

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of several stylized, overlapping strokes that form a unique, abstract shape.

ШАЙХИСЛАМОВ ИЛЬДАР ФАРИТОВИЧ

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный консультант: Пономаренко Арнольд Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом Лазерной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

Костров Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт прикладной физики Российской академии наук, заведующий лабораторией моделирования космической плазмы, г. Нижний Новгород.

Еселевич Виктор Григорьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

Вшивков Виталий Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией параллельных алгоритмов решения больших задач Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт космических исследований** Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «27» марта 2015 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.024.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 15Б, и на сайте www.laser.nsc.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Н.Г. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая работа носит в целом экспериментальный характер и посвящена исследованию ряда магнитосферных процессов на основе модельных экспериментов. Все опыты проводились на стенде КИ-1 (Космические Исследования) Института Лазерной Физики СО РАН. Лабораторная магнитосфера создается при обтекании компактных магнитных диполей потоком лазерной плазмы, или источниками на основе электрического и индукционного разряда. Диагностика включает электрические и магнитные зонды, пояс Роговского, фотографирование с короткой экспозицией, анализ спектрального свечения плазмы.

Проблематика магнитосферы, заложенная и развитая в ходе исследования планетарных магнитосфер Солнечной системы, и в первую очередь Земли, в начале 2000-х годов значительно обогатилась и включила новые объекты. Открытие экзопланет в других звездных системах показало существование обширного класса Горячих Юпитеров, которые за счет вращения в экстремальной близости от звезды теряют вещество в виде горячего сверхзвукового потока плазмы. Наличие планетарного ветра кардинально меняет магнитосферу благодаря формированию магнитодиска, в определенной степени аналогично Юпитеру в Солнечной системе. Другое направление связано с магнитными аномалиями на Луне и возможным остаточным магнетизмом крупных астероидов. Магнитное поле на масштабах ста километров и менее создает в потоке Солнечного Ветра так называемую мини-магнитосферу, которая существенно отличается от планетарных магнитосфер благодаря проявлению двух-жидкостных и кинетических эффектов.

В настоящей работе методами лабораторного эксперимента исследуются фундаментальные и практически важные аспекты рассмотренных типов магнитосфер: 1) МГД генератор продольных токов и трансполярного потенциала Земли, работающий в отсутствии межпланетного магнитного поля в пограничном слое магнитосферы. 2) Формирование тонкого и протяженного экваториального магнитодиска в системе с дипольным полем и потоком плазмы из внутренней области в окружающее пространство. 3) Физические закономерности и процессы на масштабе ионной плазменной длины, определяющие необычные свойства мини-магнитосферы.

Актуальность темы исследований и степень разработанности

Одна из главных задач магнитосферной физики научиться предсказывать, каким образом магнитосфера реагирует на изменения в Солнечном Ветре. Наиболее сильные и

даже катастрофические воздействия оказывают Корональные Выбросы Массы в ходе Солнечной активности. Решения этой проблемы требует получения большого объема разнообразных наблюдательных данных, на основе которых может быть разработана теория и построены численные модели. Одним из способов получения дополнительной информации об объекте является лабораторное моделирование, характер и качество данных которого недоступно в натурных наблюдениях.

Продольные Токи играют ключевую роль в магнитосферно-ионосферном взаимодействии Земли. Наиболее интенсивными являются токи зоны-1, которые являются прямым результатом взаимодействия СВ с Земным магнитным полем. Многочисленные измерения трансполярного потенциала, который пропорционален величине тока зоны-1, обнаружили сильную зависимость от направления Межпланетного Магнитного Поля. Энергичная плазма КВМ и скачки динамического давления СВ значительно усиливают токи зоны-1 и трансполярный потенциал. Другим ключевым фактором является величина интегральной проводимости Педерсена ионосферы. Детальный статистический анализ величины токов зоны-1 на дневной стороне в различных условиях показывает, что, несмотря на хорошее качественное соответствие с моделью пересоединения на магнитопаузе в присутствии ММП южного направления, имеется ряд противоречий, указывающих на то, что могут одновременно действовать другие процессы генерации продольных токов. Альтернативный механизм основан на квази-вязком взаимодействии плазмы с дипольным полем в пограничных слоях, впервые предложенный Аксфордом и Хайнцом еще в 1961 г. Эффективная вязкость возникает как результат развития различных неустойчивостей, например Кельвина-Гельмгольца, приводящих к рассеянию частиц на волнах. В работе Истмана 1976 г. было предложено, что источником трансполярного потенциала и продольных токов зоны-1 на дневной стороне Земли является низкоширотный пограничный слой, через который плазма магнитослоя переносит внутрь магнитосферы энергию и импульс СВ. Эта модель магнитосферного МГД генератора в дальнейшем развивалась в рамках параболоидной модели Китаевым А.В. с соавторами.

Несмотря на большое количество наблюдательных данных и результатов численных расчетов, остается ряд нерешенных проблем, связанных со свойствами МГД генератора, которые являются предметом исследования настоящей работы. Во первых, отсутствует подтверждение модели наблюдательными данными непосредственно в области генератора в пограничном слое. Во вторых, есть вопросы, на которые практически невозможно ответить спутниковыми наблюдениями, в том числе в силу ограниченного диапазона физических параметров, характерных для магнитосферы Земли. Является ли магнитосферный МГД генератор источником напряжения или тока, какова величина

максимального тока, и каким процессом она регулируется, каково внутренне сопротивление такого генератора в сравнении с интегральной проводимостью Педерсена ионосферы? Детальное понимание работы МГД генератора в пограничном слое Земли позволит более точно оценивать вклад в трансполярный потенциал процесса пересоединения при наличии ММП Южного направления.

Магнитосферы планет гигантов, в особенности Юпитера, внесли качественно новый элемент в магнитосферу – магнитодиск. Источник, в случае Юпитера это выбросы газа с его спутника Ио, поставляет плазму внутрь магнитосферы, которая захватывается дипольным магнитным полем, закручивается вращением Юпитера и выбрасывается за область коротации. За счет набранной энергии поток плазмы создает экваториальный токовый слой, поле которого на больших расстояниях значительно увеличивает дипольное поле планеты и отодвигает точку остановки Солнечного Ветра.

Открытие планет за пределами солнечной системы является шагом, значение которого для человечества в целом и для науки в частности трудно переоценить. Вскоре после открытия первой экзопланеты стало ясно, что их параметры и внешнее окружение чрезвычайно разнообразны. В перспективе, перед наукой стоит задача исследовать и понять наиболее характерные планетарные системы, а также их эволюцию, которая во многом зависит от наличия магнитосферы. В условиях, когда *in situ* наблюдательные данные останутся недоступными в обозримом будущем, исследование экзопланет будет основано на моделях, которые опираются на примеры в Солнечной системе. Во многих случаях потребуется качественное развитие таких моделей. Это показало обнаружение нового класса газовых гигантов – Горячих Юпитеров, обращающихся на экстремально близких к звезде орбитах. В работах Ходаченко М.Л. и Алексеева И.И. с соавторами впервые было предложено, что формирование сверхзвукового истечения плазмы, преодолевающего гравитационное притяжение планеты, за счет нагрева и ионизации верхней атмосферы коротковолновым излучением, характерное для Горячих Юпитеров, может стать источником магнитодиска в таких системах. Лабораторная демонстрация принципиальной возможности формирования магнитодиска в процессе истечения плазмы в дипольном поле является важным и необходимым шагом в построении законченной модели магнитосферы Горячего Юпитера, поскольку в отсутствие наблюдательных данных только модельный эксперимент может подтвердить теорию.

Если крупнейшие планетарные магнитосферы имеют размер порядка десяти миллионов километров, то на другой стороне пространственной шкалы находятся мини-магнитосферы масштабом порядка нескольких десятков километров. Это минимальный масштаб, на котором магнитное поле малого небесного тела или локального участка

намагниченной коры все еще формирует сильное возмущение в потоке Солнечного Ветра и в достаточной мере отклоняет его. При размере порядка нескольких километров становится существенной масса электронов, и намагниченное тело будет возбуждать в потоке только несжимаемые возмущения типа вистлерных волн. Изучение и построение модели мини-магнитосферы актуально в связи с исследованиями Луны и, особенно, ее освоением в будущем, в том числе в Российских миссиях. Магнитные аномалии могут давать естественную защиту от частиц солнечного ветра, и вызывают постоянный научный интерес. Они были объектами наблюдений ряда последних орбитальных спутниковых миссий, и входят в число научных задач планируемых миссий. Накопленные факты взаимодействия Лунных магнитных аномалий с Солнечным Ветром поставили вопросы, которые до сих пор остаются без ответа. Одним из наиболее актуальных является вопрос о природе наблюдаемых значительных 2-3 кратных усилений магнитного поля СВ, которое не сопровождается соответствующим увеличением плотности плазмы и формированием ударной волны, и роль в этом отраженных от поверхности ионов.

Мини-магнитосферы могут быть обнаружены в будущем вокруг наиболее крупных астероидов с остаточным магнетизмом. Магнитная структура метеоритов, обнаруживаемых на Земле, указывает на такую возможность. В ходе освоения астероидов, которое уже началось с полетами японского аппарата MUSES-C и американского Dawn, несомненно потребуются модели мини-магнитосфер. Таким образом, изучение мини-магнитосферы в лаборатории не только создает задел знаний для будущих космических задач, но и дает новые данные об объекте, которые пока недоступны иным образом, и на основе которых могут быть решены уже стоящие проблемы.

Цели и задачи работы

Общая цель работы заключается в изучении конкретных магнитосферных процессов и в построении физических модели рассматриваемых явлений. В диссертации решаются три задачи:

- 1) Экспериментальное исследование свойств магнитосферного МГД генератора в переходном слое и принципов его работы в отсутствие межпланетного магнитного поля. Построение физической модели, соответствующей данным измерений и ее применение для магнитосферы Земли.
- 2) Экспериментальная демонстрация формирования магнитодиска в системе с истечением плазмы в дипольном магнитном поле.

3) Экспериментальное изучение мини-магнитосферы, построение физической модели, объясняющей ее отличительные черты и создание задела для будущих исследований и космических наблюдений.

Научная новизна результатов

Результаты, полученные по всем трем задачам, являются совершенно новыми. Экспериментальные данные уникальны, а разработанные модели – оригинальными. Впервые измерено внутреннее сопротивление магнитосферного МГД генератора, и разработана модель, согласующаяся с экспериментом. Модель основана на обратном действии генерируемого тока на движение плазмы, позволяет выразить эффект торможения как внутреннее сопротивление, предложена впервые, позволяет оценить это эффективное сопротивление для магнитосферы Земли, и может найти применение в других плазменных процессах.

Демонстрация формирования магнитодиска в эксперименте реализована впервые. Ранее в университете Киото, Япония был проведен эксперимент по инфляции дипольного поля. Наблюдалось двухкратное увеличение магнитного поля под действием потока плазмы, образованного электрическим разрядом в струе газа. Однако пространственная структура полей измерена не была, факт отсутствия или наличия тонкого экваториального токового слоя не определен. Более того, авторы предполагали, что образуется обширный токовый слой в соответствии со структурой чисто радиального магнитного поля. Эксперименты, проведенные на КИ-1, в ходе которых были получены подробные данные о движении плазмы, структуре магнитных полей и токов, позволили показать, что помимо радиальной структуры поля формируется тонкий токовый слой. Магнитное поле, индуцированное магнитодиском, на больших расстояниях существенно превосходит дипольное поле. Новизна полученного результата также заключается в том, что он был применен для системы Горячего Юпитера, в котором предполагается формирование магнитодиска планетарным ветром.

