



УТВЕРЖДАЮ
директор ИКИ РАН
академик

Зелёный Л. М.

«5» *июля* 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Шайхисламова Ильдара Фаритовича**
«Лабораторное моделирование магнитосферных процессов»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.04.21 - Лазерная физика

Диссертационная работа И.Ф. Шайхисламова посвящена вопросам лабораторного моделирования плазменных систем, имеющих прямые аналоги в магнитосферной физике. Серия лабораторных экспериментов процесса взаимодействия потока лазерной плазмы и магнитного диполя позволила автору диссертации воспроизвести с хорошей точностью достаточно сложные нелинейные процессы, относящиеся к внутренней структуре магнитосфер планет (формирование систем параллельных токов), и процессы формирования и динамики самих магнитосфер на примере магнитосферы «горячего Юпитера» и мини магнитосферы малого замагниченного тела, взаимодействующего с солнечным ветром. Вопросы, исследуемые автором, стоят в списке наиболее значимых проблем современной магнитосферной физики (и астрофизики, в случае экзопланет). Над теоретическим и экспериментальным решением каждой из данных проблем работают отдельные институты и крупные коллаборации, регулярно запускаются спутники (например, многоспутниковая миссия “Swarm” исследует процессы формирования систем параллельных токов; орбитальный телескоп Kepler регистрирует признаки наличия планет вне Солнечной системы). При этом заметный недостаток экспериментальной информации и существенные ограничения современных численных моделей делают лабораторный эксперимент важным источником данных о плазменных системах и их эволюции. В рамках диссертации И.Ф. Шайхисламов проводит детальный анализ трёх

магнитоплазменных систем, моделирование которых в лабораторном эксперименте даёт возможность исследовать их структуру и динамику в широком диапазоне параметров и с хорошей повторяемостью результатов измерений (именно эти возможности отсутствуют у спутниковых наблюдений).

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

Введение диссертации фактически состоит из трёх глав: **«Введение»**, Главы 1 **«Лазерная плазма и лазерный стенд КИ-1»** и Главы 2 **«Принципы лабораторного моделирования плазменных процессов в космосе»**. Во «Введении» автор приводит краткое описание особенностей лазерной плазмы и перечисляет возможности её применения в рамках решения различных научных задач. Также раздел содержит краткое описание особенностей магнитосферной плазменной системы, её основных элементов и роли взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем планеты в формировании магнитосферы. Отдельное внимание уделено вопросу формирования магнитосфер у компактных объектов, размеры которых сопоставимы с кинетическими масштабами заряженных частиц плазмы. Обсуждается вопрос формирования магнитосфер у малых тел с остаточным или искусственным магнетизмом. В заключительной части раздела «Введение» даётся краткое описание возможностей лабораторного моделирования магнитосферных процессов. Приводится общая характеристика и краткое содержание диссертации. В первой главе диссертации «Лазерная плазма и лазерный стенд КИ-1», которую также можно отнести к введению, автор описывает лазерный стенд КИ-1 (включая лазерный комплекс ЛУИ-2М), работающий в Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, и параметры лазерной плазмы, получаемой и используемой на установке КИ-1 для моделирования магнитосферных процессов. Формирование лазерной плазмы происходит при облучении твердой мишени излучением с характерной длительностью 100 нс и полной энергией до 400 Дж. Скорость сформированной таким образом лазерной плазмы составляет порядка 100 км/с, а общее число ионов порядка 10^{18} частиц. Сфера с магнитным диполем, имитирующим магнитное поле Земли, в лабораторной установке может иметь различные размеры в диапазоне 2.5–15 см и обладать магнитным моментом в диапазоне $10^5 - 10^7$ Гс см³. Ионосфера планеты моделируется либо металлической высокопроводящей поверхностью диполя, либо непроводящей диэлектрической

пленкой. В данной главе также обсуждаются характерные масштабы сформированной магнитосферы и соотношение давления набегающего потока плазмы и магнитного поля диполя.

