ещё в середине XX века, обобщить данные исследования для бесстолкновительной кинетической плазмы удалось только в XXI веке. Цикл работ “*GEM reconnection challenge*” в 2001 г. [8] придал импульс активному изучению разнообразных аспектов процесса. Используя различные приближения к описанию динамики плазмы (как приближение сплошной среды, так и полностью кинетический подход) было показано, что наличие эффекта Холла является основным фактором, поддерживающим процесс быстрого магнитного пересоединения. С развитием программных средств моделирования, а также в связи с большей доступностью вычислительных ресурсов, появились точные количественные описания диффузионных областей магнитного пересоединения в кинетическом режиме. Были изучены структуры функций распределения электронов внутри диффузионной области. [9], [10], определены характерные размеры ионных и электронных диффузионных областей [8]. Пространственное распределение электронного давления  $\mathbf{P}_e$  организовано в окрестности пересоединения сложным образом. В области втекания присутствует параллельное электрическое поле [11], [12], с перепадом потенциала до 1 КэВ. Электроны испытывают предварительное ускорение перед попаданием в диффузионную область, и давление  $\mathbf{P}_e$  демонстрирует сильную анизотропию параллельно магнитному полю.

В ранних работах соискателя [13], [14] предложен алгоритм разделения функции распределения в окрестности диффузионной области на отдельные популяции. Данные популяции обладают существенно разными скоростями: скорость втекающих частиц направлена преимущественно по нормали к токовому слою, а ускоренные частицы двигаются по направлению тока. Изучение траекторий отдельных частиц позволило взглянуть по-новому на структуру ускоренной популяции электронов. Было обнаружено, что в пространстве скоростей формируется последовательность структур в форме буквы “С” (patterns C-shaped). Дальнейшие численные исследования

[15], [16], [17] и наблюдения (например, [18]) показали, что такие структуры обычно обнаруживаются в областях с локализованным перпендикулярным электрическим полем. Структуры такого типа принято называть “полумесяцы” и в настоящее время они считаются важнейшим индикатором размагничности электронов вблизи диффузионной области. Успешные экспериментальные исследования магнитосферы Земли спутниками выявили потребность в углублённой теоретической интерпретации полученных результатов наблюдений. Для быстрой классификации различных областей в большом объеме данных был разработан целый ряд признаков, базирующихся на анизотропии и негиротропии электронного давления [19–21] и структуре функции распределения ионов [A35].

Соискателем предложена простая модель недиагональной компоненты электронного давления:  $P_{eyz} = nm_e V_{ey} V_{ez}$ , верная внутри электронной диффузионной области, а также получен скейлинг электронной диффузионной области как функция параметров плазмы в области втекания [14]. Характерная проводимость оказывается порядка боровской диффузии, несмотря на бесстолкновительную динамику плазмы. Важнейшие результаты были получены в работе соискателя [A19] при решении задачи о сшивании известной параллельной анизотропии в области втекания [11] с аппроксимацией  $P_{eyz}$ . Был рассмотрен поворот тензора электронного давления в систему отсчета, связанную со скоростью электронной компоненты плазмы. Работа впервые позволила доказать, что разделение на внешнюю и внутреннюю части ошибочно и что электронная диффузионная область по всей длине от нейтральной линии до области торможения электронов это единый по своей структуре объект. Для данной модели в работе [A27] продемонстрирована зависимость  $\sim \beta^{1/8}$  скорости пересоединения от плазменной  $\beta$  в области втекания. Качественно похожая зависимость от внешних параметров появляется в вычислениях крупномасштабного баланса сил [22] для более широкого диапазона параметров  $\beta$ . Основываясь на результатах исследований, в сотрудничестве с зарубежными коллегами создана численная модель окрестности области диффузионной области [A33], [A34], базирующаяся на уравнении Грэда-Шафранова. Модель подтверждена с помощью численного моделирования магнитного пересоединения [A33], а также апробирована на данных спутника MMS [A34].

## 2. Динамические процессы в окрестности фронтов и сепаратрис магнитного пересоединения

В хвосте магнитосферы Земли регулярно наблюдаются быстрые потоки плазмы, совмещённые с усилениями волновой активности и флуктуациями параметров плазмы [23], [24], [25]. Существует большое количество работ, посвященных изучению отдельных событий, а также статистики в долговременных данных. Пристальное внимание к таким явлениям обусловлено тем, что именно посредством таких нестационарных событий происходит перенос большей части магнитного потока и плазмы внутри магнитного хвоста [26] с макроскопической точки зрения. Быстрый поток и окружающая плазма разделены тонкой границей, которая в разных источниках именуется фронтом диполизации или фронтом магнитного пересоединения. Толщина фронта составляет всего несколько сотен километров (порядка ионного гирорадиуса), при протяженности всего быстрого потока порядка 60000 км ( $\sim 10R_E$ , радиусов Земли) [27]. Фронт не является статичным разрывом на микромасштабе, а выступает в роли мощного ускорителя ионов и электронов [A9] и источника волн в магнитосфере. Вычисления и наблюдения показывают, что основное выделение энергии пересоединения происходит не в окрестности диффузионной области, а именно в области вытекания и на фронтах [A5], [A6], [A10], [A21].

Магнитное пересоединение способно объяснить структуру и параметры потоков в магнитосфере Земли [25]. В частности, скорость быстрого потока порядка характерной альвеновской скорости  $V_A$ ; в месте контакта быстрого потока с окружающей плазмой формируются фронты пересоединения, в приближении МГД имеющие вид ударных волн [28]; на фронте магнитного пересоединения возникает локальный пик магнитного поля и плотности. В работе [26] представлены одновременные наблюдения быстрых потоков в плазменном слое несколькими спутниками (расположенными как в ближнем хвосте, так и на расстоянии  $\sim 55 R_E$  от Земли). Наблюдения потоков плазмы как по направлению от Земли, так и к Земле на разных расстояниях соответствует модели магнитного пересоединения.

Резкие градиенты параметров плазмы на фронтах магнитного пересоединения способствуют развитию неустойчивостей от микро- до макромас-

штабов. В МГД и гибридном приближениях развивается неустойчивость типа Рэлея-Тейлора [29], [30], [31], [32]. В моделировании методом “частица-в-ячейке” на фронте пересоединения возникает кинетическая перестановочная неустойчивость (“VIC”) и ион-ионная мода [33], [34], [35], [36], а также нижнегибридная неустойчивость. Неустойчивости в нижнегибридной области спектра на фронте пересоединения были впервые описаны в трехмерном моделировании кодом iPIC3D в цикле работ соискателя и соавторов [A2], [A5], [A8], [A12]. В работах [A8], [A21], [A38] кинетическое моделирование было проведено посредством копирования результатов двумерной симуляции в третьем измерении. Использование такой методики позволило существенно уменьшить требуемые для расчёта вычислительные ресурсы.

Магнитные сепаратрисы являются поверхностью, которая проектируется в нейтральную линию и разделяет области втекания и вытекания. Сепаратрисы магнитного пересоединения очень динамичны [37], [38], при этом пересечение сепаратрис спутниками гораздо более частое событие (чем точное попадание в диффузионную область). Численные моделирования магнитного пересоединения в двух- и трёхмерном приближении показывают, что электронные пучки приводят к раскачке неустойчивости Бунемана и электронной моды Кельвина-Гельмгольца. Результаты этих вычислений отражены в работах [A3], [A13] и в более ранних работах соискателя [39], [40], [41], а также находят подтверждение в данных [A24], [A30], [A38]

### **3. Исследование магнитного пересоединения с холодными ионами**

Теоретическая задача о кинетическом магнитном пересоединении в многокомпонентной и многотемпературной плазме возникла при осмыслении спутниковых наблюдений в земной магнитосфере. В магнитосфере существует популяция холодных ионов ионосферного происхождения с энергиями в несколько эВ. Основная трудность в наблюдении такой популяции частиц заключается в наличии положительного потенциала у спутника, освещённого Солнцем. Чувствительность ионного спектрометра на спутнике CLUSTER к холодным ионам (с энергиями от 7 эВ) была улучшена с

помощью включения прибора ASPOC [42], который компенсирует ток фотоэлектронов и уменьшает плавающий потенциал спутника.

В работе [43] было подробно рассмотрено редкое пересечение спутником Geotail земной магнитосферы в тени Земли. Отсутствие фотоэлектронного тока приводит к кратковременному падению плавающего потенциала спутника до  $-300$  В. При таких событиях ионы ускоряются до потенциала спутника перед попаданием в спектрометр, что позволяет наблюдать даже самую низкотемпературную компоненту. Среди 97 затменных событий (при которых происходило пересечением токового слоя на расстояниях  $9-19 R_E$ ), холодная популяция наблюдалась в 10% - 50% случаев. В ряде событий плотность холодной компоненты сравнима с плотностью горячих ионов токового слоя, что оказывает влияние на магнитное пересоединение. Во-первых, наличие дополнительной фоновой компоненты увеличивает суммарную плотность плазмы и приводит к падению скорости магнитного пересоединения [44] вследствие уменьшения характерной скорости выброса плазмы (альвеновской скорости), что подтверждается численным моделированием [45], [46]. Данный эффект выражен особенно резко на магнитопаузе, где в область асимметричного магнитного пересоединения попадают тяжёлые ионы кислорода из плазмосферы Земли [47]. Во-вторых, наблюдения демонстрируют существенные различия в движении идентичных ионных компонент разной температуры. Было высказано предположение, что холодные ионы полностью замагничены при пересечении окрестности нейтральной линии [48]. Как следствие, ток холодных ионов должен частично компенсировать электронные холловские токи на сепаратрисах [49], [50], что показывается в работе [51] посредством как наблюдений, так и численного кинетического моделирования.