Ранее мини-магнитосфера исследовалась исключительно методами численного моделирования. Численные результаты показали, что у мини-магнитосферы отсутствует ударная волна, а ионы не испытывают ожидаемого торможения в теоретической точке остановки плазмы, и проникают к диполю вплоть до предела Штермера. Данные систематического экспериментального исследования мини-магнитосферы являются совершенно новыми. Впервые продемонстрирован эффект проникновения плазмы за магнитопаузу и его зависимость от величины ионной плазменной длины по сравнению с

размером магнитосферы. В хвосте мини-магнитосферы впервые обнаружено, что в долях преобладает некомпланарная компонента магнитного поля, перпендикулярная как направлению хвоста, так и магнитного момента диполя. Сравнение электрического тока, определенного из вариации магнитного поля и ионного тока, измеренного зондом, впервые обнаружило, что внутри мини-магнитосферы электроны остаются неподвижными несмотря на движение ионов. Впервые предложена физическая модель на основе Холловских или двухжидкостных эффектов, которая качественно и количественно объясняет наблюдаемые свойства мини-магнитосферы. Для подтверждения модели проведено численное моделирование в рамках МГД модели с учетом Холловского члена.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты исследования магнитосферного МГД генератора имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Детальная экспериментальная проверка гипотезы об источнике продольных токов и трансполярного потенциала в переходном слое за счет его конечной ширины является важным для дальнейшего развития теории планетарных магнитосфер. Более того, данные о внутреннем сопротивлении такого МГД генератора, которые можно было получить только в лабораторном эксперименте с лазерной плазмой, позволили дополнить теоретическую модель физическим механизмом насыщения продольных токов. Применение модели к Земле показало, генератор продольных токов, действующий за счет поперечного движения плазмы в переходном слое в отсутствие межпланетного магнитного поля, всегда работает как источник напряжения. В условиях повышенной активности его вклад в трансполярный потенциал может достигать величины 40-80 кВ. Это заключение имеет практическое значение для понимания источников магнитных возмущений на поверхности Земли.

Экспериментальное подтверждение сценария образования магнитодиска у Горячих Юпитеров за счет планетарного ветра имеет теоретическое значение как необходимый шаг для дальнейшего развития моделей экзопланет такого типа.

Новые фактические данные о мини-магнитосфере имеют практическое значение для исследований Лунных магнитных аномалий и малых небесных тел с остаточным магнетизмом. На основе полученных данных сделан вывод, что при пересечении хвоста намагниченного астероида возможно наблюдение трехмерного вращения вектора магнитного поля. Такая информация будет необходима при анализе данных наблюдений будущих спутниковых миссий. Построенная модель делает еще один шаг в развитии физики взаимодействия плазменных потоков с магнитными полями на масштабе ионной

плазменной длины. Ее применение может оказаться плодотворным для объяснения механизма значительного усиления магнитного поля Солнечного Ветра над Лунными аномалиями, что имеет практическое значение.

Методология и методы исследования

Основным методом исследований в работе является лабораторный эксперимент, условия которого выбраны с учетом критериев подобия. Одним из главных элементов описываемых экспериментов является лазерная плазма, которая оказывается наиболее подходящей для моделирования транзитных процессов генерации продольных токов и трансполярного потенциала, вызванных скачками давления в Солнечном Ветре.

Дополнительными методами являются аналитические модели, разработанные исключительно на основе полученных в работе экспериментальных данных. Для исследования мини-магнитосферы также проведены численные расчеты с целью более детального сопоставления опытов с моделью, проверки основных гипотез и дальнейшего развития модели. Применявшийся численный код разработан автором на основе МГД уравнений с учетом Холловского члена и конечной массы электронов.

Результаты экспериментов и разработанные модели применяются для условий природных явлений. В конечном итоге делаются конкретные выводы и рекомендации.

Положения, выносимые на защиту

1) Экспериментальное подтверждение свойств магнитосферного МГД генератора, модель насыщения и режим его работы как источника напряжения для условий Земли.

Создание модели и ее подтверждение потребовали трех этапов. В первую очередь необходимо было показать, что есть физическое подобие между системой продольных токов, наблюдаемой в экспериментах по обтеканию диполя лазерной плазмой и токами зоны-1 на Земле. Как описано в главе 3, полярная система токов в экспериментах с лазерной плазмой обнаруживает сходство с токами зоны-1 по ряду принципиально важных физических характеристик. Это направление протекания с утреннего сектора на вечерний сектор; наличие филаментарных каналов протекания тока, образованных пучками электронов ускоренными положительным потенциалом над утренней стороной полюса и диффузное высыпание электронов на вечерней стороне полюса; зависимость величины продольного тока от интегрального сопротивления Педерсена ионосферы (или

металлической оболочки в эксперименте), которое позволяет току замыкаться, протекая поперек магнитного поля, и отсутствие ПТ в случае непроводящей ионосферы; структура магнитных полей, образованных системой ПТ, выраженная в увеличении поля над полюсами и уменьшении основной компоненты в экваториальной плоскости дневной части магнитосферы; электродинамическая связь ПТ с низкоширотным пограничным плазменным слоем; геометрическая связь ПТ с пограничным слоем через силовые линии магнитного поля.

Новизна работы состоит в том, что других лабораторных экспериментах такой выраженной системы продольных токов не наблюдалось, и причина отсутствия выраженной системы продольных токов в других модельных экспериментах вызвана рядом причин. Во первых, ПТ могут генерироваться только если используется диполь с проводящей оболочкой. Во вторых, энергия ионов потока должна быть достаточно высокой и, по видимому, превышать величину порядка 100 эВ. В противном случае разность потенциалов, наведенная на западной стороне полюса, может оказаться недостаточной для превышения порога взрывной эмиссии металлической оболочки диполя. Только после этого поверхностный переход плазма-металл может пропускать достаточно большой ток. В третьих, для идентификации основных проявлений системы продольных токов размер диполя и лабораторной магнитосферы должен быть достаточно большим для локальных зондовых измерений. В экспериментах на стенде КИ-1 с использованием тета-пинча в качестве источника плазмы наблюдалась генерация на полюсах диполя трансполярного потенциала. В тоже время продольные токи не формировались, в частности из-за отсутствия взрывной эмиссии.

Лазерная плазма дает уникальные возможности, и именно ее применение на установке КИ-1 для моделирования магнитосферных процессов позволило впервые в лаборатории наблюдать интенсивную продольную токовую систему, аналогичную токама-1 на Земле. Мощная энергетика лазерной плазмы по сравнению с другими источниками позволяет создавать большую по размеру лабораторную магнитосферу с использованием диполей с большим магнитным моментом. Типичная энергия ионов углерода в потоке составляет величину порядка 500 эВ. Специфика CO_2 лазерного излучения пик+хвост, создающего два выраженных потока плазмы, оказывается исключительно благоприятным для генерации продольных токов. Первый более энергичный поток плазмы формирует на утренней стороне полюса каналы взрывной эмиссии, а второй поток генерирует интенсивные продольные токи.

Второй этап развития модели потребовал экспериментального подтверждения основных свойств магнитосферного МГД генератора продольных токов в низкоширотном

пограничном слое. Модель МГД генератора, предложенная для магнитосферы Земли для объяснения трансполярного потенциала и продольных токов зоны-1 в отсутствие ММП до сих пор не обоснована спутниковыми наблюдениями. Представленные результаты лабораторных экспериментов полностью подтверждают механизм генерации трансполярного потенциала и продольного тока в низкоширотном погранслое за счет движения плазмы поперек дипольного магнитного поля. Электрический потенциал в плазме, измеренный при пересечении погранслоя соответствует по знаку и величине трансполярному потенциалу, измеренному независимым образом на полюсе диполя, и примерно равен произведению скорости потока на магнитное поле и ширину погранслоя. В случае проводящей ионосферы трансполярный потенциал вызывает протекание тока в цепи связывающей экваториальный низкоширотный погранслоем с полюсами диполя. В этом случае вблизи погранслоя наблюдалось характерное магнитное возмущение, вызванное протеканием продольных токов – азимутальная компонента поля.

Только на основе предыдущих этапов стало возможным создать модель насыщения магнитосферного МГД генератора. Наиболее важной характеристикой любого электродинамического генератора является его эффективное внутреннее сопротивление. В сравнении с сопротивлением нагрузки внутреннее сопротивление определяет режим работы – генератора тока или генератора напряжения. В случае Земли нагрузкой выступает ионосфера через интегральное сопротивление Педерсена. Вопрос о режиме работы различных генераторов в магнитосфере Земли остается открытым, актуальным и практически важным вопросом. В работах авторов Hill и Sisco подобная модель предложена для генератора ПТ, работающего за счет процесса пересоединения на дневной магнитопаузе при наличии ММП южного направления. Модель основана на том, что интенсивные продольные токи оказывают обратное влияние на магнитное поле и течение плазмы в области пересоединения, в результате чего скорость пересоединения уменьшается. До настоящего времени эта модель не имеет экспериментального подтверждения и обоснована только в численных расчетах.

В модели генерации трансполярного потенциала в погранслое за счет поперечного движения плазмы, рассматриваемой ниже, естественный механизм насыщения продольных токов связан с обратным влиянием генерируемого тока на движение плазмы, как это описано в разделе 3.4.2. Аналитический анализ такой обратной связи показывает, что эффект насыщения описывается простым линейным соотношением как эффективное внутреннее сопротивление генератора. Проблема состоит в том, что определить из натуральных спутниковых наблюдений и наземных наблюдений свойства генератора очень сложно. Лабораторный эксперимент дал уникальную возможность измерить напряжение

магнитосферного МГД генератора в режиме разрыва цепи и отсутствия нагрузки, и продольный ток насыщения в режиме замкнутой цепи. Внутреннее сопротивление генератора, найденное таким образом в эксперименте, оказалось в отличном соответствии с теоретическим расчетом.

Полученный результат показал, что для Земли МГД генератор в переходном слое работает как источник напряжения даже в условиях активности СВ. Таким образом, исследование методом лабораторного эксперимента позволило впервые выяснить все основные физические и электродинамические характеристики магнитосферного МГД генератора. Применение полученного результата позволит построить более полную картину взаимодействия скачков давления СВ с магнитосферой Земли и генерации геомагнитных возмущений.

2) Экспериментальная демонстрация формирования магнитодиска в процессе расширения потока плазмы в дипольном магнитном поле.

Лабораторное моделирование впервые экспериментально подтвердило гипотезу о возможности инфляции дипольного поля в процессе истечения плазмы из внутренней области во внешнюю. В настоящей работе впервые показано, что за пределами мертвой зоны образуется тонкий протяженный экваториальный токовый диск. На достаточно больших расстояниях от диполя индуцированное магнитное поле магнитодиска во много раз превышает исходное поле диполя. Основным физическим критерий моделирования для данной проблемы, который характерен для условий экзопланет типа Горячего Юпитера и ряда других аналогичных объектов – значительное превышение плотности магнитной энергии над плотностью тепловой и кинетической энергии плазмы в области формирования течения – было полностью выполнено по реализованным параметрам эксперимента. Проведенный численный расчет качественно и количественно подтвердил данные эксперимента.