В Главе 2 автор обсуждает основные принципы лабораторного моделирования космической плазмы в применении к магнитосферным процессам. На основе принципа физического подобия систем имеющих одинаковый набор безразмерных параметров, автор проводит сопоставление лабораторных и космических плазменных объектов. Так, в первом разделе обсуждаются вопросы описания потока плазмы в рамках бесстолкновительной идеальной системы, системы уравнений Холловской МГД и идеальной МГД. Автор диссертации довольно подробно обсуждает допустимость применения метода ограниченного (физического) подобия, согласно которому для безразмерных параметров много больших или много меньших единицы достаточно выдержать качественное соответствие. В во втором разделе приводится список безразмерных величин задачи, включая энергетические параметры, учитывающие специфику взаимодействия расширяющегося облака лазерной плазмы с магнитным диполем. В третьем разделе автор на основе уравнений Холловской МГД выводит несколько безразмерных параметров, – числа Маха и Маха-Альфвена, магнитное число Рейнольдса и число Кнудсена, параметр Холла, относительный размер внутренней границы магнитосферы по сравнению с размером диполя. В заключительном четвертом разделе подробно описываются свойства лабораторной магнитосферы, которые используются в работе. Автор указывает, что магнитосфера, создаваемая лазерной плазмой, имеет характерный размер порядка 10-30 см в зависимости от магнитного момента диполя, а длительность её существования 4-6 мкс, что составляет несколько времен пролета плазмы через фронтальную часть магнитосферы. В этом разделе также приводится список размерных и безразмерных параметров экспериментов, необходимых для сопоставления результатов моделирования с данными спутниковых наблюдений в магнитосферах Земли и Меркурия.

Глава 3 "**Моделирование системы трансполярного потенциала и продольных токов зоны 1**" посвящена моделированию системы трансполярного потенциала и продольных токов зоны 1 в магнитосфере Земли. В первом разделе автор даёт краткое изложение современных данных о трансполярном потенциале и системах продольных токов в магнитосфере Земли по данным спутниковых измерений и теоретических моделей. Описывается модель магнитосферного МГД генератора в пограничном слое. Автор отмечает, что несмотря на большое количество накопленных измерений и результатов численных расчетов, остается ряд нерешенных проблем, связанных со свойствами МГД генератора. Во-первых, отсутствует

подтверждение модели наблюдательными данными непосредственно в области генератора в пограничном слое. Во-вторых, остается открытым вопрос о том, является ли МГД генератор источником напряжения или тока, какова величина максимального тока, и какой механизм определяет насыщение тока. Ответы на данные вопросы позволят более точно оценивать вклад в трансполярный потенциал процесса магнитного пересоединения при наличии ММП южного направления. Во втором разделе 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. Приводится схема и условия соответствующих экспериментов, излагается методика измерения глобального трансполярного потенциала и интегрального продольного тока, которая позволила получить данные, составляющие основу раздела. Описывается методика измерения трансполярного потенциала и трансполярного тока. В результате автор показывает, что величина полного продольного тока сопоставима с величиной интегрального тока Чепмена-Ферраро, создающим магнитосферу. Также в этом разделе описаны результаты спектрального исследования свечения на полюсах диполя, которые показали, что области характерного свечения на металлической поверхности диполя прямо связаны с локальными продольными токами в плазме, и отсутствуют, если отсутствуют такие токи. По результатам исследования сделан вывод, что процессы, сопровождающие протекание электронов в каналах продольных токов физически аналогичны наблюдаемым на Земле. Также приводятся данные, показывающие прямую связь продольных токов с характерными магнитными возмущениями и электрическими полями на полюсах диполя и во фронтальной экваториальной области магнитосферы. В конце раздела 2 сделано обобщение полученных результатов 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 третьем разделе излагаются данные, подтверждающие основные предположения, на которых основана модель магнитосферного МГД генератора, действующего в низкоширотном погранслое. В четвертом разделе приводятся данные измерений трансполярного потенциала в зависимости от скорости и концентрации плазмы набегающего потока. Показано, что трансполярный потенциал пропорционален энергии ионов, что совпадает с результатами спутниковых наблюдений в земной магнитосфере. 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. Также изложены результаты эксперимента по измерению внутреннего сопротивления магнитосферного МГД генератора и развита соответствующая физическая модель. Для определения внутреннего сопротивления были выполнены измерения полного продольного тока в режиме короткого замыкания полярных сегментов, моделирующих бесконечно проводящую ионосферу, и трансполярного потенциала в режиме разрыва цепи и отсутствия продольных токов. В конце четвертого раздела построена модель на основе предположения, что насыщение генератора и максимальный продольный ток определяются конечным запасом кинетической энергии, который обеспечивается движением плазмы поперек магнитного поля в погранслое.