В ранних работах по наблюдению низкотемпературной компоненты плазмы в магнитосфере предполагалось, что такие ионы имеют относительно короткий гирорадиус и поэтому остаются замагниченными при пересечении сепаратрис. То есть, предполагалось, что холодные ионы могут проходить через область магнитного пересоединения без существенного ускорения [44].

Моделирование, проведенное соискателем, выявило ряд принципиально новых эффектов в окрестности нейтральной линии, создаваемых холод-

ными ионами [A20]. Во-первых, холодные ионы размагничиваются, испытывают ускорение и нагрев при попадании в область вытекания. Формируется отдельная диффузионная область, в которой размагничена холодная компонента плазмы. Размер этой области много больше гирорадиуса холодных ионов, но меньше характерных размеров области размагничивания горячих ионов. Во-вторых, скорость магнитного пересоединения и структура холловских полей практически не меняется при изменении температуры втекающей плазмы и зависит в основном от величины магнитного поля и суммарной плотности плазмы. Это подтверждает факт того, что при наличии плохо наблюдаемой холодной компоненты, скорость магнитного пересоединения будет ниже ожидаемой. В-третьих, нагрев проходит одинаково эффективно как для горячей, так и для холодной компонент.

Крупномасштабная динамика магнитного пересоединения с холодными ионами на магнитопаузе исследована в экспериментальных работах [A14], [A15], написанных соискателем в соавторстве. Подтверждается существование отдельной диффузионной области компоненты плазмы, которая вложена в более протяженную диффузионную область горячей компоненты. Наблюдения показывают, что втекающие холодные ионы нагреваются внутри диффузионной области, однако вдали от нейтральной линии они проникают в область вытекания без термализации и двигаются со скоростью  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейфа. В вычислительной работе [A36] было дано простое объяснение: холодные ионы могут попадать в область вытекания через дальние сепаратрисы, поскольку для ускорения требуется наличие как холловского электрического поля, так и электрического поля пересоединения. Комбинация ускорения электрическим полем пересоединения и холловским (перпендикулярным) электрическим полем формирует функции распределения типа полумесяцев на сепаратрисах [52], [53], [A42], что может быть использовано как основной признак наличия холодных ионов во втекающей плазме. Помимо данного результата, в работе [A36] продемонстрирована зависимость эффективности магнитного пересоединения от температуры плазмы вследствие зависимости скорости выброса плазмы от температуры [54].

Холодная плазма, истекающая из ионосферы, способна двигаться параллельно магнитному полю и обладать значительной скоростью. Влияние такого движения [55] заключается в смещении X-линии со средней скоро-

стью движения среды, приводя в конечном итоге к асимметрии областей вытекания. Примечательно, что при однородном течении плазмы скорость пересоединения не меняется, однако при наличии сдвига скорости она падает. Предельная величина этого сдвига порядка  $2V_A$  [56]. При ускорении холодных ионов электрическим полем магнитного пересоединения большую роль играет инерционное слагаемое в уравнении движения [57]. Похожий результат получен в работе [A36], что говорит о коллективном ускорении ионов, но не о нагреве (т.е. диффузии пучков в пространстве скоростей). Вычисления показывают формирование сложных структур в пространстве скоростей.

Как именно формируется тепловое распределение (и формируется ли вообще?) в процессе магнитного пересоединения является нерешённым в настоящее время вопросом. Предполагается, что основную роль в этом процессе играет взаимодействие волна-частица, которое приводит к трансформации отдельных ускоренных холодных пучков в распределение типа максвелловского. Спутники MMS подтверждают наличие волновой активности [58], [59] при наблюдениях ускоренных холодных пучков в окрестности магнитного пересоединения. Возбуждаются волны в нижне-гибридном диапазоне [60], [61], а также ионно-звуковые волны [60], [62], приводя к постепенному нагреву холодной ионной популяции [63]. Тем не менее, задача о механизмах термализации является крайне актуальной и она пока не решена однозначно ни в вычислениях, ни с помощью наблюдательных данных.

#### **4. Модель взаимодействия солнечного ветра с лунными магнитными аномалиями**

Большой и перспективной работой является создание полной кинетической модели всей магнитосферы. С конца XX века сделан ряд ранних работ, в которых приведены результаты моделирования в полностью кинетическом приближении [64], [65], [66], [67], [68]. Была в первую очередь продемонстрирована сама возможность применять метод частиц к проблеме численного моделирования всей магнитосферы. В работах качественно воспроизводятся основные магнитосферные структуры: формируется полость

в солнечном ветре и отошедшая ударная волна; в ближней магнитосфере присутствует кольцевой ток; в магнитном хвосте существует токовый слой и возникают отдельные события магнитного пересоединения. Типичным для метода частиц являлось использование существенно искусственных параметров, таких как отношение масс электронов к протонам ( $1/16$ ) и величины скорости солнечного ветра к скорости света ( $\sim 1/2$ ).

Глобальное численное исследование всей магнитосферы Земли посредством кинетических методов сопряжено с использованием колоссальных вычислительных мощностей. Даже в настоящее время, несмотря на быстрый рост доступных ресурсов, кинетические глобальные модели магнитосферы [69] являются большой редкостью и, как правило используют численные параметры, которые упрощают расчёт. Другие способы упростить вычисления, сохранив при этом научную сложность, заключаются в использовании двумерной модели (например, [70]), либо в ограничении расчёта какой-либо одной областью магнитосферы (ударная волна, переходный слой) [71], [72], либо в уменьшении магнитного момента диполя [73].

Магнитосфера относится к категории “больших” магнитосфер в том случае, если её характерный размер порядка или больше 20 ионных инерционных длин [74], [75]. С помощью кинетического моделирования методом “частица-в-ячейке” обнаружено [76], что магнитосферы меньшего масштаба демонстрируют качественные отличия от “больших” магнитосфер. Ударная волна исчезает, но мини-магнитосфера становится источником слабой стоячей свистовой волны (вистлер). Магнитное поле источника проникает в солнечный ветер [77], [78]. В таких режимах ионы размагничены на масштабах взаимодействия потока плазмы с магнитным полем, вследствие чего в динамике взаимодействия преобладает эффект Холла [78] [77] и ионные кинетические эффекты [73], [76].

В 1959 году советский спутник “Луна-2” пролетал в окрестностях Луны и не зафиксировал наличия магнитного поля. Дальнейшие исследования миссиями “Explorer-35” в 1967 г. и “Аполлон-12” в 1969 г. смогли обнаружить только отдельные участки повышенного магнитного поля (магнитные аномалии) вблизи поверхности [79], [80]. Локальные поля создаются не механизмом динамо, а породами, которые обладают постоянной намагниченностью. Трёхмерная картина распределения магнитного поля с высокой точностью

была создана значительно позднее по результатам наблюдения окололунного пространства спутниками “Лунар Проспектор” (NASA, 1998-1999) и “Селена” (JAXA, 2007-2009). Основные измерения проводились на высотах 10-70 км. Показано, что поля имеют иррегулярный характер и характерные размеры магнитных аномалий не превышают 200 км, что соответствует кинетическим масштабам ионов в солнечном ветре. На основании измерений построена эмпирическая модель магнитных аномалий Луны [81], [2]. Таким образом, создаваемые магнитными полями Луны возмущения в солнечном ветре по своим масштабам являются мини-магнитосферами.

Мини-магнитосферы считаются более удобной целью для исследования методом “частица-в-ячейке” по сравнению с классическими “большими” магнитосферами, поскольку желаемое разрешение по пространству и времени доступно даже с ограниченными вычислительными ресурсами. Крайне важно то, что мини-магнитосферы можно считать промежуточным объектом исследования на пути к полностью кинетическим расчетам всей магнитосферы Земли, а также тот факт, что для мини-магнитосфер доступны полностью трехмерные расчёты.

В написанных при непосредственном участии соискателя работах [A4], [A11], [A17], [A18], [A23], [A32], [A37], [A40] исследуются разнообразные кинетические эффекты в плазме в окрестности мини-магнитосфер и лунных магнитных аномалий. Соискателем выполнена адаптация кода iPIC3D к условиям задачи, а именно: добавлено внешнее поле магнитного диполя, проведена настройка граничных условий и подбор схемы нормализации. В работе [A4] впервые проведено численное моделирование магнитной аномалии в области Рейнер Гамма полностью кинетическим методом в предположении, что магнитный диполь ориентирован параллельно поверхности. Обнаружено, что при типичных условиях солнечного ветра формируется мини-магнитосфера высотой в  $\sim 10$  км, в которую солнечная плазма не проникает. Мини-магнитосфера окружена областью сильного электронного тока (“гало”), который, в свою очередь, и создаёт нормальное электрическое поле посредством эффекта Холла. Однако, электронный ток не экранирует полностью солнечный ветер от магнитного поля аномалии, как это происходит в “больших” магнитосферах. В результате суперпозиции магнитного

поля аномалии и солнечного ветра формируются магнитные нули без признаков активного магнитного пересоединения [A16].

Характер отклонения ионов определяется в основном динамическим давлением солнечного ветра и слабо зависит от величины межпланетного магнитного поля [A11], [A17]. При низком динамическом давлении магнитное поле аномалии защищает поверхность от солнечного ветра, что качественно соответствует наблюдениям энергичных нейтральных атомов (ENA), проведенных спутником Chandrayaan-1 [82]. Отражение также зависит от ориентации магнитного диполя относительно поверхности и направления движения солнечного ветра [A17], [A18]. В случае, когда магнитный момент направлен перпендикулярно к поверхности, формируется область магнитного каспа, которая эффективно отражает электроны солнечного ветра. В этом случае в функции распределения электронов присутствуют отдельные пучки, движущиеся параллельно магнитному полю, что также наблюдалось спутником “Селена” [83].