3) Результаты экспериментального исследования и Холловская модель мини-магнитосферы.

Изучение объекта возможно только на основе фактических данных. В случае мини-магнитосферы именно лабораторное моделирование позволило обнаружить ряд новых свойств, которые в настоящее время невозможно получить в натуральных космических наблюдениях: А именно: 1) С увеличением ионной длины потока плазмы по сравнению с характерным размером магнитосферы увеличивается степень проникновения плазмы внутрь магнитосферы, а магнитопауза удаляется от диполя. 2) На границе и внутри

магнитосферы присутствует некомпланарная компонента поля, сопоставимая по величине с вариацией дипольных компонент. В меридиональной плоскости данная компонента имеет максимум в Северном полушарии и минимум в Южном независимо от направления магнитного момента диполя. Величина некомпланарной компоненты такова, что электрический ток в направлении потока сравним с ионным током. 3) При пересечении хвоста мини-магнитосферы в меридиональной плоскости вектор магнитного поля совершает трехмерное вращение по причине того, что в долях хвоста доминирует некомпланарная компонента, ориентированная перпендикулярно как направлению дипольного момента, так и направлению потока.

Для объяснения экспериментальных результатов и результатов численных расчетов разработана модель мини-магнитосферы, основанная на двухжидкостных эффектах, описываемых Холловским членом в законе Ома. Основное положение модели состоит в том, что проникновение ионов за магнитопаузу и их движение в дипольном поле возможно потому, что электроны внутри мини-магнитосферы остаются неподвижными. Электроны потока не попадают внутрь мини-магнитосферы, а обтекают ее вдоль магнитопаузы. Такое раздельное движение ионов и электронов образуют две токовые петли. Результирующий электрический ток связан с компонентой магнитного поля, перпендикулярной меридиональной плоскости. Эта компонента, некомпланарная дипольному полю, имеет существенно иную природу по сравнению с дипольными компонентами и описывается Холловским членом. Модель позволила объяснить результаты ряда численных расчетов по исчезновению головной ударной волны и остановке ионов на пределе Штермера, остававшиеся необъясненными до настоящего времени. Численные исследования автора с применением Холловского МГД кода полностью подтвердили аналитическую модель и обнаружили новые эффекты в хвосте мини-магнитосферы. Генерация Холловской компоненты поля во фронтальной части мини-магнитосферы и ее конвекция вниз по потоку приводит к тому, что в долях хвоста она становится доминирующей по сравнению с компонентой поля, ориентированной вдоль хвоста.

Достоверность полученных результатов

Новые результаты по исследованию продольных токов и трансполярного потенциала и модель насыщения основаны на комплексе экспериментальных данных. Первая часть опытов специально посвящена обоснованию физического соответствия лабораторных данных натурным наблюдениям. Вторая часть опытов направлена на

подтверждение тех свойств магнитосферного МГД генератора, которые были ранее предсказаны теоретически для Земли. Таким образом, достоверность выводов базируется на проверке и апробации лабораторных экспериментов, проведенных с учетом параметров подобия, и соответствии разработанной модель полученным данным.

Достоверность вывода о формировании магнитодиска основана на подробных магнитных измерениях, подтвержденных независимыми измерениями тока в плазме, а также качественного и количественного соответствия численному расчету и аналитическим оценкам.

Достоверность экспериментального исследования мини-магнитосферы основана на сравнительном подходе, который стал возможен благодаря реализации опытов в широком диапазоне Холловского параметра. Сопоставление МГД режима, характерного для планетарных магнитосфер с режимом, когда ионная плазменная длина превышает размер магнитосферы достоверно и наглядно выявило двухжидкостные эффекты. Для разработки модели мини-магнитосферы были привлечены все физические методы исследования – эксперимент, теория и численное моделирование. Окончательные выводы основаны на качественном и количественном согласии результатов всех методов исследования.

Апробация результатов

Результаты работы обсуждались на семинарах отдела Лазерной Плазмы Института Лазерной Физики СО РАН, Института Космических Исследований РАН, Института Прикладной Физики РАН, Института Космических Исследований Австрии (Грац), Венского Университета (Австрия).

Результаты работы были представлены на следующих конференциях:

Международная конференция «Плазменные процессы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014);

International Conference Space Science and Communication, 26-27 Dec, 2009;

Всероссийская конференция «Солнечно-земная физика», посвященная 50-летию создания ИСЗФ СО РАН Иркутск, 28–30 июня 2010;

International Astronomic Union IAU 274 Symposium Advances in Plasma Astrophysics, Giardini Naxos, Italy, 6-10 Sep 2010;

European Planetary Science Congress EPSC-DPS 2011, Nantes, France, 2-7 Oct 2011;

European Planetary Science Congress EPSC-DPS 2012, Madrid, Spain, 23-28 Sep, 2012;

Международная конференция «Современные проблемы лазерной физики», 25-31 августа 2013;

Личный вклад

Все описанные в диссертации эксперименты были проведены в коллективе лаборатории Космических Исследований отдела Лазерной Плазмы на стенде КИ-1. Это отражено в списке соавторов статей, представленных в диссертации. Направления исследований в диссертации по магнитосферному МГД генератору и мини-магнитосферы были заложены в рамках государственных программ СО РАН под руководством Пономаренко А.Г. Трансполярный потенциал и продольные токи впервые наблюдались и измерялись на КИ-1 Антоновым В.М. с соавторами в экспериментах по моделированию внутри магнитосферных выбросов плазмы. Магнитные вариации, вызванные продольными токами, а также филаментарная структура и величина этих токов в плазме были впервые измерены Захаровым Ю.П. Постановка опытов с кольцевым разрядом по разлету плазмы в дипольном поле разработана Антоновым В.М.. Проникновение ионов за магнитопаузу и их движение внутри мини-магнитосферы впервые наблюдалось в экспериментах по обтеканию диполя аргоновой плазмой Пономаренко А.Г. с соавторами. Захаров Ю.П. впервые показал, что ионы проникают вглубь мини-магнитосферы до предела Штермера.

На основе этих первичных и предварительных данных автор диссертации выдвинул оригинальные гипотезы, которые подтвердил и развил в систематических экспериментах и целенаправленных исследованиях. Самые главные результаты диссертации – подобие по основным физическим характеристикам наблюдаемых в эксперименте системы полярных токов токам зоны-1 на Земле; экспериментальная проверка наиболее важных свойств МГД генератора в низкоширотном пограничном слое; модель насыщения на основе обратного тормозящего влияния тока на движение плазмы в пограничном слое; измерение тонкого экваториального магнитодиска в эксперименте по истечению плазмы наружу дипольного поля и подтверждение в численном расчете; совокупность экспериментальных данных, характеризующих основные свойства фронтальной части мини-магнитосферы; гипотеза о важной роли некомпланарной компоненты магнитного поля и ее независимости от инверсии магнитного момента диполя; сложная трехмерная структура хвоста мини-магнитосферы; теоретическая модель, основанная на Холловском члене в законе Ома и факте принципиально различного движения ионов и электронов внутри мини-магнитосферы; численные расчеты дополняющие опыты и теорию – были сформулированы, получены и подтверждены автором самостоятельно. Также самостоятельно автор делал постановку экспериментов и задач, обработку данных, интерпретацию результатов, построение моделей, создание численных кодов и

проведение расчетов. Практически все статьи по материалам диссертации автор написан самостоятельно и в большинстве из них выступает в качестве первого автора. Основные результаты работы были получены в ходе выполнения проектов РФФИ, программы исследований физического отделения РАН, программы исследований президиума РАН, руководителем которых являлся автор.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка сокращений. Общий объем работы составляет 240 страниц, 93 рисунка и 9 таблиц. Списка цитируемой литературы содержит 237 ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первые две главы являются более детализованным продолжением Введения и содержат сведения, необходимые для изложения результатов диссертации. Результаты работы и защищаемые положения описаны в третьей, четвертой и пятой главах.

Глава 1. Лазерная плазма и лазерный стенд КИ-1

В первой главе описывается лазерный стенд КИ-1, а также параметры лазерной плазмы в представленных ниже экспериментах. Основу стенда составляет крупногабаритная вакуумная камера длиной 5 м и диаметром 1.2 м, и лазерный комплекс ЛУИ-2М. Комплекс генерирует CO_2 излучение с характерной длительностью 100 нс и полной энергией до 400 Дж. Излучение разбивается на два луча для более равномерного облучения твердотельных мишеней. Лазерная плазма, формирующаяся при облучении твердой мишени, имеет характерную скорость 100 км/с и число ионов порядка 10^{18} , которые разлетаются в конуса с углом раствора примерно 1 стерадиан. В качестве модели Земли используется линейка диполей с различными размерами в диапазоне 2.5–15 см и магнитными моментами в диапазоне $10^5 - 10^7$ Гс·см³. Ионосфера моделируется либо металлической высокопроводящей поверхностью, либо непроводящей диэлектрической пленкой. При расположении диполя на расстоянии 50-70 см от лазерной мишени образующаяся магнитосфера имеет характерный размер 10–30 см. Характерные уровни концентрации в области взаимодействия составляют 10^{13} см⁻³, кинетического давления $p = m_i n_i V^2 \sim 10^4$ дин/см².

Глава 2. Принципы лабораторного моделирования плазменных процессов в космосе

Во второй главе обсуждаются принципы лабораторного моделирования космической плазмы в целом и магнитосферных процессов в частности. Основой является π -теорема физического подобия систем имеющих одинаковый набор безразмерных параметров. В разделе 2.1 эта теорема применяется для потока плазмы с последовательным упрощением ее описания в рамках бесстолкновительной идеальной системы, системы уравнений Холловской МГД и идеальной МГД. Для практического применения лабораторного моделирования используется метод ограниченного или физического подобия, согласно которому для безразмерных параметров много больше или много меньше единицы достаточно выдержать качественное соответствие.

В разделе 2.2 список безразмерных величин задачи дополняется энергетическим параметром, учитывающем специфику взаимодействия расширяющегося облака лазерной плазмы с магнитным диполем. В разделе 2.3 для определения списка параметров в задаче магнитосферы также применяется независимый от π -теоремы метод прямого вывода соответствующих безразмерных МГД уравнений. Уравнения дополнены Холловским членом, который описывает двухжидкостные процессы на масштабе ионной плазменной длины. В результате получается 7 безразмерных параметров, которые необходимо сопоставлять с лабораторной магнитосферой – число Маха и Маха-Альфвена, магнитное число Рейнольдса и число Кнудсена, параметр Холла, относительный размер внутренней границы магнитосферы по сравнению с размером диполя, энергетический параметр облака лазерной плазмы.

В заключительном разделе 2.4 подробно описываются свойства лабораторной магнитосферы, которые используются в дальнейшем. Магнитосфера, создаваемая лазерной плазмой, имеет ряд отличительных черт и особенно подходит для моделирования импульсных транзиентных процессов. Характерный размер составляет 10-30 см в зависимости от магнитного момента диполя, длительность существования 4-6 мкс, что составляет несколько времен пролета плазмы через фронтальную часть магнитосферы. Лабораторная модель магнитосферы отличается достаточно узким пограничным слоем шириной 3-5 см, близкой ионной плазменной длине. Поток лазерной плазмы имеет два максимума, второй из которых создает дополнительное сжатие уже образованной магнитосферы и вызывает наибольшие по величине продольные токи. Приводится список размерных и безразмерных параметров экспериментов, необходимых для адекватного моделирования, и их сравнение с магнитосферами Земли и Меркурия.