Глава 4 «**Моделирование магнитодиска горячих экзопланет**» посвящена описанию лабораторного эксперимента по демонстрации формирования магнитодиска в условиях истечения плазмы в дипольном магнитном поле. В первом разделе описываются физические характеристики Горячих Юпитеров – газовых гигантов, вращающихся на экстремально близких орбитах вокруг родительской звезды. Важным аспектом Горячих Юпитеров, который обсуждается в этом разделе, является взаимодействие планетарного ветра с магнитным полем планеты. В заключение первого раздела обсуждается значение лабораторного эксперимента по демонстрации формирования магнитодиска для построения модели Горячих Юпитеров. Во втором разделе описан эксперимент и изложены данные, доказывающие формирование магнитодиска за счет радиального истечения плазмы в окружающее пространство в присутствии дипольного поля. Приводится схема и особенности эксперимента, а также параметры плазменного потока, создаваемого кольцевым разрядом и данные по взаимодействию потока с дипольным полем и формированию магнитодиска. В третьем разделе описаны результаты численного моделирования проблемы в условиях, соответствующих эксперименту. В четвертом разделе обсуждается применимость реализованного эксперимента к описанию процессов, происходящих в Горячих Юпитерах, приводятся возможные ограничения и делается количественное сравнение основных параметров подобия. В заключении четвертой главы на основе полученных результатов делается оценка о возможном влиянии магнитодиска на размер магнитосферы Горячего Юпитера.

Глава 5 «**Мини-магнитосфера**» посвящена лабораторному моделированию мини-магнитосфер. В первом разделе обсуждается проблематика мини-магнитосферы как объекта с характерными масштабами, сопоставимыми с масштабом ионной плазменной длины и ионного

гирорадиуса. Рассматриваются доступные данные по магнитным аномалиям на Луне, а также результаты численных исследований гипотетической магнитосферы астероидов с остаточным магнетизмом. Кратко излагается разработанная автором модель мини-магнитосферы, основанная на учете в законе Ома Холловского члена. В дальнейших разделах модель подтверждается данными лабораторных экспериментов и численного моделирования. Во втором разделе описываются эксперименты по исследованию фронтальной части мини-магнитосферы в широком диапазоне Холловского параметра. В третьем разделе 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. В четвертом разделе последовательно выводятся безразмерные уравнения Холловской МГД в применении к проблеме обтекания диполя. Их особенностью является учет, в первом приближении, конечной массы электронов. В пятом разделе 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 шестом разделе обсуждаются выводы, сделанные по результатам экспериментов, численных расчетов и предсказаний аналитической модели. В частности, обсуждаются 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. В последнем разделе главы на основе полученных данных сделаны обобщающие выводы.

Основные результаты работы, прошедшие всестороннее сопоставление со спутниковыми данными, содержатся в Главе 3 «**Моделирование системы трансполярного потенциала и продольных токов зоны 1**» и Главе 5 «**Мини-магнитосфера**». Детальное описание лабораторного моделирования системы параллельных токов, формирующихся во внутренней магнитосфере, позволило автору получить качественные и количественные результаты по МГД генератору таких токов. Измеренные в лабораторном моделировании зависимости перепада потенциала и интенсивности параллельных токов от скорости