Большой интерес вызывает проблема так называемых “Лунных вихрей”. Эти образования представляют собой области с повышенным альбедо, имеющие нерегулярную сложную форму. Лунные вихри показывают большое разнообразие форм, от простых диффузных полос (область Декарта) до хорошо структурированных образований (область Рейнер Гамма). Существенный импульс к развитию этих моделей был дан, когда была обнаружена связь между лунными магнитными аномалиями и лунными вихрями [84]. Для более реалистичного моделирования динамики аномалий в кинетическом расчете [A23] впервые была добавлена эмпирическая модель магнитного поля [2] в вычислительный код iPIC3D. Была впервые с высокой точностью воспроизведена морфология области с повышенным альбедо. Чередование темных и ярких долей лунного вихря было объяснено сложной структурой магнитных полей, формирующих мини-магнитосферу. Эффект сохраняется и при усреднении условий в солнечном ветре за один лунный день [A32], принимая во внимание различное направление вектора скорости солнечного ветра, а также при учёте более тяжелых ионов гелия [A37].

## 5. Построение модели атмосферы слабой кометы

Ранние миссии к кометам (например, запущенные в 1986 году к комете Галлея аппараты Vega, Giotto, Сакигакэ) совершали единственный пролёт на большой скорости через кому, и, следовательно, не могли предоставить доскональную информацию о динамике атмосферы. В 2014-2016 гг. спутник ESA "Розетта" изучал комету 67P/Чурюмова-Герасименко, а именно: химический состав кометной атмосферы, плазменное окружение, пыль и газовые потоки с поверхности. Спутник длительное время сопровождал комету на близком расстоянии, что позволило получить большое количество новых уникальных данных о структуре и вариациях комы в различных режимах кометной активности [85].

С появлением современных высокопроизводительных суперкомпьютеров стало возможным крупномасштабное трёхмерное моделирование для объяснения и предсказания плазменного окружения комет. С 1990-х годов развивается трёхмерный подход в приближении сплошной среды применительно к проблеме структуры кометных атмосфер [86], [87], [88]. Также вычисления проводились с использованием гибридного описания плазмы [89], [90], [91], что, однако, не могло объяснить с удовлетворительной точностью наблюдаемые энергетические спектры электронов [92], [93].

Автором диссертации построена трёхмерная полностью кинетическая модель взаимодействия солнечного ветра с атмосферой слабой кометы 67P/-Чурюмова-Герасименко. Одним из основных параметров кометной активности является скорость дегазации, которая определяет интенсивность испарения кометного вещества и выражается в количестве частиц в секунду. На гелиоцентрическом расстоянии в 3 астрономические единицы (АЕ) скорость дегазации 67P составляла примерно  $\sim 10^{26} \text{ s}^{-1}$  [85]. На расстоянии 4.5 АЕ, соответственно,  $\sim 10^{25} \text{ s}^{-1}$ , что характерно для слабого режима кометы, и именно такие параметры используются в проведенных расчётах. Необходимо заметить, что на гелиоцентрических расстояниях менее 3 АЕ кометная атмосфера становится настолько плотной, что требуется учитывать эффекты столкновений между компонентами плазмы и нейтральным газом [94].

Техническая часть работы соискателя заключалась в адаптации кода к условиям задачи, проведении вычислений и построении математической модели процесса. На каждом шаге по времени солнечный ветер нагружается ионами воды  $H_2O^+$  и электронами [A22], [A26]. Ионы воды немагничены на масштабах вычислительной области, поэтому они ускоряются баллистически электрическим полем солнечного ветра. В то же время, электроны замагничены и привязаны к силовым линиям магнитного поля. Для выполнения условия квазинейтральности происходит формирование амбиполярного потенциала, который захватывает электроны кометного происхождения и ускоряет электроны солнечного ветра параллельно магнитному полю [A29]. В хорошем соответствии с экспериментом [95], [93] наблюдается отдельная очень динамичная популяция сверх-тепловых электронов с энергиями 20-100 эВ [A31], [A39],двигающихся параллельно магнитному полю.

## 6. Неустойчивость двойного градиента (флэппинг-неустойчивость)

Флэппинг (flapping) является крупномасштабным возмущением токового слоя хвоста магнитосферы. Впервые наблюдения таких волн с помощью спутников Cluster были описаны в работах [96], [97], [98]. Они представляют собой медленные (на порядок меньше типичной альвеновской скорости  $V_A$ ) волны, распространяющиеся в токовом слое с характерной скоростью 20–60 км/с, амплитудой 1–2  $R_E$  и квазипериодом 2–10 минут.

Было предложено несколько теоретических подходов для описания флэппинг-осцилляций хвоста магнитосферы в кинетическом приближении. В ряде работ [99], [100] описывают дрейфовую изгибающую неустойчивость токового слоя типа Харриса. Также, хорошо понятно [101], [102], [103] влияние фоновой стационарной плазмы и более сложной структуры токового слоя и показано существование более быстрой ионно-ионной дрейфовой неустойчивости. Флэппинг-осцилляции также интерпретируются как неустойчивость типа Кельвина-Гельмгольца, вызванная градиентом токовой скорости [104]. В указанных работах рассматривались тонкие токовые слои без нормальной

компоненты магнитного поля, что накладывало ограничения на применимость результатов к магнитосфере Земли.

В приближении МГД были разработаны модели, описывающие основные свойства флэппинг-осцилляции с учётом нормальной компоненты магнитного поля. При наличии конечной кривизны магнитных силовых линий [105] возбуждается баллонная неустойчивость. Радиус кривизны при этом должен больше, чем длина волны флэппинг-осцилляций. В работе [106] разработана так называемая модель двойного градиента в МГД приближении. Была проведена детальная идентификация осцилляций хвоста [107] с использованием данных нескольких спутников THEMIS. Было показано, что характер наблюдаемого вращения вектора скорости хорошо совпадает с теоретическими параметрами, однако существование нескольких возможных источников волн или присутствие шума сильно затрудняли идентификацию волны.

В работе соискателя [A1] была построена трехмерная численная модель неустойчивости двойного градиента в МГД приближении. В качестве фона был взят токовый слой с нормальной компонентой, растущей от Земли. Теория предсказывает существование неустойчивых решений в такой конфигурации, что также было подтверждено расчётами линеаризованной моделью. В следующих работах результаты были обобщены для случаев более реалистичных токовых слоёв [A7], [A28]. Рассмотрены варианты с токовым слоем, содержащим ведущее магнитное поле [A7] и обнаружено, что даже его незначительная величина ( $\sim 10\%$  от магнитного поля в долях) подавляет часть спектра с длинами волн меньше, чем характерная толщина токового слоя. В работе [A28] в качестве начального состояния взят изогнутый токовый слой и показано, что в таком слое неустойчивость развивается даже с нормальной компонентой  $B_z$ , убывающей в хвост. Изогнутый токовый слой оказывается более неустойчив по отношению к флэппинг-неустойчивости, что может иметь критическое значение для срыва магнитосферной суббури.

## Основные положения, выносимые на защиту

Получены новые результаты для ряда актуальных для физики космической плазмы задач, для которых всестороннее изучение процесса возможно только посредством численного моделирования и где основную роль играет бесстолкновительная динамика плазмы:

1. Построена модель электронной диффузионной области [13], [14], в которой учитывается анизотропия электронного давления в области втекания [A19]. Установлено, что скорость пересоединения, основного взрывного процесса в космической плазме, в кинетическом режиме не является константой  $\sim 0.1$ , а имеет слабую (но хорошо заметную) зависимость от внешних параметров [A24], [A27]. В сотрудничестве с зарубежными коллегами создана аналитическая модель электронной диффузионной области [A33, A34], [108], [109], которая успешно апробирована на спутниковых данных [A34].

2. Впервые проведено кинетическое численное моделирование магнитного пересоединения в присутствии холодных ионов. Создана модель диффузионной области в многотемпературной плазме, а также опровергнуто существовавшее ранее предположение, что холодные ионы тормозят процесс магнитного пересоединения [A20], [A42], [A36], [A41]. Холодные ионы ускоряются посредством электрического поля пересоединения [A20], ускоряются на сепаратрисах [A14], [A15], [A36], а также нагреваются волнами [A15], [A41], [A42].

3. Посредством кинетического моделирования и данных спутника Cluster изучена динамика фронтов [110], [A2], [A3], [A5], [A12], [A16] и сепаратрис магнитного пересоединения [A13], [A24], [A30]. Показано существование нагрева [A8] и диффузии электронов [A38] за счет нижнегибридной волновой активности. Изучены механизмы преобразования энергии на фронте [A5], [A9], [A13], [A21], [A25]. В сотрудничестве с зарубежными коллегами расчёт эффектов нижнегибридной волновой активности апробирован на данных спутника MMS [A38].

4. Исследовано взаимодействие солнечного ветра с атмосферой слабой кометы 67P/Чурюмова-Герасименко на расстоянии 3-4 астрономических единиц от Солнца. Впервые создана численная модель плазменно-

го окружения [A22], [A26], [A39]. Продемонстрирован механизм ускорения сверх-тепловых электронов амбиполярным электрическим полем [A29], что позволило элегантно объяснить интенсивность наблюдаемых потоков энергичных электронов спутником Rosetta [A31], [A39], [93], [95].