измерениями, в том числе в силу ограниченного диапазона физических параметров, характерных для магнитосферы Земли. Основным из них является вопрос о том, является ли он источником напряжения или тока. Какова величина максимального тока, и какой механизм определяет насыщение тока. Или, в электротехнических терминах, каково внутренне сопротивление такого генератора и каким процессом регулируется. Эта величина имеет важное значение, поскольку позволяет, в сравнении с интегральной проводимостью Педерсена ионосферы, определить режим работы генератора. Детальное понимание работы МГД генератора в пограничном слое Земли позволит более точно оценивать вклад в трансполярный потенциал процесса магнитного пересоединения при наличии ММП Южного направления.

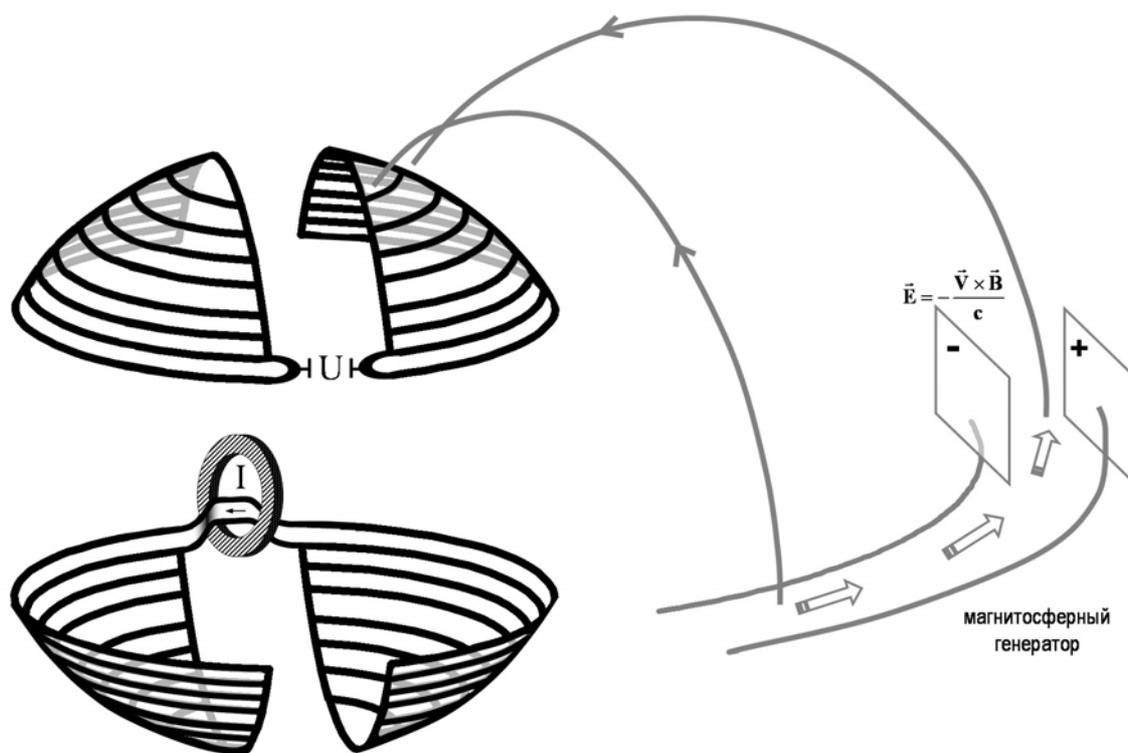


Рисунок 2. Схема расположения пластин на корпусе диполя для измерения потенциала на утренней и вечерней стороне. На вечерней стороне также показана схема магнитосферного генератора.

В разделе 3.2 описывается совокупность данных, доказывающих, что в лабораторных экспериментах на КИ-1 по обтеканию магнитного диполя лазерной плазмой формируется выраженная система продольных токов, качественно подобная продольным токам зоны-1 на Земле. В подразделе 3.2.1 приводится схема и условия соответствующих экспериментов. В подразделе 3.2.2 излагается методика измерения глобального трансполярного потенциала и интегрального продольного тока, которая позволила получить данные, составляющие основу раздела. Корпус магнитного диполя покрывается

диэлектрической пленкой, на которую накладываются четыре тонкие медные пластины в форме сегментов сферы. Между парами пластин на полюсах диполя имеется зазор. Трансполярный потенциал измеряется как разность потенциалов между утренними (западными) и вечерними (восточными) парами пластин в условиях, когда пластины не соединены и ток между ними не протекает. Для измерения трансполярного тока пластины шунтируются через пояс Роговского. Таким способом измеряется полный ток, протекающий через полуденный меридиан ионосферы, роль которой выполняет проводящая оболочка диполя. Измерения полного продольного тока таким методом показало, что по величине он сопоставим с интегральным током Чепмена-Ферраро, создающим магнитосферу, и имеет аналогичный скейлинг от магнитного момента диполя.

В подразделе 3.2.3 описываются результаты исследования спектрального свечения на полюсах диполя. Измерения поясом Роговского на полюсах диполя показало, что области характерного свечения на металлической поверхности диполя прямо связаны с локальными продольными токами в плазме, и отсутствуют, если отсутствуют такие токи, например на диэлектрической поверхности, или если имеется разрыв между полярными сегментами. Наблюдается два пятна свечения, совпадающие с областью втекания и вытекания продольного тока в металл, и имеющие разную структуру и цветовую гамму. Свечение исследовалось с помощью спектрографа и монохроматора с пространственным и временным разрешением. Было установлено, что свечение биполярных пятен вызвано различными физическими процессами. Процессом, который вызывает свечение материала поверхности в утреннем пятне, является взрывная эмиссия электронов и их последующее ускорение в окружающую плазму. При этом ускорение электронов сопровождается их бунчировкой и филаментацией. В вечернем пятне электроны движутся из плазмы и, попадая в металл, выбивают вторичные электроны. Вторичные электроны в свою очередь рекомбинируют с ионами плазмы и увеличивают их свечение. Динамика свечения в целом следует за динамикой лазерного потока. По результатам исследования сделан вывод, что процессы, сопровождающие протекание электронов в каналах продольных токов физически аналогичны наблюдаемым на Земле.

В подразделе 3.2.4 изложены данные, которые показывают прямую связь продольных токов с характерными магнитными возмущениями и электрическими полями на полюсах диполя и во фронтальной экваториальной области магнитосферы. Был применен метод, доступный только в эксперименте: сравнение данных с проводящей и диэлектрической поверхностью диполя (что равносильно присутствию и отсутствию продольных токов). Над Северным полюсом диполя наблюдается значительная по

величине компонента поля, направленная противоположно направлению потока плазмы, как и на Земле. Поперечная компонента поля меняет знак при пересечении полюса, что прямо указывает на пересечение токового канала. В экваториальной плоскости обнаружен интересный эффект понижения основной компоненты магнитного поля в присутствии продольных токов. Именно это наблюдается и в Земной магнитосфере. Величина магнитных возмущений, как на полюсах, так и в экваториальной области, хорошо соответствует полному продольному току, измеряемому между пластинами на поверхности диполя. Продольные токи обнаруживают также связь с электрическим потенциалом в экваториальной фронтальной магнитосфере. В частности, продольные токи уменьшают потенциал и электрическое поле. Т.е., электрическое шунтирование западного (утреннего) и восточного (вечернего) сегмента на полюсах диполя приводит к шунтированию источников ЭДС в экваториальной магнитосфере.

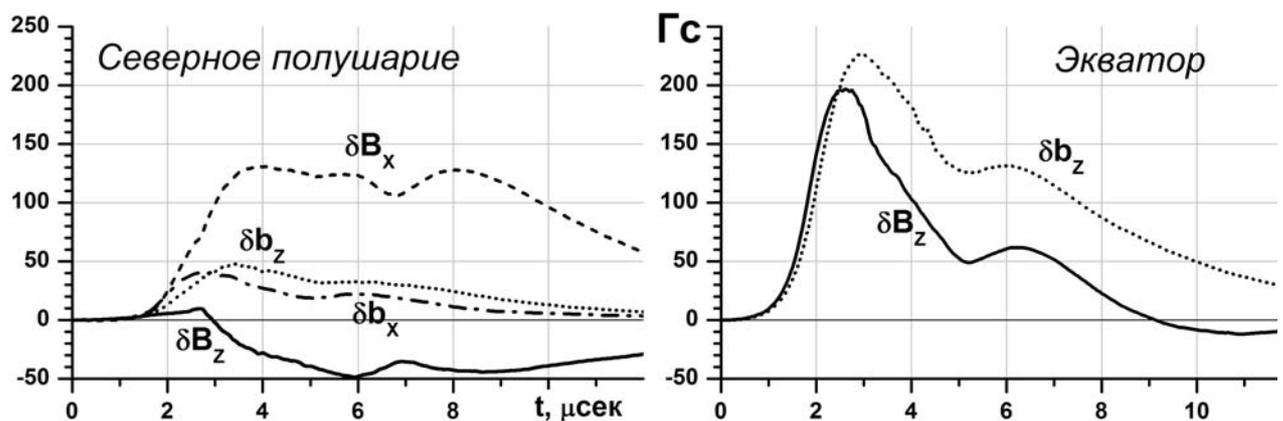


Рисунок 3. Динамика вариации магнитного поля над Северным полюсом (левая панель) и на экваторе (правая панель) для случая проводящей поверхности диполя (сплошные линии для компоненты δB_z ; пунктирные для δB_x) и для диэлектрической поверхности (точечные линии для компоненты δb_z ; точка-пунктирная для δb_x).

В подразделе 3.2.4 обобщаются результаты раздела 3.2 о подобии физических характеристик и свойств наблюдаемых полярных токов в лабораторной магнитосфере с токами зоны-1 на Земле. Приводится обобщенная формула максимального вклада продольных токов в магнитосферное поле на полюсах, и делается сравнение с экспериментом, магнитосферами Земли и Меркурия.

В разделе 3.3 излагаются экспериментальные данные, недоступные до настоящего времени для Земли и подтверждающие самые главные предположения, на которых основана модель магнитосферного МГД генератора, действующего в низкоширотном

погранслое. В подразделе 3.3.1 приводятся данные измерений трансполярного потенциала от скорости и концентрации плазмы набегающего потока. Показано, что трансполярный потенциал пропорционален энергии ионов, что совпадает с наблюдениями для Земли. Подробные измерения потенциала плазмы в экваториальной плоскости вдоль линии утро-вечер обнаружили, что на внутреннем крае переходного слоя имеется повышение потенциала в утреннем секторе и примерно симметричное понижение потенциала в вечернем секторе. Эта разница в потенциале плазмы на низких экваториальных широтах примерно соответствует разности потенциалов, измеренной непосредственно на полюсах диполя. По совокупности измерений сделан вывод, что источники ЭДС образуются движением плазмы поперек магнитного поля. Они располагаются в низкоширотном переходном слое, а их потенциал передается по силовым линиям на полюса диполя.

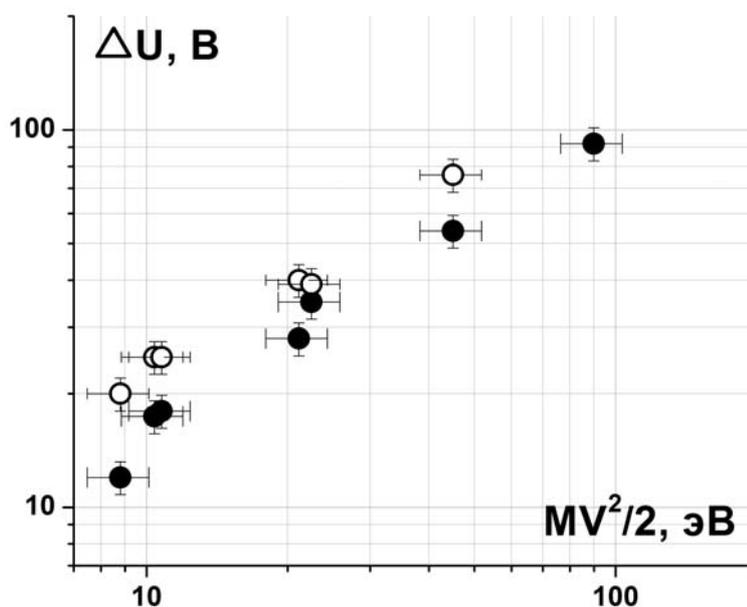


Рисунок 4. Зависимость разности потенциалов между утренней и вечерней стороной диполя от энергии ионов в потоке плазмы для двух магнитных моментов диполя, 1.25 (●) и $3.9 \cdot 10^5$ Гс·см³ (○).

В подразделе 3.3.2 исследуются проявления продольных токов непосредственно в области их формирования – низкоширотном погранслое. Данные об этом для магнитосферы Земли отсутствуют. Измерения с проводящей и диэлектрической поверхностью диполя при разных направлениях дипольного момента показали, продольные токи проявляются как азимутальная компонента поля, сосредоточенная вблизи погранслоя и имеющая квадрупольную пространственную структуру, так что меняет знак при пересечении как меридиональной, так и экваториальной плоскости.

В разделе 3.4 изложены результаты эксперимента по измерению внутреннего сопротивления магнитосферного МГД генератора и развита соответствующая физическая

модель. Если в предыдущих разделах лабораторные исследования были направлены на подтверждение адекватности лабораторного моделирования продольных токов и на подтверждение известных свойств магнитосферного МГД генератора, то в данном разделе делается шаг вперед, и ставится вопрос о главной характеристике генератора. В **подразделе 3.4.1** для определения внутреннего сопротивления изложены измерения полного продольного тока в режиме закоротки полярных сегментов, моделирующих бесконечно проводящую ионосферу, и трансполярного потенциала в режиме разрыва цепи и отсутствия продольных токов. Расчеты методом наименьших квадратов показали, что в широком интервале времени взаимодействия лазерной плазмы с магнитным диполем индуктивность и сопротивление цепи имеют практически постоянное значение, несмотря на значительные изменения в протекающем продольном токе.

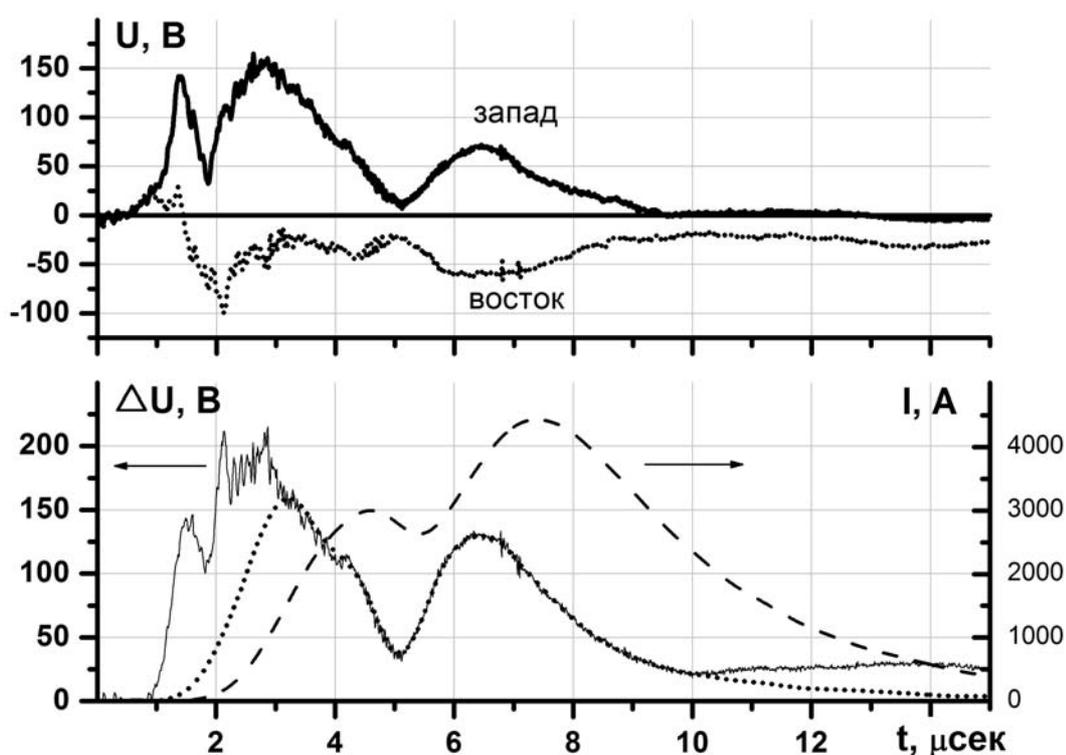


Рисунок 5. Верхняя панель – динамика напряжения на утренней и вечерней пластине, измеренная в режиме разрыва цепи. Нижняя панель: разность потенциалов между пластинами (сплошная линия) и полный ток между пластинами (штриховая). Пунктирная линия показывает напряжение, соответствующее эффективному сопротивлению и индуктивности цепи.

В **подразделе 3.4.2** развита модель на основе предположения, что насыщение генератора и максимальный продольный ток определяются конечным запасом кинетической энергии, которая обеспечивается движением плазмы поперек магнитного поля в погранслое. Учет тормозящей силы, создаваемой продольным током в погранслое, который в свою очередь генерируется фланговым движением плазмы, приводит к

уменьшению скорости и, в свою очередь, тока. Эта обратная связь выражается через величину, которую можно интерпретировать как внутреннее сопротивление генератора, пропорциональную скорости Солнечного Ветра V , ширине погранслоя Δ и обратной величине характерного размера магнитосферы L_m , $R_{gen} = 4\pi V/c^2 \cdot (\Delta/L_m)$. Физически, данное сопротивление можно также найти как трансполярный потенциал в режиме отсутствия нагрузки деленный на продольный ток насыщения в режиме закоротки $U = I \cdot \tilde{R} + \tilde{L} \cdot dI/dt$. Трансполярный потенциал $U = VB\Delta/c$ пропорционален скорости плазмы, магнитному полю в погранслое B и ширине погранслоя. В свою очередь, ток насыщения определяется из условия полного торможения флангового движения, и оказывается равен интегральному току Чепмена-Ферраро, создающему магнитосферу $I_{sat} = cBL_m/4\pi \approx I_{CH}$. Индуктивность цепи \tilde{L} задается геометрией токовой петли.

Величина внутреннего сопротивления магнитосферного МГД генератора, рассчитанная по условиям проведенных опытов R_{gen} совпала с измеренной \tilde{R} , что является экспериментальным подтверждением модели. Для условий Земли данное сопротивление оценивается как 0.004 Ом. Это гораздо меньше интегрального сопротивления Педерсена ионосферы 0.1-0.5 Ом. Основной вывод исследования заключается в том, что практически всегда магнитосферный МГД генератор Земли в погранслое работает как источник напряжения. Величина трансполярного потенциала в спокойных условиях составляет 10 кВ, а полного продольного тока 100 кА. Из этого следует, что трансполярный потенциал и ток растут со скоростью СВ и с давлением (концентрацией) как $\sim Vp^{1/2} \sim V^2 n^{1/2}$. Такие зависимости качественно и количественно соответствуют наблюдениям, если рассматривать статистику при отсутствующем или умеренном фиксированном ММП. В период активности эти величины могут вырастать до 80 кВ и 800 кА соответственно. Учитывая, что максимальные наблюдаемые для Земли значения равны порядка 100 кВ и 3000 кА, МГД генератор в погранслое может давать заметный вклад наряду с другими механизмами, такими как пересоединение при наличии южного ММП. Необходимость учета, наряду с магнитным пересоединением, других источников подтверждается наземными наблюдениями.

Глава 4. Моделирование магнитодиска горячих экзопланет

В главе 4 описан лабораторный эксперимент по демонстрации формирования магнитодиска в условиях истечения плазмы в дипольном магнитном поле. В разделе 4.1

описываются физические характеристики Горячих Юпитеров – газовых гигантов, вращающихся на экстремально близких орбитах вокруг родительской звезды. Предыдущие исследования, в том числе методами численного моделирования, показали, что под действием ионизирующего излучения звезды верхняя атмосфера таких планет будет нагреваться до температуры порядка 10000 К, в результате чего образуется планетарный ветер. Истекающий поток на нескольких радиусах планеты становится сверхзвуковым и в значительной степени ионизованным.

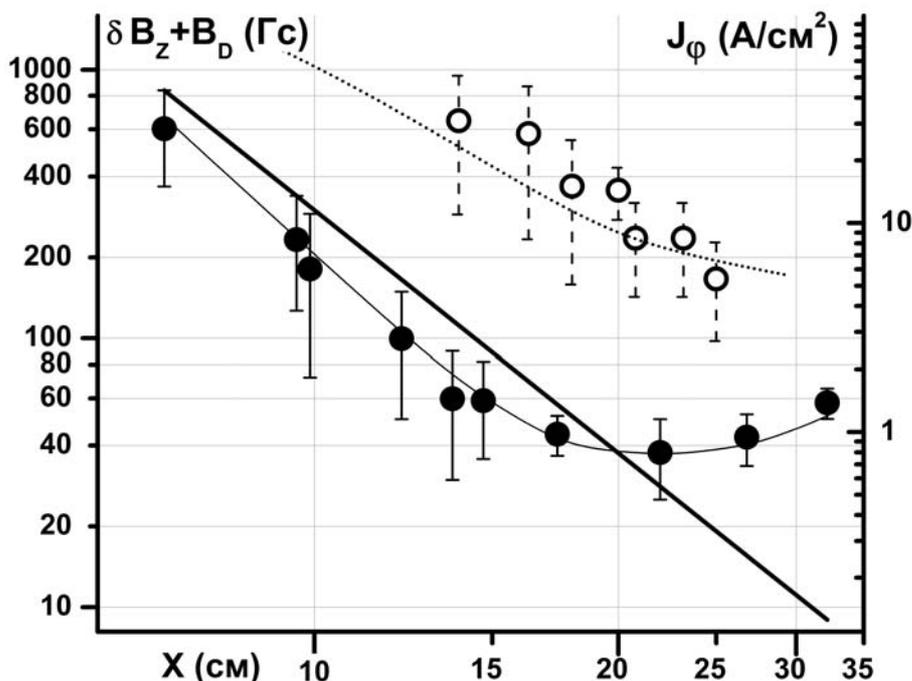


Рисунок 6. Левая ось ординат: радиальный профиль величины полного магнитного поля (●), измеренный в экваториальной плоскости. Прямая линия показывает величину исходного дипольного поля. Правая ось: плотность тока в плазме по данным пояса Роговского (○). Точечная линия – оценка тока из данных магнитных измерений.

Другим важным аспектом Горячих Юпитеров, который обсуждается в разделе 4.1, является взаимодействие планетарного ветра с магнитным полем планеты. По аналогии с Юпитером Солнечной системы в работах Ходаченко и Алексева с соавторами было сделано предположение о формировании в таких условиях тонкого экваториального токового слоя – магнитодиска. При этом механизмом формирования, в отличие от Юпитера, может быть радиальное истечение плазмы, а не быстрое вращение планеты. Вопрос существования магнитодиска для Горячих Юпитеров актуален для построения полной картины его взаимодействия со звездным ветром, размера его магнитосферы, степени защищенности и реальной потери массы. В заключение **раздела 4.1** обсуждается

значение лабораторного эксперимента по демонстрации формирования магнитодиска для построения модели Горячих Юпитеров.

В **разделе 4.2** описан эксперимент и изложены данные, доказывающие формирование магнитодиска за счет радиального истечения плазмы в окружающее пространство в присутствии дипольного поля. В **подразделе 4.2.1** приведена схема и особенности эксперимента. Используется новый и оригинальный метод формирования симметричного радиального течения плазмы на основе вакуумного разряда вдоль поверхности кабеля. В **подразделе 4.2.2** приведены параметры плазменного потока, создаваемого кольцевым разрядом. В **подразделе 4.2.3** изложены данные по взаимодействию потока с дипольным полем и формированию магнитодиска. В частности, измерения индуцированного магнитного поля вдоль и поперек экваториальной плоскости, азимутального тока в плазме, мгновенные фотографии свечения плазмы. Также приводятся энергетические оценки и расчет индуцированного магнитного момента магнитодиска.

В **разделе 4.3** описаны результаты численного моделирования проблемы в условиях, соответствующих эксперименту. Главным безразмерным параметром задачи является отношение Альфвеновского радиуса при котором достигается равенство давлений плазмы и магнитного поля, к радиусу планеты (диполя), который в обоих случаях был примерно равен трем. Это условие также соответствует величине теплового бета на поверхности планеты примерно равным 0.01. Численное моделирование показало формирование очень тонкого и протяженного экваториального слоя, толщина которого в рамках МГД кода определялось конечным коэффициентом проводимости плазмы. В целом, результаты расчетов и эксперимента показали хорошее качественное и количественное соответствие по величине и масштабу индуцированного магнитного поля.

В **разделе 4.4** обсуждается применимость реализованного эксперимента к натурному явлению, возможные ограничения и делается количественное сравнение основных параметров подобия. В заключении на основе полученных результатов делается оценка о возможном влиянии магнитодиска на размер магнитосферы Горячего Юпитера.

Глава 5. Мини-магнитосфера

В **разделе 5.1** обсуждается проблематика мини-магнитосферы как объекта с характерным масштабом ионной плазменной длины и ионного гирорадиуса. Рассматриваются доступные данные по магнитным Лунным аномалиям, а также результаты численных исследований гипотетической магнитосферы вокруг астероидов с

остаточным магнетизмом. Формулируются стоящие вопросы, которые удастся разрешить, только если перейти от МГД описания плазмы к Холловской МГД.

Мини-магнитосфера над Лунными магнитными аномалиями представляет интерес как возможная естественная защита от Солнечного Ветра, и измерения обнаруживают единичные примеры понижения концентрации электронов над некоторыми из них. Необъясненной остается природа так называемых внешних магнитных усилений LEME – наблюдаемых спутниками на высотах до 100 км над рядом магнитных аномалий значительное 2 ÷ 3 кратное усиление магнитного поля СВ. Также неясной остается роль ионов, отраженных как непосредственно от поверхности, так и магнитно отраженных от интенсивных полей вблизи поверхности, что было зарегистрировано в ряде последних лунных миссий.

Наиболее систематические и физически однозначные результаты по мини-магнитосфере были получены в численном моделировании взаимодействия СВ с намагниченными малыми телами. Было обнаружено, что сильное возмущение вверх по потоку, подобное магнитосферной головной ударной волне появляется, только когда расстояние до точки баланса давлений превышает ионную плазменную длину. Параметрическое исследование 3-х мерным гибридным кодом обнаружило, что ионы останавливаются в расчетной точке баланса давлений в случае, когда ионная плазменная длина мала, и на радиусе Штермера в ином случае с резким переходом между этими пределами.

В заключение вводного раздела кратко изложена разработанная автором модель мини-магнитосферы, основанная на учете в законе Ома Холловского члена. В дальнейших разделах модель подтверждается данными лабораторных экспериментов и численного моделирования. Суть ее в том, что движение ионов и электронов в пограничном слое и внутри мини-магнитосферы происходит по существенно различным траекториям. Подобный двухжидкостный эффект на масштабе ионной плазменной длины был ранее обнаружен в проблеме магнитного пересоединения, в которой учет Холловского члена позволил разрешить давнюю проблему локализации диффузионной области.

В разделе 5.2 описываются эксперименты по исследованию фронтальной части мини-магнитосферы в широком диапазоне Холловского параметра. Холловский параметр определяется как отношение расчетного расстояния до точки остановки плазмы по балансу давлений $L_M = \sqrt[6]{\mu^2 / 2\pi n_i m_i V_0^2}$ к ионной плазменной длине в потоке $L_{pi} = c/\omega_{pi}$. Представлены фронтальные профили магнитосферы, полученные при четырех значения Холловского параметра, различающихся на порядок величины, от

существенно меньше до значительно больше единицы. Обнаружилось, что по мере уменьшения Холловского параметра расстояние до магнитопаузы во фронтальном направлении все больше удаляется от расчетной точки баланса давлений. При этом плазма проникает через магнитопаузу все глубже внутрь магнитосферы, и в пределе останавливается на границе Штермера минимального приближения в модели движения отдельных ионов в дипольном поле. Для одного из режимов представлена детальная пространственная картина магнитосферы, полученная по данным подробных измерений в экваториальной и меридиональной плоскостях. Построение такой детальной картины позволило впервые обнаружить присутствие глобальной некомпланарной компоненты магнитного поля, направленной перпендикулярно меридиональной плоскости магнитосферы. Характер ее пространственной симметрии невозможно объяснить в рамках МГД подхода, что натолкнуло автора рассмотреть проблему в рамках Холловской МГД.

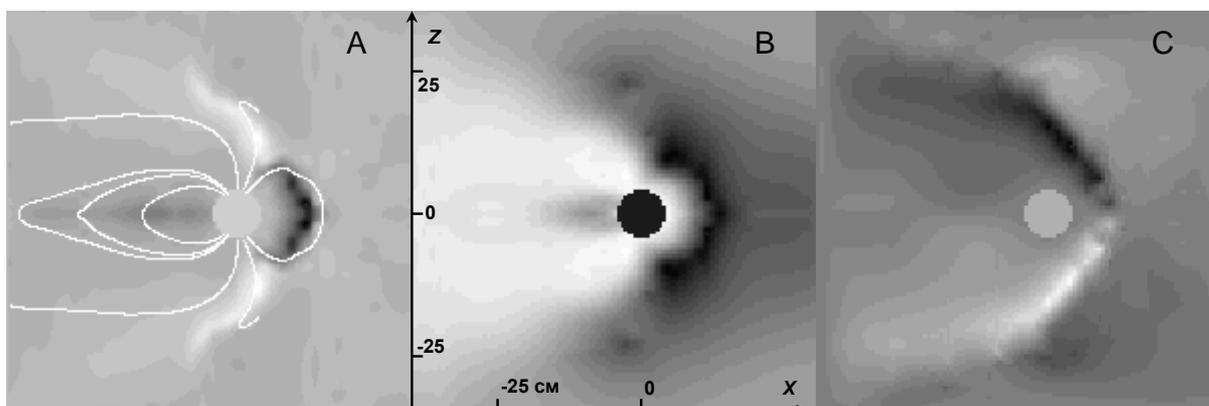


Рисунок 7. Меридиональная структура лабораторной мини-магнитосферы. Пространственный размер области составляет 70×70 см. Круг показывает оболочку диполя.

А – распределение плотности тока J_y (256 градаций серого цвета). Максимально черный (белый) оттенок соответствует величине 96 А/см² (- 40 А/см²).

В – концентрация плазмы n_i . Максимально черный оттенок равен $3.4 \cdot 10^{13}$ см⁻³, белый – нуль.

С – компонента магнитного поля B_y . Максимально черный (белый) оттенок равен ± 54 Гс.

В отдельной серии экспериментов с лазерной плазмой были впервые проведены специальные измерения с нормальным и инвертированным направлением магнитного момента, которые возможно реализовать только в лабораторном эксперименте. Полученные данные подтвердили, что некомпланарная компонента магнитного поля не зависит от направления дипольного момента, и образуется за счет действия квадратичного по полю Холловского члена в законе Ома $\vec{J} \times \vec{B} / n_e c$. Измерение профиля некомпланарной компоненты вдоль оси Z позволило вычислить компоненту электрического тока вдоль направления потока и показать, что она примерно равна ионному току, независимо

измеренному зондом. Из этого следует принципиальный вывод о том, что, не смотря на движение ионов, электроны внутри мини-магнитосферы остаются неподвижными.

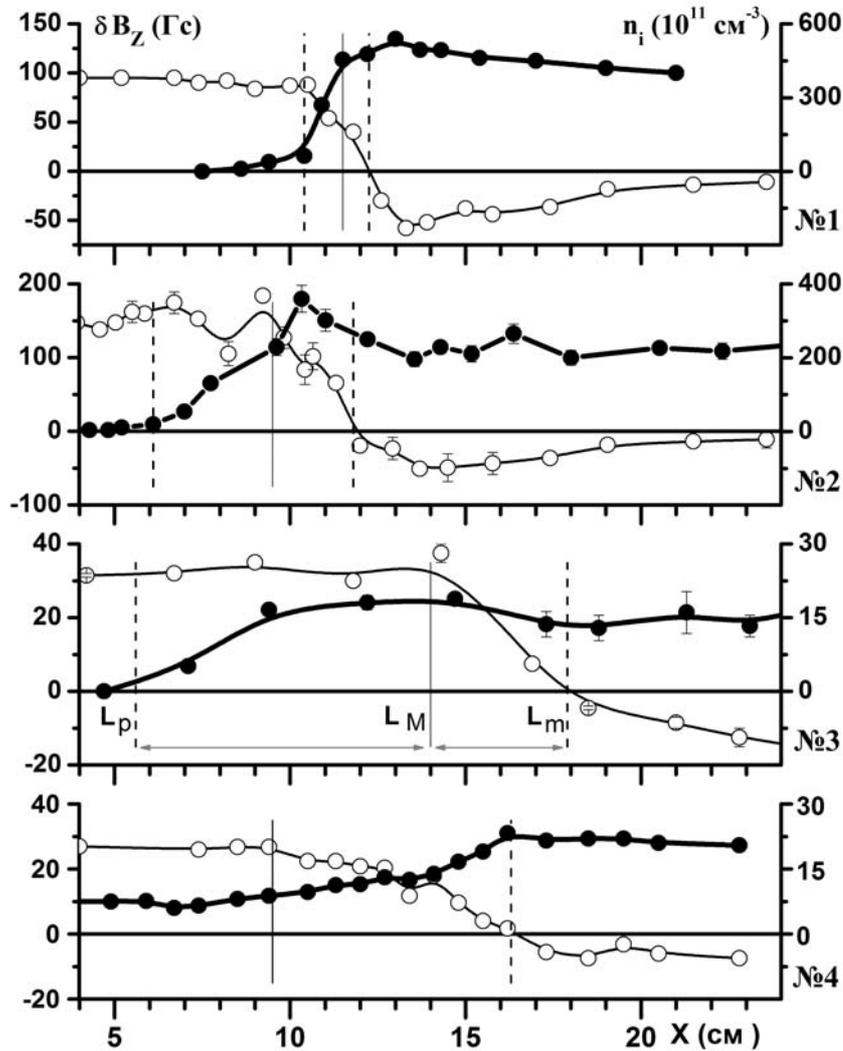


Рисунок 8. Профили магнитного возмущения (○) и концентрации плазмы (●) измеренные в режимах с Холловским параметром, равным 3.3, 1.9, 0.75, 0.4. Тонкая вертикальная линия указывает положение «под-солнечной» точки, вычисленное по теоретической формуле. Пунктирные линии указывают измеренное положение магнитопаузы и границу проникновения плазмы внутри магнитосферы.

В разделе 5.3 проводится предварительный теоретический анализ проблемы и описывается качественная модель, объясняющая наблюдаемые в экспериментах и расчетах свойства мини-магнитосферы действием Холловского члена. Основной вывод модели состоит в том, что проникновение плазмы за магнитопаузу и движение внутри магнитосферы без конвекции дипольного магнитного поля возможно потому, что электроны в этой области, в отличие от ионов, остаются неподвижными. При этом электроны внешнего потока не проникают внутрь магнитосферы, а обтекают ее вдоль

магнитопаузы. Такое движение заряженных частиц формирует Холловский ток, связанный с некомпланарной компонентой магнитного поля. На основе этой картины находится количественная связь между величиной Холловского параметра и такими характеристиками, как степень проникновения ионов внутрь магнитосферы, расстояние от диполя до магнитопаузы и величина некомпланарной компоненты поля.

В разделе 5.4 последовательно выводятся безразмерные уравнения Холловской МГД в применении к проблеме обтекания диполя. Особенностью является учет, в первом приближении, конечной массы электронов. При этом в окончательном виде уравнений электронная жидкость отсутствует, а скорость электронов выражена через электрический ток. Преимущества учета массы электронов в численном моделировании в том, что электронная инерция ограничивает максимальную скорость вистлеров и сглаживает мелкомасштабные вистлерные осцилляции физическим механизмом в отличие от таких искусственных методов, как введение супер-вязкости для подавления неустойчивости в численных схемах с Холловским членом.

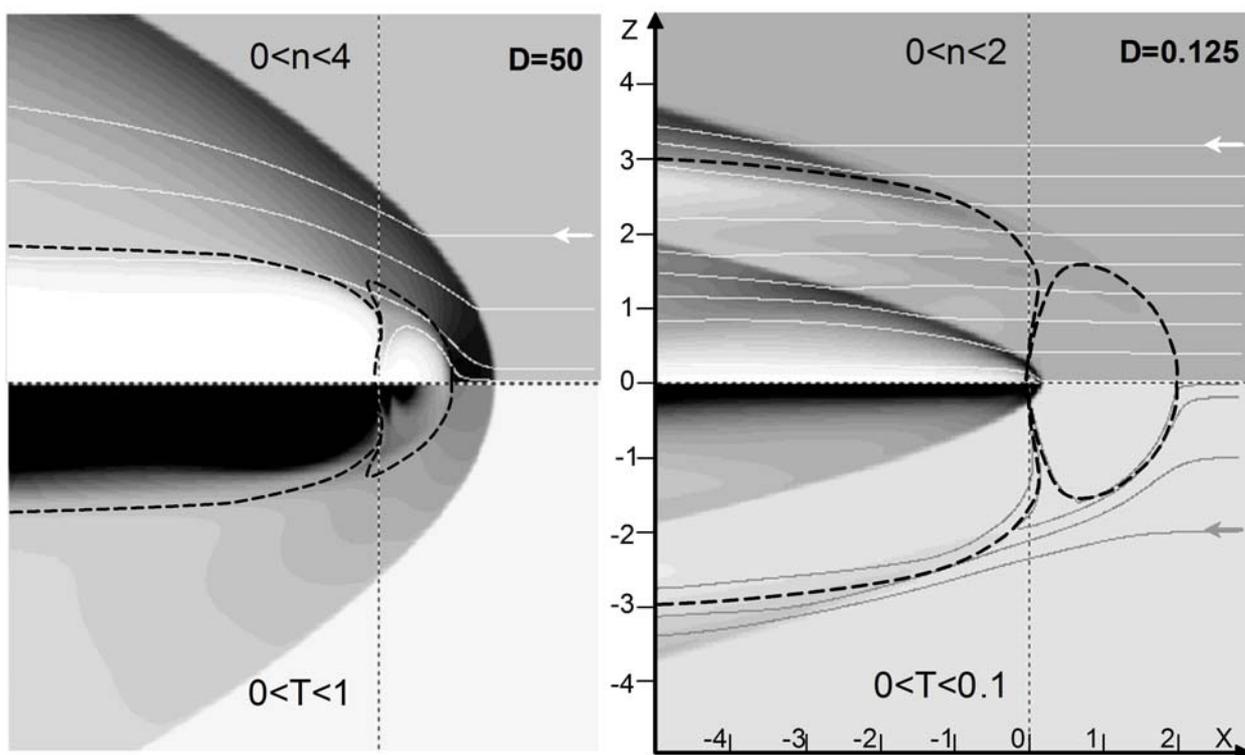


Рисунок 9. Общая структура магнитосферы в МГД режиме (слева) и в Холловском режиме (справа). Показаны распределение концентрации плазмы (верхние половины рисунков) и температуры (нижние половины). Диапазоны указывают на величины, соответствующие максимально белому и черному оттенкам. Также изображены линии течения ионов (сплошные белые) и электронов (сплошные серые), и магнитопауза (пунктирная черная линия).

В разделе 5.5 приводятся результаты численного моделирования обтекания диполя в зависимости от величины Холловского параметра. Показана структура магнитосферы в МГД режиме, когда двухжидкостные эффекты пренебрежимо малы, и в режиме, когда двухжидкостные эффекты за счет Холловского члена являются преобладающими. В первом случае формируется ударная волна и магнитопауза, которая располагается очень близко к расчетной точке баланса давлений. Во втором случае ударная волна отсутствует, магнитопауза обнаруживается заметно дальше расчетной точки, а плазма проникает глубоко внутрь магнитосферы и останавливается на границе Штермера.

Распределение некомпланарной компоненты магнитного поля показывает очень хорошее качественное и количественно с экспериментом. Анализ данных численных расчетов показывает, что гипотеза о неподвижности электронов внутри мини-магнитосферы полностью подтверждается. Зависимость основных параметров магнитосферы от величины Холловского параметра – положение магнитопаузы, точка остановки плазмы внутри магнитосферы, степень торможения ионов токами магнитопаузы и величина некомпланарной компоненты – оказалась в хорошем количественном согласии с аналитическими формулами и качественном соответствии с экспериментальными данными.

Численная модель показала, что в отсутствие межпланетного магнитного поля в хвосте мини-магнитосферы доминирует некомпланарная компонента магнитного поля, а не компонента направленная вдоль хвоста как у планетарных магнитосфер. Это необычное свойство может иметь важное значение при интерпретации будущих спутниковых наблюдений.

Численная модель позволила рассмотреть влияние на мини-магнитосферу замороженного магнитного поля в потоке. Показано, что на масштабе магнитосферы основные свойства взаимодействия практически не меняются. Однако в присутствии ММП кардинально меняется хвост, который деградирует в вистлерные и магнитозвуковые осцилляции. Другая интересная черта, которая находит подтверждение в измерениях над Лунными магнитными аномалиями, состоит в образовании стоячей вистлерной волны, уходящей на большие расстояния вверх по потоку.

В разделе 5.6 обсуждаются и делаются выводы по результатам экспериментов, численных расчетов и предсказаний аналитической модели. В частности, объясняются результаты предыдущих численных расчетов, в которых наблюдалось исчезновение головной ударной волны при увеличении ионной плазменной длины. Делается предположение, что внутренняя фронтальная часть мини-магнитосферы содержит популяцию электронов, в которой могут развиваться различные неустойчивости и

осцилляции, и что при пересечении хвоста мини-магнитосферы должно наблюдаться сложное трехмерное вращение вектора магнитного поля.

В разделе 5.7 описывается эксперимент, в котором исследовались черты, предсказанные ранее на основе численных расчетов и аналитической модели мини-магнитосферы. При значении Холловского параметра меньше единицы были сделаны подробные измерения потока ионов и вектора магнитного поля при пересечении зондом хвоста магнитосферы в меридиональной плоскости. Новым экспериментальным фактом стало обнаружение внутри фронтальной магнитосферы и в центральном токовом слое хвоста интенсивных нижегибридных осцилляций.

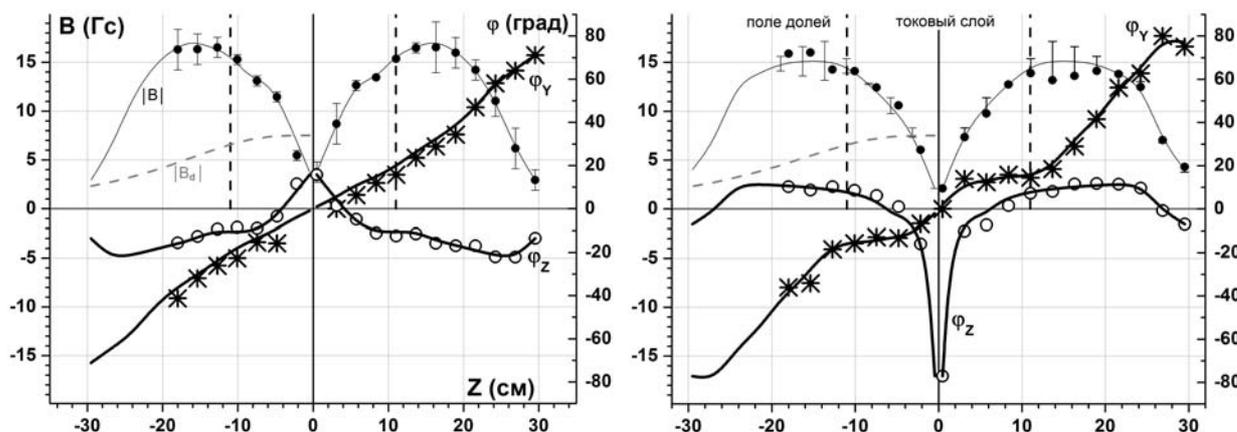


Рисунок 10. Профили полного поля (●) и углов отклонения ϕ_Y (*) и ϕ_Z (○) вектора поля, измеренные вдоль оси Z при $X=-20$ см для нормальной (левая панель) и инвертированной (правая панель) ориентации дипольного момента. Пунктирная линия показывает величину дипольного поля.

В разделе 5.8 на основе полученных данных делаются обобщающие выводы. Подробные измерения профиля некомпланарной компоненты магнитного поля показали, что на оси X соответствующий электрический ток J_x примерно равен по величине ионному току в невозмущенном потоке как впереди, так и позади диполя. Таким образом, предположение о том, что электроны внутри мини-магнитосферы остаются неподвижными, не смотря на движение ионов, было детально подтверждено экспериментально. Измерения в хвосте обнаружили, что мини-магнитосфера обладает выраженным хвостом с долями и центральным токовым слоем. Отличие от планетарных магнитосфер состоит в том, что как было предсказано моделью и расчетами, вектор магнитного поля совершает в меридиональной плоскости трехмерное вращение. Этот факт будет иметь важное значение в будущих спутниковых миссиях к малым телам с

остаточным магнетизмом. Построенное по измерениям распределение интенсивности нижнегибридных осцилляций показало, что их генерация не связана с областями максимального магнитного поля или наименьшей концентрации плазмы, а наблюдаются там, где электроны плазмы остаются неподвижными на фоне пролетных ионов. Это подтверждает предсказание аналитической модели о том, что замкнутая популяция внутренних электронов, разделенная от электронов потока магнитопаузой, может развивать за счет плазменных микро-неустойчивостей отличительные особенности.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 17 статей, входящих в список ВАК и 10 статей в сборниках конференций.

Статьи в журналах, входящих в список ВАК:

1. Shaikhislamov, I. F., V. M. Antonov, Yu P. Zakharov, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, and A. G. Ponomarenko «Laboratory simulation of field aligned currents in an experiment on laser-produced plasma interacting with a magnetic dipole» *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 51, №10: 105005, 2009
2. Shaikhislamov, I. F., Yu P. Zakharov, V. G. Posukh, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. M. Antonov, and A. G. Ponomarenko «Laboratory experiment on region-1 field-aligned current and its origin in the low-latitude boundary layer» *Plasma Physics and Controlled Fusion*, v.53, №3: 035017-30, 2011
3. Антонов В.М., Э.Л. Бояринцев, Ю.П. Захаров, А.В. Мелехов, В.Г. Посух, А.Г. Пономаренко, И.Ф. Шайхисламов «Влияние проводимости поверхности на формирование магнитосферы в экспериментах по обтеканию магнитного диполя лазерной плазмой» *Журнал прикладной механики и технической физики*, 51(5), сс. 25-34, 2010
4. Шайхисламов И.Ф., В.М. Антонов, Э.Л. Бояринцев, В.Г. Посух, А.В. Мелехов, Ю.П. Захаров и А.Г. Пономаренко «Измерение трансполярного потенциала в лабораторной магнитосфере» *Космические Исследования*, Т. 50, № 6, С. 441, 2012
5. Шайхисламов И. Ф., В. М. Антонов, Ю. П. Захаров, Э. Л. Бояринцев, А. В. Мелехов, В. Г. Посух, А. Г. Пономаренко «Продольные токи и магнитосферный МГД генератор в экспериментах по обтеканию магнитного диполя лазерной плазмой» *Космические исследования* т. 52, № 4, с. 296–306, 2014

6. Antonov, V. M., E. L. Boyarinsev, A. A. Boyko, Yu P. Zakharov, A. V. Melekhov, A. G. Ponomarenko, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko, and H. Lammer. «Inflation of a Dipole Field in Laboratory Experiments: Toward an Understanding of Magnetodisk Formation in the Magnetosphere of a Hot Jupiter» *The Astrophysical Journal*, v. 769, №1, pp. 28-38, 2013
7. Shaikhislamov, I. F., V. M. Antonov, Yu P. Zakharov, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, and A. G. Ponomarenko. «Mini-magnetosphere: Laboratory experiment, physical model and Hall MHD simulation» *Advances in Space Research*, v. 52, № 3, pp. 422-436, 2013
8. Shaikhislamov, I. F., Yu P. Zakharov, V. G. Posukh, A. V. Melekhov, V. M. Antonov, E. L. Boyarintsev, and A. G. Ponomarenko. «Experimental study of a mini-magnetosphere» *Plasma Physics and Controlled Fusion*, v. 56, № 2, 025004, 2014
9. Zakharov, Yu P., V. M. Antonov, I. F. Shaikhislamov, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, K. V. Vchivkov, and P. A. Prokopov «Experimental Design and Probe Diagnostics for Simulation of AMS02 - Magnet'effects in Ionospheric Plasma Flow Near International Space Station» *Contributions to Plasma Physics*, v. 51, № 2-3, pp. 182-186, 2011
10. Ponomarenko, A. G., Yu P. Zakharov, H. Nakashima, V. M. Antonov, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov, T. Muranaka, and S. A. Nikitin. «Laboratory and computer simulations of the global magnetospheric effects caused by anti-asteroidal explosions at near-Earth space» *Advances in Space Research*, 28, №8: 1175-1180, 2001
11. Ponomarenko, Arnold G., Yuri P. Zakharov, Vladimir M. Antonov, Eduard L. Boyarintsev, Alexandr V. Melekhov, Vitaliy G. Posukh, Ildar F. Shaikhislamov, and Konstantin V. Vchivkov «Laser plasma experiments to simulate coronal mass ejections during giant solar flare and their strong impact on magnetospheres» *Plasma Science, IEEE Transactions*, 35, №4: 813-821, 2007
12. Ponomarenko, A. G., Yu P. Zakharov, V. M. Antonov, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov, and K. V. Vchivkov «Simulation of strong magnetospheric disturbances in laser-produced plasma experiments» *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 50, №7: 074015, 2008.
13. Shaikhislamov I.F. «Collapse of the neutral current sheet and reconnection at micro-scales» *Journal of Plasma Physics* 74, №2, с. 215-232, 2008
14. Антонов В.М., Э.Л. Бояринцев, А.В. Мелехов, В.Г. Посух, А.Г. Пономаренко, И.Ф. Шайхисламов «Измерение зарядового состава ионов в экспериментах по взаимодействию потока лазерной плазмы с импульсной газовой струей» *Журнал прикладной механики и технической физики*, 50(3), с. 36-43, 2009

15. Shaikhislamov, I. F. «Hall dynamics and resistive tearing instability» *Journal of Plasma Physics* (70) 05 pp. 599-611 (2004)
16. Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Sasunov, Y. L., Lammer, H., Kislyakova, K. G., & Erkaev, N. V. «Atmosphere Expansion and Mass Loss of Close-orbit Giant Exoplanets Heated by Stellar XUV. I. Modeling of Hydrodynamic Escape of Upper Atmospheric Material» *The Astrophysical Journal*, 795(2), 132, 2014
17. Shaikhislamov I F, Yu P Zakharov, V G Posukh, A V Melekhov, V M Antonov, E L Boyarintsev and A G Ponomarenko «Laboratory model of magnetosphere created by strong plasma perturbation with frozen-in magnetic field» *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56, 125007, 2014

Публикации в трудах конференций:

1. Ponomarenko, A. G., Yu P. Zakharov, V. M. Antonov, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov, and K. V. Vchivkov. "Laboratory simulation of very strong magnetosphere's compression by giant Solar flare's plasma, supplying a SEP's trapping and other world-wide effects." *Proceedings of the International Astronomical Union*, vol. 233, p. 389. Kluwer Academic Publishers, 2006
2. Zakharov, Yu P., V. M. Antonov, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov, K. V. Vchivkov, H. Nakashima, and A. G. Ponomarenko. "New type of laser-plasma experiments to simulate an extreme and global impact of giant coronal mass ejections onto earth' magnetosphere." *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 112, № 4, p. 042011. IOP Publishing, 2008
3. Zakharov, Yu P., V. M. Antonov, E. Boyarintsev, K. V. Vchivkov, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov, A. G. Ponomarenko, I. S. Veselovsky, and A. T. Lukashenko. "On the interaction effects of ionospheric plasma with dipole magnetic field of the spectrometer AMS-02 moving onboard of international space station." *In Space Science and Communication*, 2009. *Icon Space 2009. International Conference on*, pp. 96-101. IEEE, 2009
4. Shaikhislamov, I. F., Yu P. Zakharov, V. G. Posukh, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. M. Antonov, and A. G. Ponomarenko. "Region-1 field aligned currents in experiments on laser-produced plasma interacting with magnetic dipole." *Proceedings of the International Astronomical Union*, 6, №S274: 40-43, 2010
5. Shaikhislamov, I. F., V. M. Antonov, E. L. Boyarinsev, Y. P. Zakharov, A. V. Melekhov, A. G. Ponomarenko, and V. G. Posukh. "Investigation of planetary magnetospheres in

- laboratory experiments." EPSC-DPS Joint Meeting 2011, Nant, France 2-7 Oct, v.1, p. 76, 2011
6. Shaikhislamov, I. F., V. M. Antonov, Y. P. Zakharov, E. L. Boyarinsev, V. G. Posukh, A. V. Melekhov, and A. G. Ponomarenko. "Investigation of Region-1 field aligned current of planetary magnetospheres in laboratory experiments." EPSC-DPS Joint Meeting 2011, v.1, p. 78. 2011
 7. Shaikhislamov, I. F., Y. P. Zakharov, V. M. Antonov, E. L. Boyarinsev, V. G. Posukh, A. V. Melekhov, and A. G. Ponomarenko. "The physics of mini-magnetosphere: laboratory experiment, numerical simulation and analytical model." In EPSC-DPS Joint Meeting 2011, Nant, France 2-7 Oct, v.1, p. 77. 2011
 8. Antonov V. M., E. L. Boyarinsev, Yu. P. Zakharov, A. V. Melekhov, A. G. Ponomarenko, V. G. Posukh, I. F. Shaikhislamov and M.L. Khodachenko «Inflation of dipole field in laboratory experiments for simulation of Hot Jupiter magnetosphere» International symposium EPSC 2012, Madrid, Spain, 23-78 Sep, v.7, N149, 2012
 9. Shaikhislamov I. F., Yu. P. Zakharov, V. M. Antonov, E. L. Boyarinsev, V. G. Posukh, A. V. Melekhov and A. G. Ponomarenko «Small-scale magnetosphere: what can be learned from laboratory experiments?» International symposium EPSC 2012, Madrid, Spain, 23-78 Sep, v.7, 148, 2012
 10. Khodachenko, M., Belenkaya, E., Alexeev, I., Shaikhislamov, I., Sasunov, Y., Voeroes, Z., & Lammer, H. «Characterization of exo-planetary magnetic fields and magnetospheres: Atmosphere mass loss and magnetospheric protection» In 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract C3. 2-31-14. (Vol. 40, p. 1474), 2014

Подписано к печати 15.10.2014. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Печ. л. 2,00.
Тираж 100 экз. Заказ 3010.

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1
Тел. (383) 3302698