набегающего потока плазмы, а также построенная на основе лабораторного моделирования простая модель МГД генератора таких токов, представляют безусловный интерес для магнитосферной физики. Результаты моделирования формирования мини магнитосферы вокруг малых замагниченных тел позволили получить зависимости размеров таких магнитосфер от плазменных параметров набегающего потока вещества. При этом автор с хорошей достоверностью показал, что минимальным теоретическим аппаратом для описания таких систем является Холловское МГД приближение. Как следствие, эффекты двухжидкостной динамики плазмы играют ключевую роль в описании таких объектов и не могут быть проигнорированы в численном эксперименте и в аналитических моделях. Глава 4 «**Моделирование магнитодиска горячих экзопланет**» представляет собой изложение совершенно новых исследований относительно экзотических плазменных систем «Горячих Юпитеров». Результаты, полученные автором в рамках моделирования магнитосфер «Горячих Юпитеров», безусловно, крайне интересны и фактически являются первыми результатами по моделированию таких плазменных систем. Автору удалось вполне достоверно доказать, что для рассматриваемых плазменных систем деформация магнитного поля обеспечивается формированием кинетических плазменных структур (токового слоя), и, как следствие, должна быть предметом рассмотрения кинетической теории плазмы.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнения и обеспечена удачным выбором объектов исследования, которые, с одной стороны, находятся в фокусе внимания магнитосферного сообщества, а с другой стороны именно в лабораторном моделировании для них могут быть получены новые и важные результаты. Так, вопрос генерации и структуры параллельных токов является одним из ключевых вопросов динамики магнитосферы Земли. Интенсивность изучения данной плазменной системы не уменьшается с момента формирования первых представлений о роли параллельных токов в геомагнитных возмущениях более 100 лет назад. Актуальность исследования мини магнитосфер диктуется как задачами относительно прикладного характера (исследования взаимодействия искусственных спутников с собственным магнитным полем и потока плазмы), так и перспективными проектами по освоению Луны. Изучение плазменных систем, относящихся к магнитосферам экзопланет, безусловно, лежит в плоскости перспективных исследований, актуальность которых обеспечена общенаучным интересом к динамике и структуре необычных (не встречающихся в Солнечной Системе) плазменных объектов.

Научная новизна полученных результатов основана на уникальном умении автора диссертации решать одновременно сложные инженерные задачи по лабораторному моделированию плазменных систем и связывать полученные результаты с актуальными задачами космической плазмы. Такие исследования лежат в русле активно развивающегося направления «лабораторной астрофизики», в рамках которого диссертация занимает важное место. **Обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации**, гарантируется всесторонним сопоставлением результатов лабораторного эксперимента и данных спутниковых наблюдений. Кроме того, автор диссертации умело использует относительно несложные численные модели изучаемых плазменных систем, что позволяет проводить дополнительную верификацию результатов лабораторного моделирования. Таким образом, **практическая ценность результатов и их значимость для науки** обеспечена удачным выбором исследуемых плазменных систем, изучение которых важно как для прикладных задач космической плазмы, так и в рамках общенаучных задач, и успешным переносом полученных лабораторных результатов на реальные системы космической плазмы.

Диссертация не лишена недостатков, часть которых, по-видимому, связана с неаккуратным изложением результатов. Так, в диссертации число опечаток и неудачных фраз превышает разумный уровень для текста рассматриваемого объёма. Например, фразы «Солнце влияет на магнитное поле Земли через определенную среду, отличающуюся от света», «вытянутые дипольные силовые линии разной полярности», «Ускоренные вверх сгустки электронов ионосферного происхождения», "...электрическое поле ММП", «картина будет иметь отрывочный и статистический характер», «...используют двухжидкостный режим работы» усложняют чтение диссертации. Кроме того, к полученным результатам и их изложению есть ряд более существенных замечаний.

1) На странице 99 автор обсуждает «различную природу свечения биполярных пятен» в области «полярной ионосферы» в лабораторной установке, однако за рамками рассмотрения остается возможная аналогия с магнитосферными процессами в магнитосфере Земли. Есть ли возможность проведения такой аналогии и насколько она будет обоснована?

2) На странице 102 (последний абзац) описание рисунка 3.15 с возмущениями магнитного поля параллельными токами противоречит данным, показанным на рисунке: в присутствии параллельного тока возмущение поля ΔB_z не всегда положительно, как утверждает автор.

3) Рисунок 3.22 содержит важный и интересный результат зависимости перепада потенциала через полярную шапку от скорости набегающего потока частиц. Однако, за рамками рассмотрения остался вопрос о роли плотности плазмы в формировании данного потенциала. Зависит ли потенциал от энергии частиц в потоке плазмы или от динамического давления потока?

4) На странице 114 приведено «уравнение на скалярный потенциал» (после уравнения 3.1), которое является не уравнением, а определением потенциала. Уравнением для потенциала должно быть уравнение Пуассона.