5. В сотрудничестве с зарубежными коллегами исследовано высыпание частиц солнечного ветра на области локальных магнитных полей на поверхности Луны посредством численного моделирования. Доказано существование мини-магнитофер размером в несколько километров (областей, куда не проникает солнечный ветер) [A4], [A11], [A16], [A17], [A18]. Формирование мини-магнитосфер и отражение от них ионов подтверждается в лабораторном эксперименте [A40]. Впервые построена численная модель лунной магнитной аномалии Рейнер Гамма с использованием эмпирического магнитного поля Луны [2] и доказано формирование лунного вихря на поверхности под действием космического выветривания [A23], [A32], [A37]. Показано, что мини-магнитосферы предоставляют защиту от постоянного воздействия солнечного ветра в течение всех лунных суток, в том числе и при прохождении Лунной магнитосферы Земли [A32]. Результаты численного моделирования апробированы на данных спутника Chandrayaan-1 [A23].

6. Трехмерное МГД моделирование использовано для изучения линейной и нелинейной стадии неустойчивости двойного градиента (“флэппинг”-неустойчивости) хвоста магнитосферы Земли [A1], формирующей динамику токового слоя магнитосферы Земли и влияющую на срыв взрывного процесса магнитосферной суббури. Модель расширена на случай наличия ведущего поля [A7] и искривленного начального токового слоя хвоста магнитосферы [A28]. Показано, что искривление токового слоя является критическим параметром магнитосферного хвоста, приводящим к срыву суббури.

## Список работ соискателя

A1. Korovinskiy, D. B., **Divin, A.**, Erkaev, N. V., Ivanova, V. V., Ivanov, I. B., Semenov, V. S., Lapenta, G., Markidis, S., Biernat, H. K. & Zellinger, M. MHD modeling of the double-gradient (kink) magnetic instability. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 118, 1146–1158. doi:10.1002/jgra.50206 (Mar. 2013).

A2. Vapirev, A. E., Lapenta, G., **Divin, A.**, Markidis, S., Henri, P., Goldman, M. & Newman, D. Formation of a transient front structure near reconnection point in 3-D PIC simulations. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 118, 1435–1449. doi:10.1002/jgra.50136 (Apr. 2013).

A3. Markidis, S., Henri, P., Lapenta, G., **Divin, A.**, Goldman, M., Newman, D. & Laure, E. Kinetic simulations of plasmoid chain dynamics. *Physics of Plasmas* 20, 082105. doi:10.1063/1.4817286. arXiv: 1306.1050 [physics.plasm-ph] (Aug. 2013).

A4. Deca, J., **Divin, A.**, Lapenta, G., Lembège, B., Markidis, S. & Horányi, M. Electromagnetic Particle-in-Cell Simulations of the Solar Wind Interaction with Lunar Magnetic Anomalies. *Physical Review Letters* 112, 151102. doi:10.1103/PhysRevLett.112.151102 (Apr. 2014).

A5. Lapenta, G., Goldman, M., Newman, D., Markidis, S. & **Divin, A.** Electromagnetic energy conversion in downstream fronts from three dimensional kinetic reconnection). *Physics of Plasmas* 21, 055702. doi:10.1063/1.4872028. arXiv: 1402.0082 [physics.plasm-ph] (May 2014).

A6. Olshevsky, V., Lapenta, G., Markidis, S. & **Divin, A.** Role of Z-pinches in magnetic reconnection in space plasmas. *Journal of Plasma Physics* 81, 325810105. doi:10.1017/S0022377814000725. arXiv: 1509 . 07962 [physics.space-ph] (Jan. 2015).

A7. Korovinskiy, D. B., **Divin, A. V.**, Erkaev, N. V., Semenov, V. S., Artemyev, A. V., Ivanova, V. V., Ivanov, I. B., Lapenta, G., Markidis, S. & Biernat, H. K. The double-gradient magnetic instability: Stabilizing effect of the guide field. *Physics of Plasmas* 22, 012904. doi:10.1063/1.4905706 (Jan. 2015).

A8. **Divin, A.**, Khotyaintsev, Y. V., Vaivads, A., André, M., Markidis, S. & Lapenta, G. Evolution of the lower hybrid drift instability at reconnection

jet front. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120, 2675–2690. doi:10.1002/2014JA020503 (Apr. 2015).

A9. Peng, I. B., Vencels, J., Lapenta, G., **Divin, A.**, Vaivads, A., Laure, E. & Markidis, S. Energetic particles in magnetotail reconnection. *Journal of Plasma Physics* 81, 325810202. doi:10.1017/S0022377814001123 (Apr. 2015).

A10. Olshevsky, V., **Divin, A.**, Eriksson, E., Markidis, S. & Lapenta, G. Energy Dissipation in Magnetic Null Points at Kinetic Scales. *The Astrophysical Journal* 807, 155. doi:10.1088/0004-637X/807/2/155. arXiv: 1509.07961 [astro-ph.EP] (Jul. 2015).

A11. Deca, J., **Divin, A.**, Lembège, B., Horányi, M., Markidis, S. & Lapenta, G. General mechanism and dynamics of the solar wind interaction with lunar magnetic anomalies from 3-D particle-in-cell simulations. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120, 6443–6463. doi:10.1002/2015JA021070 (Aug. 2015).

A12. **Divin, A.**, Khotyaintsev, Y. V., Vaivads, A. & André, M. Lower hybrid drift instability at a dipolarization front. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120, 1124–1132. doi:10.1002/2014JA020528 (Feb. 2015).

A13. Lapenta, G., Markidis, S., **Divin, A.**, Newman, D. & Goldman, M. Separatrices: The crux of reconnection. *Journal of Plasma Physics* 81, 325810109. doi:10.1017/S0022377814000944. arXiv: 1406.6141 [physics.plasm-ph] (Jan. 2015).

A14. Toledo-Redondo, S., André, M., Vaivads, A., Khotyaintsev, Y. V., Lavraud, B., Graham, D. B., **Divin, A.** & Aunai, N. Cold ion heating at the dayside magnetopause during magnetic reconnection. *Geophysical Research Letters* 43, 58–66. doi:10.1002/2015GL067187 (Jan. 2016).

A15. Toledo-Redondo, S., André, M., Khotyaintsev, Y. V., Vaivads, A., Walsh, A., Li, W., Graham, D. B., Lavraud, B., Masson, A., Aunai, N., **Divin, A.**, Dargent, J., Fuselier, S., Gershman, D. J., Dorelli, J., Giles, B., Avanov, L., Pollock, C., Saito, Y., Moore, T. E., Coffey, V., Chandler, M. O., Lindqvist, P.-A., Torbert, R. & Russell, C. T. Cold ion demagnetization near the X-line of magnetic reconnection. *Geophysical Research Letters* 43, 6759–6767. doi:10.1002/2016GL069877 (Jul. 2016).

A16. Olshevsky, V., Deca, J., **Divin, A.**, Peng, I. B., Markidis, S., Innocenti, M. E., Cazzola, E. & Lapenta, G. Magnetic Null Points in

Kinetic Simulations of Space Plasmas. *The Astrophysical Journal* 819, 52. doi:10.3847/0004-637X/819/1/52. arXiv: 1512.02018 [physics.space-ph] (Mar. 2016).

A17. Deca, J., **Divin, A.**, Wang, X., Lembège, B., Markidis, S., Horányi, M. & Lapenta, G. Three-dimensional full-kinetic simulation of the solar wind interaction with a vertical dipolar lunar magnetic anomaly. *Geophysical Research Letters* 43, 4136–4144. doi:10.1002/2016GL068535 (May 2016).

A18. Deca, J. & **Divin, A.** Reflected Charged Particle Populations around Dipolar Lunar Magnetic Anomalies. *The Astrophysical Journal* 829, 60. doi:10.3847/0004-637X/829/2/60 (Oct. 2016).

A19. **Divin, A.**, Semenov, V., Korovinskiy, D., Markidis, S., Deca, J., Olshevsky, V. & Lapenta, G. A new model for the electron pressure nongyrotropy in the outer electron diffusion region. *Geophysical Research Letters* 43, 10, 565–10, 573. doi:10.1002/2016GL070763 (Oct. 2016).

A20. **Divin, A.**, Khotyaintsev, Y. V., Vaivads, A., André, M., Toledo-Redondo, S., Markidis, S. & Lapenta, G. Three-scale structure of diffusion region in the presence of cold ions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 121, 12, 001–12, 013. doi:10.1002/2016JA023606 (Dec. 2016).

A21. Khotyaintsev, Y. V., **Divin, A.**, Vaivads, A., André, M. & Markidis, S. Energy conversion at dipolarization fronts. *Geophysical Research Letters* 44, 1234–1242. doi:10.1002/2016GL071909 (Feb. 2017).

A22. Deca, J., **Divin, A.**, Henri, P., Eriksson, A., Markidis, S., Olshevsky, V. & Horányi, M. Electron and Ion Dynamics of the Solar Wind Interaction with a Weakly Outgassing Comet. *Physical Review Letters* 118, 205101. doi:10.1103/PhysRevLett.118.205101 (May 2017).

A23. Deca, J., **Divin, A.**, Lue, C., Ahmadi, T. & Horányi, M. Reiner Gamma albedo features reproduced by modeling solar wind standoff. *Communications Physics* 1, 12. doi:10.1038/s42005-018-0012-9 (Apr. 2018).

A24. Eriksson, E., Vaivads, A., Graham, D. B., **Divin, A.**, Khotyaintsev, Y. V., Yordanova, E., André, M., Giles, B. L., Pollock, C. J., Russell, C. T., Contel, O. L., Torbert, R. B., Ergun, R. E., Lindqvist, P.-A. & Burch, J. L. Electron Energization at a Reconnecting Magnetosheath Current Sheet. *Geophysical Research Letters* 45, 8081–8090. doi:10.1029/2018GL078660 (Aug. 2018).

A25. Liu, C. M., Fu, H. S., Cao, D., Xu, Y. & **Divin, A.** Detection of Magnetic Nulls around Reconnection Fronts. *The Astrophysical Journal* 860, 128. doi:10.3847/1538-4357/aac496 (Jun. 2018).

A26. Deca, J., Henri, P., **Divin, A.**, Eriksson, A., Galand, M., Beth, A., Ostaszewski, K. & Horányi, M. Building a Weakly Outgassing Comet from a Generalized Ohm's Law. *Physical Review Letters* 123, 055101. doi:10.1103/PhysRevLett.123.055101 (Aug. 2019).

A27. **Divin, A.**, Semenov, V., Zaitsev, I., Korovinskiy, D., Deca, J., Lapenta, G., Olshevsky, V. & Markidis, S. Inner and outer electron diffusion region of antiparallel collisionless reconnection: Density dependence. *Physics of Plasmas* 26, 102305. doi:10.1063/1.5109368 (Oct. 2019).

A28. Korovinskiy, D. B., **Divin, A. V.**, Semenov, V. S., Erkaev, N. V., Ivanov, I. B., Kiehas, S. A. & Markidis, S. The transition from “double-gradient” to ballooning unstable mode in bent magnetotail-like current sheet. *Physics of Plasmas* 26, 102901. doi:10.1063/1.5119096 (Oct. 2019).

A29. Sishtla, C. P., **Divin, A.**, Deca, J., Olshevsky, V. & Markidis, S. Electron trapping in the coma of a weakly outgassing comet. *Physics of Plasmas* 26, 102904. doi:10.1063/1.5115456 (Oct. 2019).

A30. Khotyaintsev, Y. V., Graham, D. B., Steinvall, K., Alm, L., Vaivads, A., Johlander, A., Norgren, C., Li, W., **Divin, A.**, Fu, H. S., Hwang, K. -J., Burch, J. L., Ahmadi, N., Le Contel, O., Gershman, D. J., Russell, C. T. & Torbert, R. B. Electron Heating by Debye-Scale Turbulence in Guide-Field Reconnection. *Physical Review Letters* 124, 045101. doi:10.1103/PhysRevLett.124.045101. arXiv: 1908.09724 [physics.space-ph] (Jan. 2020).

A31. **Divin, A.**, Deca, J., Eriksson, A., Henri, P., Lapenta, G., Olshevsky, V. & Markidis, S. A Fully Kinetic Perspective of Electron Acceleration around a Weakly Outgassing Comet. *The Astrophysical Journal Letters* 889:L33. doi:10.3847/2041-8213/ab6662 (Feb. 2020).

A32. Deca, J., Hemingway, D. J., **Divin, A.**, Lue, C., Poppe, A. R., Garrick-Bethell, I., Lembège, B. & Horányi, M. Simulating the Reiner Gamma Swirl: The Long Term Effect of Solar Wind Standoff. *Journal of Geophysical Research (Planets)* 125, e06219. doi:10.1029/2019JE006219 (May 2020).

A33. Korovinskiy, D. B., **Divin, A. V.**, Semenov, V. S., Erkaev, N. V., Kiehas, S. A. & Kubyshkin, I. V. Grad-Shafranov reconstruction of the magnetic configuration in the reconnection X-point vicinity in compressible plasma. *Physics of Plasmas* 27, 082905. doi:10.1063/5.0015240 (Aug. 2020).

A34. Korovinskiy, D. B., Kiehas, S. A., Panov, E. V., Semenov, V. S., Erkaev, N. V., **Divin, A. V.** & Kubyshkin, I. V. The Inertia Based Model for Reconstruction of the Electron Diffusion Region. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 126, e29045. doi:10.1029/2020JA029045 (May 2021).

A35. Olshevsky, V., Khotyaintsev, Y. V., Lalti, A., **Divin, A.**, Delzanno, G. L., Anderzén, S., Herman, P., Chien, S. W. D., Avakov, L., Dimmock, A. P. & Markidis, S. Automated Classification of Plasma Regions Using 3D Particle Energy Distributions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 126, e29620. doi:10.1029/2021JA029620. arXiv: 1908.05715 [physics.space-ph] (Oct. 2021).

A36. Zaitsev, I., **Divin, A.**, Semenov, V., Kubyshkin, I., Korovinskiy, D., Deca, J., Khotyaintsev, Y. & Markidis, S. Cold ion energization at separatrices during magnetic reconnection. *Physics of Plasmas* 28, 032104. doi:10.1063/5.0008118 (Mar 2021).

A37. Deca, J., Poppe, A. R., **Divin, A.** & Lembège, B. The Plasma Environment Surrounding the Reiner Gamma Magnetic Anomaly. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 126, e29180. doi:10.1029/2021JA029180 (Sept. 2021).

A38. Graham, D. B., Khotyaintsev, Y. V., André, M., Vaivads, A., **Divin, A.**, Drake, J. F., Norgren, C., Le Contel, O., Lindqvist, P. -A., Rager, A. C., Gershman, D. J., Russell, C. T., Burch, J. L., Hwang, K. -J. & Dokgo, K. Direct observations of anomalous resistivity and diffusion in collisionless plasma. *Nature Communications* 13, 2954. doi:10.1038/s41467-022-30561-8 (May 2022).

A39. Goetz, C., Behar, E., Beth, A., Bodewits, D., Bromley, S., Burch, J., Deca, J., **Divin, A.**, Eriksson, A. I., Feldman, P. D., Galand, M., Gunell, H., Henri, P., Heritier, K., Jones, G. H., Mandt, K. E., Nilsson, H., Noonan, J. W., Odelstad, E., Parker, J. W., Rubin, M., Simon Wedlund, C., Stephenson, P., Taylor, M. G. G. T., Vignen, E., Vines, S. K. & Volwerk, M. The Plasma Environment of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Space Science Reviews* 218, 65. doi:10.1007/s11214-022-00931-1 (Dec. 2022).

A40. Rumenskikh, M. C., Chibrarov, A. A., Efimov, M. A., Berezutsky, A. G., Posukh, V. G., Zakharov, Y. P., Boyarintsev, E. L., Miroshnichenko, I. B., Trushin, P. A., **Divin, A. V.** & Shaikhislamov, I. F. Laboratory Modelling of Solar Wind Interaction with Lunar Magnetic Anomalies. *Astronomy Reports* 67, 78–85. doi:10.1134/S1063772923010079. arXiv: 2208 . 10566 [physics.plasm-ph] (Jan. 2023).

A41. Dargent, J., Toledo-Redondo, S., **Divin, A.** & Innocenti, M. E. Energy Conversion by Magnetic Reconnection in Multiple Ion Temperature Plasmas. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103324. doi:10.1029/2023GL103324 (Jun. 2023).

A42. **Divin, A.**, Zaitsev, I., Paramonik, I., Semenov, V., Korovinskiy, D., Mao, A., Dargent, J. P., Toledo-Redondo, S. & Deca, J. Cold ion crescent echoes in the exhaust of symmetric magnetic reconnection. *Physics of Plasmas* 30, 062901. doi:10.1063/5.0155958 (Jun 2023).

## Список литературы

1. Markidis, S. & Lapenta, G. Multi-scale simulations of plasma with iPIC3D. *Mathematics and Computers in Simulation* **80**, 1509–1519 (2010).
2. Tsunakawa, H., Takahashi, F., Shimizu, H., Shibuya, H. & Matsushima, M. Surface vector mapping of magnetic anomalies over the Moon using Kaguya and Lunar Prospector observations. *Journal of Geophysical Research: Planets* **120**, 1160–1185 (2015).
3. Sweet, P. The production of high energy particles in solar flares. *Il Nuovo Cimento (1955-1965)* **8**, 188–196. doi:[10.1007/BF02962520](https://doi.org/10.1007/BF02962520) (1958).
4. Parker, E. N. The Solar-Flare Phenomenon and the Theory of Reconnection and Annihilation of Magnetic Fields. *Astrophysical Journal Supplement* **8**, 177. doi:[10.1086/190087](https://doi.org/10.1086/190087) (1963).
5. Petschek, H. E. Magnetic Field Annihilation. *NASA Special Publication* **50**, 425 (1964).
6. Priest, E. & Forbes, T. *Magnetic Reconnection* (2007).
7. Vasyliunas, V. M. Theoretical Models of Magnetic Field Line Merging, 1. *Reviews of Geophysics* **13**, 303–336. doi:[10.1029/RG013i001p00303](https://doi.org/10.1029/RG013i001p00303) (1975).
8. Birn, J., Drake, J., Shay, M., Rogers, B., Denton, R., Hesse, M., Kuznetsova, M., Ma, Z., Bhattacharjee, A. & Otto, A. Geospace Environmental Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **106**, 3715–3719 (2001).
9. Kuznetsova, M. M., Hesse, M. & Winske, D. Kinetic quasi-viscous and bulk flow inertia effects in collisionless magnetotail reconnection. *J. Geophys. Res.* **103**, 199–214. doi:[10.1029/97JA02699](https://doi.org/10.1029/97JA02699) (1998).
10. Hesse, M. & Winske, D. Electron dissipation in collisionless magnetic reconnection. *J. Geophys. Res.* **103**, 26479–26486. doi:[10.1029/98JA01570](https://doi.org/10.1029/98JA01570) (1998).
11. Egedal, J., Øieroset, M., Fox, W. & Lin, R. In situ discovery of an electrostatic potential, trapping electrons and mediating fast reconnection in the Earth's magnetotail. *Physical review letters* **94**, 025006 (2005).

12. Egedal, J., Fox, W., Katz, N., Porkolab, M., Øieroset, M., Lin, R., Daughton, W. & Drake, J. Evidence and theory for trapped electrons in guide field magnetotail reconnection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **113** (2008).
13. Divin, A., Markidis, S., Lapenta, G., Semenov, V., Erkaev, N. & Biernat, H. Model of electron pressure anisotropy in the electron diffusion region of collisionless magnetic reconnection. *Physics of plasmas* **17**, 122102 (2010).
14. Divin, A., Lapenta, G., Markidis, S., Semenov, V., Erkaev, N., Korovinskiy, D. & Biernat, H. Scaling of the inner electron diffusion region in collisionless magnetic reconnection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **117** (2012).
15. Hesse, M., Aunai, N., Sibeck, D. & Birn, J. On the electron diffusion region in planar, asymmetric, systems. *Geophysical Research Letters* **41**, 8673–8680 (2014).
16. Shay, M., Phan, T., Haggerty, C., Fujimoto, M., Drake, J., Malakit, K., Cassak, P. & Swisdak, M. Kinetic signatures of the region surrounding the X line in asymmetric (magnetopause) reconnection. *Geophysical Research Letters* **43**, 4145–4154 (2016).
17. Egedal, J., Le, A., Daughton, W., Wetherton, B., Cassak, P., Chen, L.-J., Lavraud, B., Torbert, R., Dorelli, J. & Gershman, D. Spacecraft observations and analytic theory of crescent-shaped electron distributions in asymmetric magnetic reconnection. *Physical review letters* **117**, 185101 (2016).
18. Norgren, C., Graham, D. B., Khotyaintsev, Y. V., André, M., Vaivads, A., Chen, L. -J., Lindqvist, P. -A., Marklund, G. T., Ergun, R. E., Magnes, W., Strangeway, R. J., Russell, C. T., Torbert, R. B., Paterson, W. R., Gershman, D. J., Dorelli, J. C., Avanov, L. A., Lavraud, B., Saito, Y., Giles, B. L., Pollock, C. J. & Burch, J. L. Finite gyroradius effects in the electron outflow of asymmetric magnetic reconnection. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 6724–6733. doi:[10.1002/2016GL069205](https://doi.org/10.1002/2016GL069205) (2016).
19. Karimabadi, H., Daughton, W. & Scudder, J. Multi-scale structure of the electron diffusion region. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L13104. doi:[10.1029/2007GL030306](https://doi.org/10.1029/2007GL030306) (2007).

20. Swisdak, M. Quantifying gyrotropy in magnetic reconnection. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 43–49. doi:[10.1002 / 2015GL066980](https://doi.org/10.1002/2015GL066980). arXiv: [1509.00787](https://arxiv.org/abs/1509.00787) [[physics.space-ph](https://arxiv.org/archive/physics)] (2016).
21. Aunai, N., Hesse, M. & Kuznetsova, M. Electron nongyrotropy in the context of collisionless magnetic reconnection. *Physics of Plasmas (1994-present)* **20**, 092903 (2013).
22. Li, X. & Liu, Y.-H. The Effect of Thermal Pressure on Collisionless Magnetic Reconnection Rate. *The Astrophysical Journal* **912**, 152 (2021).
23. Angelopoulos, V., Baumjohann, W., Kennel, C. F., Coronti, F. V., Kivelson, M. G., Pellat, R., Walker, R. J., Luehr, H. & Paschmann, G. Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet. *J. Geophys. Res.* **97**, 4027–4039. doi:[10.1029/91JA02701](https://doi.org/10.1029/91JA02701) (1992).
24. Angelopoulos, V. Statistical characteristics of bursty bulk flow events. *J. Geophys. Res.* **99**, 21257. doi:[10.1029/94JA01263](https://doi.org/10.1029/94JA01263) (1994).
25. Ohtani, S.-i., Shay, M. A. & Mukai, T. Temporal structure of the fast convective flow in the plasma sheet: Comparison between observations and two-fluid simulations. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **109**, 3210–+. doi:[10.1029/2003JA010002](https://doi.org/10.1029/2003JA010002) (2004).
26. Angelopoulos, V., Runov, A., Zhou, X.-Z., Turner, D., Kiehas, S., Li, S.-S. & Shinohara, I. Electromagnetic energy conversion at reconnection fronts. *science* **341**, 1478–1482 (2013).
27. Runov, A., Angelopoulos, V., Sitnov, M. I., Sergeev, V. A., Bonnell, J., McFadden, J. P., Larson, D., Glassmeier, K.-H. & Auster, U. THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front. *Geophys. Res. Lett.* **36**, 14106. doi:[10.1029/2009GL038980](https://doi.org/10.1029/2009GL038980) (2009).
28. Heyn, M. F. & Semenov, V. S. Rapid reconnection in compressible plasma. *Physics of Plasmas* **3**, 2725–2741 (1996).
29. Nakamura, M. S., Matsumoto, H. & Fujimoto, M. Interchange instability at the leading part of reconnection jets. *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1247. doi:[10.1029/2001GL013780](https://doi.org/10.1029/2001GL013780) (2002).

30. TanDokoro, R. & Fujimoto, M. Three-dimensional MHD simulation study of the structure at the leading part of a reconnection jet. *Geophys. Res. Lett.* **32**, 23102. doi:[10.1029/2005GL024467](https://doi.org/10.1029/2005GL024467) (2005).
31. Guzdar, P. N., Hassam, A. B., Swisdak, M. & Sitnov, M. I. A simple MHD model for the formation of multiple dipolarization fronts. *Geophys. Res. Lett.* **37**, 20102. doi:[10.1029/2010GL045017](https://doi.org/10.1029/2010GL045017) (2010).
32. Lapenta, G. & Bettarini, L. Self-consistent seeding of the interchange instability in dipolarization fronts. *Geophys. Res. Lett.* **38**, 11102. doi:[10.1029/2011GL047742](https://doi.org/10.1029/2011GL047742). arXiv: [1105.0485](https://arxiv.org/abs/1105.0485) [[astro-ph](https://arxiv.org/archive/astro-ph).EP] (2011).
33. Pritchett, P. L. & Coroniti, F. V. A kinetic ballooning/interchange instability in the magnetotail. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **115**, 6301. doi:[10.1029/2009JA014752](https://doi.org/10.1029/2009JA014752) (2010).
34. Pritchett, P. L. & Coroniti, F. V. Plasma sheet disruption by interchange-generated flow intrusions. *Geophys. Res. Lett.* **381**, 10102. doi:[10.1029/2011GL047527](https://doi.org/10.1029/2011GL047527) (2011).
35. Pritchett, P. L. Structure of exhaust jets produced by magnetic reconnection localized in the out-of-plane direction. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **120**, 592–608. doi:[10.1002/2014JA020795](https://doi.org/10.1002/2014JA020795) (2015).
36. Nakamura, T., Nakamura, R. & Hasegawa, H. Three-dimensional development of front region of plasma jets generated by magnetic reconnection. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 8356–8364. doi:[10.1002/2016GL070215](https://doi.org/10.1002/2016GL070215) (2016).
37. Nagai, T., Shinohara, I., Fujimoto, M., Machida, S., Nakamura, R., Saito, Y. & Mukai, T. Structure of the Hall current system in the vicinity of the magnetic reconnection site. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **108**, 1357. doi:[10.1029/2003JA009900](https://doi.org/10.1029/2003JA009900) (2003).
38. Sergeev, V. A., Apatenkov, S. V., Nakamura, R., Plaschke, F., Baumjohann, W., Panov, E. V., Kubyshkin, I. V., Khotyaintsev, Y., Burch, J. L., Giles, B. L., Russell, C. T. & Torbert, R. B. MMS Observations of Reconnection Separatrix Region in the Magnetotail at Different Distances From the Active Neutral X-Line. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **126**, e28694. doi:[10.1029/2020JA028694](https://doi.org/10.1029/2020JA028694) (2021).

39. Lapenta, G., Markidis, S., Divin, A., Goldman, M. & Newman, D. Scales of guide field reconnection at the hydrogen mass ratio. *Physics of Plasmas* **17**, 082106. doi:[10.1063/1.3467503](https://doi.org/10.1063/1.3467503) (2010).
40. Lapenta, G., Markidis, S., Divin, A., Goldman, M. V. & Newman, D. L. Bipolar electric field signatures of reconnection separatrixes for a hydrogen plasma at realistic guide fields. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L17104. doi:[10.1029/2011GL048572](https://doi.org/10.1029/2011GL048572). arXiv: [1108.2492](https://arxiv.org/abs/1108.2492) [[physics.plasm-ph](https://arxiv.org/archive/physics)] (2011).
41. Divin, A., Lapenta, G., Markidis, S., Newman, D. & Goldman, M. Numerical simulations of separatrix instabilities in collisionless magnetic reconnection. *Physics of Plasmas* **19**, 042110 (2012).
42. Torkar, K., Riedler, W., Escoubet, C. P., Fehringer, M., Schmidt, R., Grard, R. J. L., Arends, H., Rüdener, F., Steiger, W., Narheim, B. T., Svenes, K., Torbert, R., André, M., Fazakerley, A., Goldstein, R., Olsen, R. C., Pedersen, A., Whipple, E. & Zhao, H. Active spacecraft potential control for Cluster implementation and first results. *Annales Geophysicae* **19**, 1289–1302. doi:[10.5194/angeo-19-1289-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1289-2001) (2001).
43. Seki, K., Hirahara, M., Hoshino, M., Terasawa, T., Elphic, R. C., Saito, Y., Mukai, T., Hayakawa, H., Kojima, H. & Matsumoto, H. Cold ions in the hot plasma sheet of Earth's magnetotail. *Nature* **422**, 589–592. doi:[10.1038/nature01502](https://doi.org/10.1038/nature01502) (2003).
44. André, M. & Cully, C. M. Low-energy ions: A previously hidden solar system particle population. *Geophysical Research Letters* **39** (2012).
45. Mao, A. & Wang, Z. Multiple ion temperature effects on collisionless magnetic reconnection. *AIP Advances* **11**, 025316 (2021).
46. Spinnangr, S. F., Hesse, M., Tenfjord, P., Norgren, C., Kolstø, H. M., Kwagala, N. K. & Jørgensen, T. M. The Micro-Macro Coupling of Mass-Loading in Symmetric Magnetic Reconnection With Cold Ions. *Geophysical Research Letters* **48**, e2020GL090690 (2021).
47. Darrouzet, F., Gallagher, D. L., André, N., Carpenter, D. L., Dandouras, I., Décréau, P. M. E., de Keyser, J., Denton, R. E., Foster, J. C., Goldstein, J., Moldwin, M. B., Reinisch, B. W., Sandel, B. R. & Tu, J. Plasmaspheric Density Structures and Dynamics: Properties Observed by the CLUSTER

- and IMAGE Missions. *Space Sci. Rev.* **145**, 55–106. doi:[10.1007/s11214-008-9438-9](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9438-9) (2009).
48. André, M., Vaivads, A., Khotyaintsev, Y. V., Laitinen, T., Nilsson, H., Stenberg, G., Fazakerley, A. & Trotignon, J. Magnetic reconnection and cold plasma at the magnetopause. *Geophysical Research Letters* **37** (2010).
  49. Toledo-Redondo, S., Vaivads, A., André, M. & Khotyaintsev, Y. V. Modification of the Hall physics in magnetic reconnection due to cold ions at the Earth's magnetopause. *Geophysical Research Letters* **42**, 6146–6154 (2015).
  50. Alm, L., Andre, M., Vaivads, A., Khotyaintsev, Y. V., Torbert, R. B., Burch, J. L., Ergun, R., Lindqvist, P.-A., Russell, C. T. & Giles, B. L. Magnetotail Hall physics in the presence of cold ions. *Geophysical Research Letters* **45**, 10–941 (2018).
  51. Toledo-Redondo, S., Dargent, J., Aunai, N., Lavraud, B., André, M., Li, W., Giles, B., Lindqvist, P.-A., Ergun, R. E. & Russell, C. T. Perpendicular current reduction caused by cold ions of ionospheric origin in magnetic reconnection at the magnetopause: Particle-in-cell simulations and spacecraft observations. *Geophysical Research Letters* **45**, 10–033 (2018).
  52. Dargent, J., Aunai, N., Lavraud, B., Toledo-Redondo, S., Shay, M., Cassak, P. & Malakit, K. Kinetic simulation of asymmetric magnetic reconnection with cold ions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **122**, 5290–5306 (2017).
  53. Dargent, J., Aunai, N., Lavraud, B., Toledo-Redondo, S. & Califano, F. Signatures of cold ions in a kinetic simulation of the reconnecting magnetopause. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **124**, 2497–2514 (2019).
  54. Haggerty, C. C., Shay, M. A., Chasapis, A., Phan, T. D., Drake, J. F., Malakit, K., Cassak, P. A. & Kieokaew, R. The reduction of magnetic reconnection outflow jets to sub-Alfvénic speeds. *Physics of Plasmas* **25**, 102120 (2018).
  55. Tenfjord, P., Hesse, M., Norgren, C., Spinnangr, S. F., Kolstø, H. & Kwagala, N. Interaction of Cold Streaming Protons with the Reconnection Process.

- Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **125**, e27619. doi:[10.1029/2019JA027619](https://doi.org/10.1029/2019JA027619) (2020).
56. Doss, C. E., Cassak, P. A. & Swisdak, M. Particle-in-cell simulation study of the scaling of asymmetric magnetic reconnection with in-plane flow shear. *Physics of Plasmas* **23**, 082107. doi:[10.1063/1.4960324](https://doi.org/10.1063/1.4960324). arXiv: [1607.05611](https://arxiv.org/abs/1607.05611) [[physics.plasm-ph](https://arxiv.org/archive/physics)] (2016).
  57. Spinnangr, S. F., Hesse, M., Tenfjord, P., Norgren, C., Kolstø, H. M., Kwagala, N. K. & Jørgensen, T. M. The Micro-Macro Coupling of Mass-Loading in Symmetric Magnetic Reconnection With Cold Ions. *Geophys. Res. Lett.* **48**, e90690. doi:[10.1029/2020GL090690](https://doi.org/10.1029/2020GL090690) (2021).
  58. Li, Y.-X., Li, W.-Y., Tang, B.-B., Norgren, C., He, J.-S., Wang, C., Zong, Q.-G., Toledo-Redondo, S., André, M., Chappell, C., Dargent, J., Fuselier, S. A., Glocer, A., Graham, D. B., Haaland, S., Kistler, L., Lavraud, B., Moore, T. E., Tenfjord, P., Vines, S. K. & Burch, J. Quantification of cold-ion beams in a magnetic reconnection jet. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **8**, 193. doi:[10.3389/fspas.2021.745264](https://doi.org/10.3389/fspas.2021.745264) (2021).
  59. Liu, C., Vaivads, A., Graham, D. B., Khotyaintsev, Y. V., Fu, H., Johlander, A., André, M. & Giles, B. Ion-beam-driven intense electrostatic solitary waves in reconnection jet. *Geophysical Research Letters* **46**, 12702–12710 (2019).
  60. Toledo-Redondo, S., André, M., Khotyaintsev, Y. V., Lavraud, B., Vaivads, A., Graham, D. B., Li, W., Perrone, D., Fuselier, S. & Gershman, D. J. Energy budget and mechanisms of cold ion heating in asymmetric magnetic reconnection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **122**, 9396–9413 (2017).
  61. Graham, D. B., Khotyaintsev, Y. V., Norgren, C., Vaivads, A., André, M., Toledo-Redondo, S., Lindqvist, P.-A., Marklund, G., Ergun, R. & Paterson, W. Lower hybrid waves in the ion diffusion and magnetospheric inflow regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **122**, 517–533 (2017).
  62. Norgren, C., Tenfjord, P., Hesse, M., Toledo-Redondo, S., Li, W.-Y., Xu, Y., Kwagala, N. K., Spinnangr, S., Kolstø, H. & Moretto, T. On the presence and thermalization of cold ions in the exhaust of antiparallel symmetric reconnection. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 149 (2021).

63. Toledo-Redondo, S., André, M., Vaivads, A., Khotyaintsev, Y. V., Lavraud, B., Graham, D. B., Divin, A. & Aunai, N. Cold ion heating at the dayside magnetopause during magnetic reconnection. *Geophysical Research Letters* **43**, 58–66 (2016).
64. Buneman, O., Neubert, T. & Nishikawa, K.-I. Solar wind-magnetosphere interaction as simulated by a 3-D EM particle code. *IEEE transactions on plasma science* **20**, 810–816 (1992).
65. Nishikawa, K.-I., Neubert, T. & Buneman, O. *solar wind-Magnetosphere Interaction as Simulated by a 3-D EM Particle Code* в *Plasma Astrophysics and Cosmology: The Second IEEE International Workshop, Princeton, New Jersey, May 10–12, 1993* (1995), 265–276.
66. Nishikawa, K.-I. Particle entry through reconnection grooves in the magnetopause with a dawnward IMF as simulated by a 3-D EM particle code. *Geophysical research letters* **25**, 1609–1612 (1998).
67. Baraka, S. & Ben-Jaffel, L. Sensitivity of the Earth’s magnetosphere to solar wind activity: Three-dimensional macroparticle model. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **112** (2007).
68. Baraka, S. & Ben-Jaffel, L. *Impact of solar wind depression on the dayside magnetosphere under northward interplanetary magnetic field* в *Annales Geophysicae* **29** (2011), 31–46.
69. Palmroth, M., Pulkkinen, T. I., Ganse, U., Pfau-Kempf, Y., Koskela, T., Zaitsev, I., Alho, M., Cozzani, G., Turc, L. & Battarbee, M. Magnetotail plasma eruptions driven by magnetic reconnection and kinetic instabilities. *Nature Geoscience*, 1–7 (2023).
70. Peng, I. B., Markidis, S., Laure, E., Johlander, A., Vaivads, A., Khotyaintsev, Y., Henri, P. & Lapenta, G. Kinetic structures of quasi-perpendicular shocks in global particle-in-cell simulations. *Physics of Plasmas* **22** (2015).
71. Yang, Z., Huang, C., Liu, Y. D., Parks, G. K., Wang, R., Lu, Q. & Hu, H. Global explicit particle-in-cell simulations of the nonstationary bow shock and magnetosphere. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **225**, 13 (2016).

72. Omidi, N., Berchem, J., Sibeck, D. & Zhang, H. Impacts of spontaneous hot flow anomalies on the magnetosheath and magnetopause. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **121**, 3155–3169 (2016).
73. Ashida, Y., Usui, H., Shinohara, I., Nakamura, M., Funaki, I., Miyake, Y. & Yamakawa, H. Full kinetic simulations of plasma flow interactions with meso-and microscale magnetic dipoles. *Physics of Plasmas* **21** (2014).
74. Omidi, N., Blanco-Cano, X., Russell, C., Karimabadi, H. & Acuna, M. Hybrid simulations of solar wind interaction with magnetized asteroids: General characteristics. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **107**, SSH–12 (2002).
75. Omidi, N., Blanco-Cano, X., Russell, C. & Karimabadi, H. Dipolar magnetospheres and their characterization as a function of magnetic moment. *Advances in Space Research* **33**, 1996–2003 (2004).
76. Moritaka, T., Kajimura, Y., Usui, H., Matsumoto, M., Matsui, T. & Shinohara, I. Momentum transfer of solar wind plasma in a kinetic scale magnetosphere. *Physics of Plasmas* **19**, 032111–032111. doi:[10.1063 / 1.3683560](https://doi.org/10.1063/1.3683560) (2012).
77. Fujita, K. Particle simulation of moderately-sized magnetic sails. *The Journal of Space Technology and Science* **20**, 2\_26–2\_31 (2004).
78. Shaikhislamov, I., Antonov, V., Zakharov, Y. P., Boyarintsev, E., Melekhov, A., Posukh, V. & Ponomarenko, A. Mini-magnetosphere: Laboratory experiment, physical model and Hall MHD simulation. *Advances in Space Research* **52**, 422–436 (2013).
79. Dyal, P., Parkin, C. W. & Daily, W. D. Magnetism and the interior of the Moon. *Reviews of Geophysics* **12**, 568–591 (1974).
80. Sonett, C., Colburn, D. & Currie, R. The intrinsic magnetic field of the moon. *Journal of Geophysical Research* **72**, 5503–5507 (1967).
81. Purucker, M. E. & Nicholas, J. B. Global spherical harmonic models of the internal magnetic field of the Moon based on sequential and coestimation approaches. *Journal of Geophysical Research: Planets* **115** (2010).

82. Vorburger, A., Wurz, P., Barabash, S., Wieser, M., Futaana, Y., Holmström, M., Bhardwaj, A. & Asamura, K. Energetic neutral atom observations of magnetic anomalies on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **117**, A07208. doi:[10.1029/2012JA017553](https://doi.org/10.1029/2012JA017553) (2012).
83. Nishino, M. N., Saito, Y., Tsunakawa, H., Takahashi, F., Fujimoto, M., Harada, Y., Yokota, S., Matsushima, M., Shibuya, H. & Shimizu, H. Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake. *Icarus* **250**, 238–248. doi:[10.1016/j.icarus.2014.12.007](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.12.007) (2015).
84. Blewett, D. T., Coman, E. I., Hawke, B. R., Gillis-Davis, J. J., Purucker, M. E. & Hughes, C. G. Lunar swirls: Examining crustal magnetic anomalies and space weathering trends. *Journal of Geophysical Research (Planets)* **116**, E02002. doi:[10.1029/2010JE003656](https://doi.org/10.1029/2010JE003656) (2011).
85. Hansen, K. C., Altwegg, K., Berthelier, J. -J., Bieler, A., Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Calmonte, U., Capaccioni, F., Combi, M. R., de Keyser, J., Fiethe, B., Fougere, N., Fuselier, S. A., Gasc, S., Gombosi, T. I., Huang, Z., Le Roy, L., Lee, S., Nilsson, H., Rubin, M., Shou, Y., Snodgrass, C., Tennishev, V., Toth, G., Tzou, C. -Y., Simon Wedlund, C. & Rosina Team. Evolution of water production of 67P/Churyumov-Gerasimenko: An empirical model and a multi-instrument study. *MNRAS* **462**, S491–S506. doi:[10.1093/mnras/stw2413](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2413) (2016).
86. Gombosi, T. I., De Zeeuw, D. L., Häberli, R. M. & Powell, K. G. Three-dimensional multiscale MHD model of cometary plasma environments. *J. Geophys. Res.* **101**, 15233–15252. doi:[10.1029/96JA01075](https://doi.org/10.1029/96JA01075) (1996).
87. Jia, Y., Combi, M., Hansen, K., Gombosi, T., Crary, F. & Young, D. A 3-D global MHD model for the effect of neutral jets during the Deep Space 1 Comet 19P/Borrelly flyby. *Icarus* **196**, 249–257 (2008).
88. Rubin, M., Koenders, C., Altwegg, K., Combi, M. R., Glassmeier, K. -H., Gombosi, T. I., Hansen, K. C., Motschmann, U., Richter, I., Tennishev, V. M. & Tóth, G. Plasma environment of a weak comet - Predictions for Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from multifluid-MHD and Hybrid models. *Icarus* **242**, 38–49. doi:[10.1016/j.icarus.2014.07.021](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.07.021) (2014).

89. Gortsas, N., Motschmann, U., Kührt, E., Knollenberg, J., Simon, S. & Boesswetter, A. Mapping of coma anisotropies to plasma structures of weak comets: a 3-D hybrid simulation study. *Annales Geophysicae* **27**, 1555–1572. doi:[10.5194/angeo-27-1555-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1555-2009) (2009).
90. Koenders, C., Glassmeier, K. -H., Richter, I., Motschmann, U. & Rubin, M. Revisiting cometary bow shock positions. *Planetary and Space Science* **87**, 85–95. doi:[10.1016/j.pss.2013.08.009](https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.08.009) (2013).
91. Koenders, C., Glassmeier, K. -H., Richter, I., Ranocha, H. & Motschmann, U. Dynamical features and spatial structures of the plasma interaction region of 67P/Churyumov-Gerasimenko and the solar wind. *Planetary and Space Science* **105**, 101–116. doi:[10.1016/j.pss.2014.11.014](https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.11.014) (2015).
92. Clark, G., Broiles, T. W., Burch, J. L., Collinson, G. A., Cravens, T., Frahm, R. A., Goldstein, J., Goldstein, R., Mandt, K., Mokashi, P., Samara, M. & Pollock, C. J. Suprathermal electron environment of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Observations from the Rosetta Ion and Electron Sensor. *Astronomy & Astrophysics* **583**, A24. doi:[10.1051/0004-6361/201526351](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526351) (2015).
93. Madanian, H., Cravens, T. E., Rahmati, A., Goldstein, R., Burch, J., Eriksson, A. I., Edberg, N. J. T., Henri, P., Mandt, K., Clark, G., Rubin, M., Broiles, T. & Reedy, N. L. Suprathermal electrons near the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko at 3 AU: Model comparisons with Rosetta data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **121**, 5815–5836. doi:[10.1002/2016JA022610](https://doi.org/10.1002/2016JA022610) (2016).
94. Engelhardt, I. A. D., Eriksson, A. I., Vigren, E., Vallières, X., Rubin, M., Gilet, N. & Henri, P. Cold electrons at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics* **616**, A51. doi:[10.1051/0004-6361/201833251](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833251). arXiv: [1806.09833](https://arxiv.org/abs/1806.09833) [[astro-ph.EP](https://arxiv.org/archive/astro-ph)] (2018).
95. Myllys, M., Henri, P., Galand, M., Heritier, K. L., Gilet, N., Goldstein, R., Eriksson, A. I., Johansson, F. & Deca, J. Plasma properties of suprathermal electrons near comet 67P/Churyumov-Gerasimenko with Rosetta. *Astronomy & Astrophysics* **630**, A42. doi:[10.1051/0004-6361/201834964](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834964) (2019).

96. Sergeev, V., Runov, A., Baumjohann, W., Nakamura, R., Zhang, T., Volwerk, M., Balogh, A., Reme, H., Sauvaud, J. & André, M. Current sheet flapping motion and structure observed by Cluster. *Geophysical research letters* **30** (2003).
97. Runov, A., Nakamura, R., Baumjohann, W., Zhang, T., Volwerk, M., Eichelberger, H.-U. & Balogh, A. Cluster observation of a bifurcated current sheet. *Geophysical Research Letters* **30** (2003).
98. Sergeev, V., Runov, A., Baumjohann, W., Nakamura, R., Zhang, T., Balogh, A., Louarnd, P., Sauvaud, J.-A. & Reme, H. Orientation and propagation of current sheet oscillations. *Geophysical Research Letters* **31** (2004).
99. Daughton, W. Kinetic theory of the drift kink instability in a current sheet. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **103**, 29429–29443 (1998).
100. Daughton, W. Two-fluid theory of the drift kink instability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **104**, 28701–28707 (1999).
101. Karimabadi, H., Daughton, W., Pritchett, P. & Krauss-Varban, D. Ion-ion kink instability in the magnetotail: 1. Linear theory. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **108** (2003).
102. Karimabadi, H., Pritchett, P., Daughton, W. & Krauss-Varban, D. Ion-ion kink instability in the magnetotail: 2. Three-dimensional full particle and hybrid simulations and comparison with observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **108** (2003).
103. Sitnov, M., Swisdak, M., Drake, J., Guzdar, P. & Rogers, B. A model of the bifurcated current sheet: 2. Flapping motions. *Geophysical research letters* **31** (2004).
104. Ricci, P., Lapenta, G. & Brackbill, J. Structure of the magnetotail current: Kinetic simulation and comparison with satellite observations. *Geophysical research letters* **31** (2004).
105. Golovchanskaya, I. & Maltsev, Y. P. On the identification of plasma sheet flapping waves observed by Cluster. *Geophysical research letters* **32** (2005).
106. Erkaev, N., Semenov, V. & Biernat, H. Magnetic double-gradient instability and flapping waves in a current sheet. *Physical review letters* **99**, 235003 (2007).

107. Kubyshkina, D., Sormakov, D., Sergeev, V., Semenov, V., Erkaev, N., Kubyshkin, I., Ganushkina, N. Y. & Dubyagin, S. How to distinguish between kink and sausage modes in flapping oscillations? *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **119**, 3002–3015 (2014).
108. Korovinskiy, D., Semenov, V., Erkaev, N., Divin, A. & Biernat, H. The 2.5-D analytical model of steady-state Hall magnetic reconnection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **113** (2008).
109. Korovinskiy, D., Semenov, V., Erkaev, N., Divin, A., Biernat, H. & Möstl, U. A 2.5-D electron Hall-MHD analytical model of steady state Hall magnetic reconnection in a compressible plasma. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **116** (2011).
110. Sitnov, M. I., Swisdak, M. & Divin, A. V. Dipolarization fronts as a signature of transient reconnection in the magnetotail. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **114**, A04202. doi:[10.1029/2008JA013980](https://doi.org/10.1029/2008JA013980) (2009).