5) Из описания соотношения между потенциалом и энергией частиц в потоке плазмы (стр. 116) не ясно, какую роль играет «толщина переходного слоя» в формировании этого потенциала и почему автор утверждает, что именно этот параметр отвечает за разницу потенциала в лабораторном моделировании и в реальной магнитосфере Земли.

6) Не совсем понятно, что автор имел в виду под фразой: «...превращения тепловой энергии в кинетическую», когда описывал расширение газа в область, занятую магнитным полем (стр. 147).

7) Рисунок 4.9 содержит интересный результат, доказывающий формирование токового слоя в центральной области магнитосферы «Горячего Юпитера». Однако, автор уклоняется от сопоставления масштаба данной структуры с характерными плазменными масштабами (гирорадиус ионов, инерционная длина ионов). Достаточно ли большой масштаб токового слоя, что бы была возможность использовать МГД моделирование (следующий раздел этой главы) при описании магнитосферы экзопланеты?

8) В контексте исследования магнитосферы Горячего Юпитера, автор не обсуждает важный вопрос формирования баланса давления в магнитосфере Горячего Юпитера. Какая сила компенсирует натяжение силовых линий магнитного поля в отсутствии вращения планеты (в отсутствии центробежных сил)? Каковы оценки на градиент давления плазмы и достаточен ли этот градиент, что бы скомпенсировать силу Лоренца? От ответов на эти вопросы зависит обоснованность выводов о существовании магнитосферного токового слоя (диска), как квазистационарной конфигурации. Отсутствие баланса давления (нескомпенсированность силы Лоренца) должна приводить к быстрой перестройке конфигурации магнитного поля и, как следствие, к разрушению токового слоя.

9) В заключительной главе диссертации, посвященной мини магнитосферам, автор справедливо акцентирует внимание на роли двухжидкостных эффектов в формировании таких

плазменных систем. Однако, за рамками рассмотрения остаются кинетические эффекты. Так, автором показано формирование флуктуаций магнитного поля с масштабами и частотами, близкими к нижнигибридным частотам. Такие флуктуации эффективно взаимодействуют с ионами и способны существенно изменить их энергию на относительно небольших временных интервалах. Однако, данный процесс носит кинетический характер и должен описываться на уровне движения отдельных частиц или решений уравнения Власова. Таким образом, обоснованность выводов о достаточности двухжидкостного МГД для описания рассматриваемой системы требует подтверждения.

Также стоит отметить, что положения, выносимые на защиту, скорее носят описательный характер, и не представляют собой точно сформулированного утверждения. Однако, данный недостаток нивелируется детальными объяснениями и подробным описанием полученных результатов. Перечисленные замечания, носят, скорее редакционный или рекомендательный характер, а возникшие вопросы связаны с тем, что результаты, изложенные в диссертации, являются по-настоящему интересными и новыми. Таким образом, замечания не снижают общего высокого уровня работы.

У ведущей организации не возникло сомнений в важности и актуальности полученных автором результатов для физики космической плазмы. Результаты диссертации опубликованы в 17 работах в рецензируемых журналах, неоднократно докладывались на конференциях и семинарах, проводимых в Институте Космических Исследований РАН. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных учреждениях, занимающихся исследованием процессов и моделями явления в космической плазме: ИКИ, НИИЯФ МГУ, СПбГУ, ПГИ, ИЗМИРАН, ИСЗФ, и др.

Автореферат, полностью и точно отражает содержание диссертации. На основании вышеизложенного можно считать, что диссертация И.Ф. Шайхисламова соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК и является законченной научно-квалификационной работой, а её автор И.Ф. Шайхисламов заслуживает присвоения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

Отзыв ведущей организации составлен доктором физико-математических наук Григоренко Еленой Евгеньевной.

Ведущий научный сотрудник отдела «Физики космической плазмы»
доктор физ. – мат. наук

Григоренко
Елена Евгеньевна

Почтовый адрес: 117997, Москва, ул. Профсоюзная 84/32
Телефон: 8 (495) 333-32-67

Адрес электронной почты: <http://www.iki.rssi.ru> (iki@cosmos.ru)

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук