

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ. ЛАЗЕРНАЯ ПЛАЗМА

Захват магнитного поля диполя лазерной плазмой

М.А.Ефимов, А.А.Чибранов, А.Г.Березуцкий, М.С.Руменских, В.Г.Посух, Ю.П.Захаров, Э.Л.Бояринцев, П.А.Трушин, Е.В.Смолина, И.Б.Мирошниченко, И.Ф.Шайхисламов

Описан эксперимент по взаимодействию дипольного магнитного поля с потоком лазерной плазмы, образованной внутри лабораторной магнитосферы. Обнаружено, что такое взаимодействие имеет две динамические фазы: после кратковременного вытеснения дипольного поля лазерной плазмой происходит захват магнитного поля и вынос его за пределы магнитосферы. Полученные данные подтверждают результаты предыдущих измерений, проведенных далеко за пределами магнитосферы, и дают дополнительную информацию о новом процессе захвата дипольного магнитного поля внутренним магнитосферным потоком плазмы.

Ключевые слова: лазерная плазма, магнитное поле, магнитосфера.

1. Введение

Несмотря на бурное развитие методов численного моделирования космической плазмы, лабораторные опыты и экспериментальное подтверждение созданных моделей до сих пор являются основой для изучения физики плазмы. Одна из областей, в которых результаты лабораторных опытов использовались для создания теории и численных моделей, – взаимодействие встречных потоков плазмы в присутствии магнитного поля. В 1970-х–80-х годах был проведен ряд экспериментов с лазерной плазмой, расширяющейся со сверхальфвеновской скоростью в замагниченную фоновую плазму [1–4] с целью моделирования искусственных химических выбросов в магнитосфере Земли. На базе полученных результатов была разработана новая динамическая модель взаимодействия – магнитный ламинарный механизм [5] или взаимодействие в режиме конечного ларморовского радиуса [6]. Эта модель дополнила более раннюю кинематическую модель замещения электронов [7, 8]. Наши недавние эксперименты [9, 10] предоставили подробные данные, подтверждающие обе модели.

Изучение магнитосферы также является одной из областей, в которой широко использовалось лабораторное моделирование. Теоретическая основа была заложена в работах [11–13], а обзор экспериментальных работ дан в [14]. На установке КИ-1 такие исследования проводились с помощью двух генераторов импульсной плазмы – плазмы индукционного Θ -пинча и плазмы, создаваемой CO_2 -лазером, плазменные потоки от которых взаимодействуют с компактными магнитными диполями [15, 16]. Комбинирование двух этих плазменных источников, плазма которых имеет сильно различающиеся энергетические и про-

странственно-временные характеристики, позволило моделировать выбросы в околоземном пространстве и воздействие солнечных выбросов плазмы [17–19]. На основе модельных экспериментов изучались продольные токи, связывающие пограничный слой магнитосферы с полярной ионосферой [20, 21]. Также был смоделирован импульс плазмы солнечного ветра с замороженным поперечным магнитным полем, взаимодействующий с магнитосферой [22]. Поток с поперечным замороженным полем был создан при расширении лазерной плазмы поперек магнитного поля в фоновую плазму, заполняющую вакуумную камеру вдоль линий внешнего магнитного поля до взаимодействия. Такой объект, как мини-магнитосфера, которая потенциально может существовать вокруг намагниченных астероидов и была обнаружена над лунными магнитными аномалиями [23], также изучается на стенде КИ-1. Именно лабораторные эксперименты предоставили необходимые данные для формулировки и проверки модели Холла [24–26], которая объясняет необычные особенности мини-магнитосферы, наблюдавшиеся в более ранних численных расчетах [27, 28]. В одном из последних лабораторных экспериментов зарегистрированы потоки магнитно-отраженных ионов, качественно подобные наблюдаемым над лунными магнитными аномалиями [29].

В эксперименте [30] была исследована принципиально новая комбинация взаимодействующих потоков и магнитного поля. Плазма Θ -пинча заполняла вакуумную камеру и создавала вокруг магнитного диполя магнитосферу с расчетным размером около 30 см. Особенность заключалась в том, что лазерная плазма генерировалась внутри этой магнитосферы на двух мишенях, симметрично расположенных на корпусе диполя (рис. 1). Лазерная плазма двигалась против потока плазмы Θ -пинча и обладала достаточно большой кинетической энергией, чтобы вытеснить дипольное магнитное поле. Постановка подобного эксперимента мотивирована обнаружением новых астрофизических объектов – горячих Юпитеров, обращающихся экстремально близко к звезде и испытывающих сверхзвуковое истечение верхней атмосферы [25]. Взаимодействие расширяющегося планетарного течения с планетарным магнитным полем приводит к разнообразным, ранее не изученным явлениям [31, 32]. Основным энергетическим

М.А.Ефимов, А.А.Чибранов, А.Г.Березуцкий, М.С.Руменских, В.Г.Посух, Ю.П.Захаров, Э.Л.Бояринцев, П.А.Трушин, Е.В.Смолина, И.Б.Мирошниченко, И.Ф.Шайхисламов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15 Б; e-mail: mikle3496@gmail.com

Поступила в редакцию 17 сентября 2020 г., после доработки – 2 декабря 2020 г.

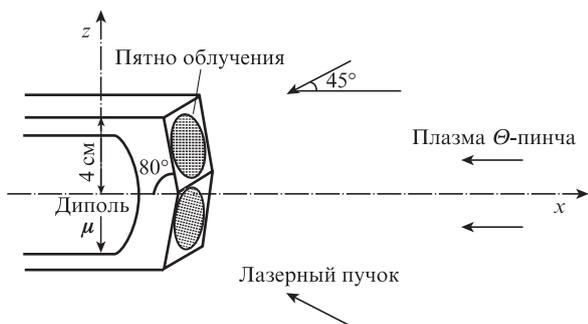


Рис.1. Схема лазерного облучения мишени, расположенной на корпусе диполя.

параметром задачи является положение альфвеновской точки (расстояние, на котором плотность энергии потока плазмы сравнивается с плотностью энергии магнитного поля), измеряемое в единицах радиуса планеты, R_A/R_p . Экспериментальное моделирование истечения плазмы в дипольном поле впервые было выполнено в работе [33] с использованием кольцевого импульсного разряда, при этом реализовано значение $R_A/R_p \approx 3$, соответствующее горячим Юпитерам со значительным магнитным полем. В [30] планетарное течение моделировалось лазерной плазмой и реализованы условия относительно слабого магнитного поля, $R_A/R_p \approx 1$.

В работе [30] измерения зондами проводились далеко за пределами магнитосферы и было обнаружено, что лазерная плазма, проходящая через фоновую плазму, частично вытесняет ее из-за кулоновских столкновений и несет с собой магнитное поле, которое на порядок больше, чем значение поля вакуумного диполя на этих расстояниях. Полученные данные свидетельствуют о новом и неожиданном эффекте захвата магнитосферного поля лазерной плазмой и дальнейшего его «уноса» на далекие расстояния. Отметим, что во всех предыдущих экспериментах при относительно простой геометрии магнитного поля лазерная плазма показывала себя как хороший диамагнетик. Из-за относительно высокой скорости разлета, высоких плотности и температуры на начальной стадии разлета магнитное поле эффективно вытесняется из объема, занимаемого лазерной плазмой. Из сравнения результатов работ [33] и [30] следует, что обнаруженный эффект можно воспроизвести, используя только лазерную плазму.

Для получения дополнительной информации об обнаруженном эффекте в настоящем эксперименте проведены подробные измерения внутри магнитосферы. Результаты измерений подтвердили эффект захвата лазерной плазмой магнитосферного поля и продемонстрировали новые детали того, как это происходит. В частности, установлено, что на фронте лазерной плазмы имеется ожидаемая фаза практически полного вытеснения дипольного поля, которая быстро сменяется фазой захвата магнитного поля.

2. Условия эксперимента и полученные результаты

Опыты проводились на установке КИ-1, которая включает в себя камеру с длиной 500 см и диаметром 120 см, работающую при остаточном давлении 10^{-6} Тор (рис.2). Индукционный Θ -пинч с выходной апертурой диаметром 20 см выбрасывает в течение ~ 100 мкс полностью ионизованную водородную плазму, распространяющуюся вдоль оси камеры. В типичном режиме работы Θ -пин-

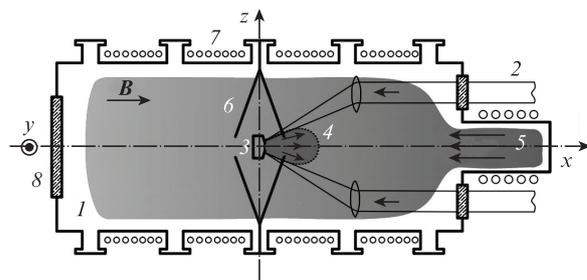


Рис.2. Схема эксперимента:

1 – вакуумная камера; 2 – излучение CO_2 -лазера; 3 – диполь с закрепленной на нем мишенью; 4 – поток лазерной плазмы; 5 – поток фоновой плазмы; 6 – магнитные и электрические зонды; 7 – катушки, создающие внешнее магнитное поле вдоль вакуумной камеры; 8 – смотровое окно; B – магнитное поле.

ча средняя концентрация фоновой плазмы составляла $(5 \pm 2) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а скорость ее движения – $45 \pm 15 \text{ км/с}$. Для стабилизации потока фоновой плазмы вдоль оси камеры генерировалось слабое магнитное поле (5 Гс), которое не вносило заметных эффектов в исследуемые плазменные взаимодействия. Магнитный диполь располагался на расстоянии 290 см от выходного отверстия Θ -пинча. Магнитный момент, величина которого $\mu = 1.1 \times 10^6 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$, был ориентирован перпендикулярно оси камеры. Время поддержания магнитного поля диполя составляло 250 мкс. Диполь имеет форму цилиндра диаметром и высотой 5 см с оксидным покрытием, на котором была закреплена полиэтиленовая мишень. Два пучка излучения CO_2 -лазера с длительностью импульса 70 нс и энергией 150 Дж каждый симметрично фокусировались через систему линз и зеркал в пятна размером около 2 см (рис.1). Схема расположения мишеней на корпусе диполя и их облучение показаны на рис.2. Лазерная плазма генерировалась примерно через 30 ± 5 мкс после начала генерации фоновой плазмы. Использование лазера для создания внутреннего магнитосферного потока плазмы, расширяющегося наружу и вытягивающего силовые линии магнитного поля, имеет принципиальные преимущества. В первых попытках по «раздуванию» дипольного магнитного поля применялся электрический электродный разряд газовой струи [34]. В работе [33] плазма формировалась разрядом вдоль поверхности кабеля, намотанного на корпус диполя. В обоих случаях плотность энергии была относительно мала, разрядная плазма несла сильные паразитные электрические и магнитные поля и токи, связанные с наличием электродов в области взаимодействия. Достижение описываемого ниже эффекта невозможно без использования лазерной плазмы.

Диагностика состояла из совмещенных ленгмюровских и трехкомпонентных магнитных зондов, а также из ионных коллекторов. Основные измерения проводились вдоль оси взаимодействия с перемещением зондов от диполя через магнитосферу и далее в поток фоновой плазмы. Для представления результатов используется так называемая геомагнитная система координат, показанная на рис.1, с осью x , направленной против потока фоновой плазмы (аналога солнечного ветра), и осью z , направленной противоположно магнитному моменту диполя. На рис.3 приведены типичные осциллограммы плотности ионного тока, измеренные зондом Ленгмюра и коллекторами, установленными на разных расстояниях от диполя. На рис.3,а представлены результаты, полученные при наличии толь-

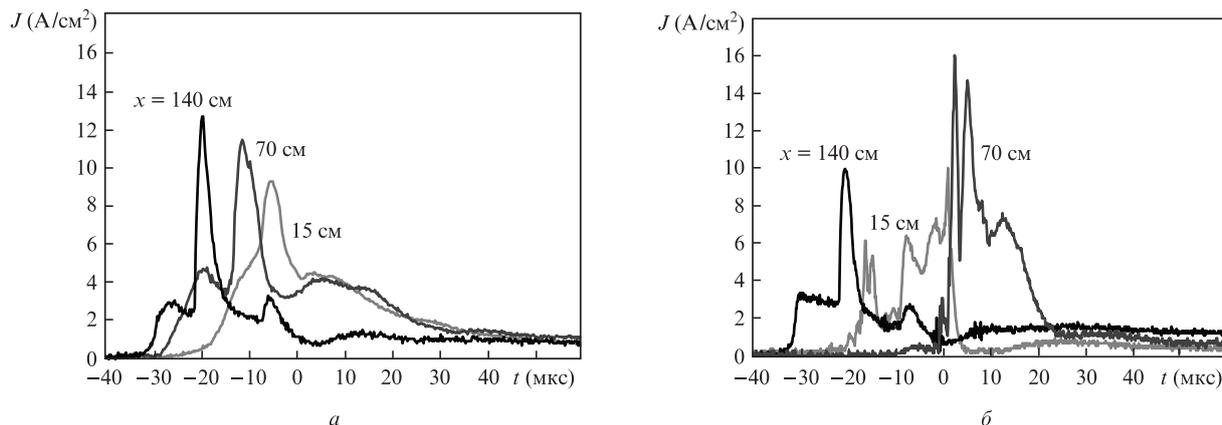


Рис.3. Характерные осциллограммы плотности ионного тока J в плазме, измеренные зондом Ленгмюра на расстоянии $x = 140$ см, а также коллекторами на расстояниях $x = 70$ и 15 см ($a, б$). На рис.3,б коллектор в точке $x = 15$ см смещен по оси y в точку $y = 17$ см, а коллектор в точке $x = 70$ см повернут на 180° в сторону лазерной мишени.

ко фоновой плазмы (лазерная плазма отсутствует, диполь не включен), которые демонстрируют временную динамику потока и позволяют рассчитать его скорость. Отметим, что источник фоновой плазмы (Θ -пинч) расположен на расстоянии $x = 290$ см, поэтому чем дальше зонд удален от диполя, тем ближе он находится к Θ -пинчу. На рис.3,б показаны результаты, полученные в присутствии лазерной плазмы и при включенном диполе. Щель коллектора, установленного на расстоянии $x = 70$ см, была повернута на 180° так, что он регистрирует лазерную плазму, но не видит фоновую. Коллектор в точке $x = 15$ см по-прежнему ориентирован на фоновую плазму, но смещен по оси y в точку с координатой $y = 17$ см, чтобы находиться за пределами магнитосферы. До нулевого момента времени, в который на мишени создается лазерная плазма, зонды в точках $x = 140$ и 15 см регистрируют поток фоновой плазмы, примерно такой же, как и в предыдущем случае. После облучения мишени в момент времени $t = 0$ коллектор в точке $x = 70$ см демонстрирует динамику лазерной плазмы. При этом коллектор в точке $x = 15$ см показывает резкое уменьшение потока фоновой плазмы, что связано с ее «выметанием» встречным потоком лазерной плазмы.

Характерные параметры фоновой плазмы вблизи диполя были следующими: длительность потока ~ 20 мкс, его скорость ~ 100 км/с, концентрация $\sim 5 \times 10^{12}$ см $^{-3}$. На расстоянии $x = 70$ см скорость фронта лазерной плазмы составляет ~ 250 км/с, а ее концентрация равна $\sim 2 \times 10^{12}$ см $^{-3}$. Согласно предыдущим измерениям [30], поток лазерной плазмы состоит наполовину из протонов и наполовину из ионов углерода C^{2+} , C^{3+} , C^{4+} .

Основные результаты представлены на рис.4 в виде осциллограмм возмущений трех компонент магнитного поля, концентрации ионов и потенциала плазмы на четырех расстояниях от диполя внутри и на границе магнитосферы. Поток лазерной плазмы в рассматриваемой области имеет четко выраженный передний фронт, движущийся со скоростью ~ 250 км/с, и задний фронт (скорость ~ 150 км/с) при общей длительности от 4 до 6 мкс, что соответствует протяженности сгустка ~ 100 см. Лазерная плазма создается на двух мишенях, и на оси x происходит сложение потоков. Поскольку для каждой мишени угловое распределение скорости относительно нормали пропорционально $\cos \theta$, то суммарная концентрация на оси имеет сложное распределение и снижается гораздо мед-

леннее, чем расстояние в кубе, как это наблюдается в случае одной мишени.

Потенциал плазмы на близких расстояниях от мишени ($x = 9$ и 13 см) положителен до прихода лазерной плазмы (т.е. во время обтекания диполя фоновой плазмой) и отрицателен после ее прихода. Положительный плавающий потенциал вызывается ионами фоновой плазмы, проникающими в небольших количествах внутрь магнитосферы, и максимальная величина потенциала отражает максимальную энергию ионов набегающего потока (~ 100 эВ). В плотной плазме потенциал создается электронами и отражает их температуру. Из рис.4 видно, что на расстоянии $x = 26$ см до прихода лазерной плазмы потенциал является отрицательным, что свидетельствует о наличии в этой точке потока фоновой плазмы. Действительно, концентрация, рассчитанная по измеренной плотности тока, до прихода лазерной плазмы составляет $\sim 6 \times 10^{12}$ см $^{-3}$, в то время как на меньших расстояниях сигнал зонда Ленгмюра от фоновой плазмы отсутствует, потому что она не проникает внутрь магнитосферы (за исключением малого числа ионов). На расстоянии $x = 18$ см потенциал до прихода лазерной плазмы близок к нулю. Таким образом, из этих данных следует, что поток фоновой плазмы создает магнитосферу размером $R_m \approx 20$ см. Можно также оценить температуру фоновой плазмы как ~ 10 эВ, а лазерной – как ~ 50 эВ.

Рассмотрим возмущение основной компоненты магнитного поля δB_z . На оси дипольное поле имеет только положительную компоненту, равную в соответствующих точках примерно 1500 Гс ($x = 9$ см), 470 Гс ($x = 13$ см), 190 Гс ($x = 18$ см), 60 Гс ($x = 23$ см). На всех четырех расстояниях регистрируемое возмущение имеет сначала отрицательную фазу, которая быстро сменяется положительной. Отрицательный сигнал соответствует вытеснению существующего поля. Именно вытеснение внешнего магнитного поля является хорошо известным результатом его взаимодействия с лазерной плазмой, наблюдавшимся в предыдущих экспериментах при более простой геометрии магнитного поля. Отметим, что максимальная величина отрицательного сигнала хорошо соответствует полному вытеснению исходного поля на расстояниях 13 и 18 см. На расстоянии 9 см вытеснение не полное, но достаточно значительное. На расстоянии 26 см отрицательная фаза возмущения во время пролета лазерной плазмы отсутствует, а есть только вытеснение поля фоновой

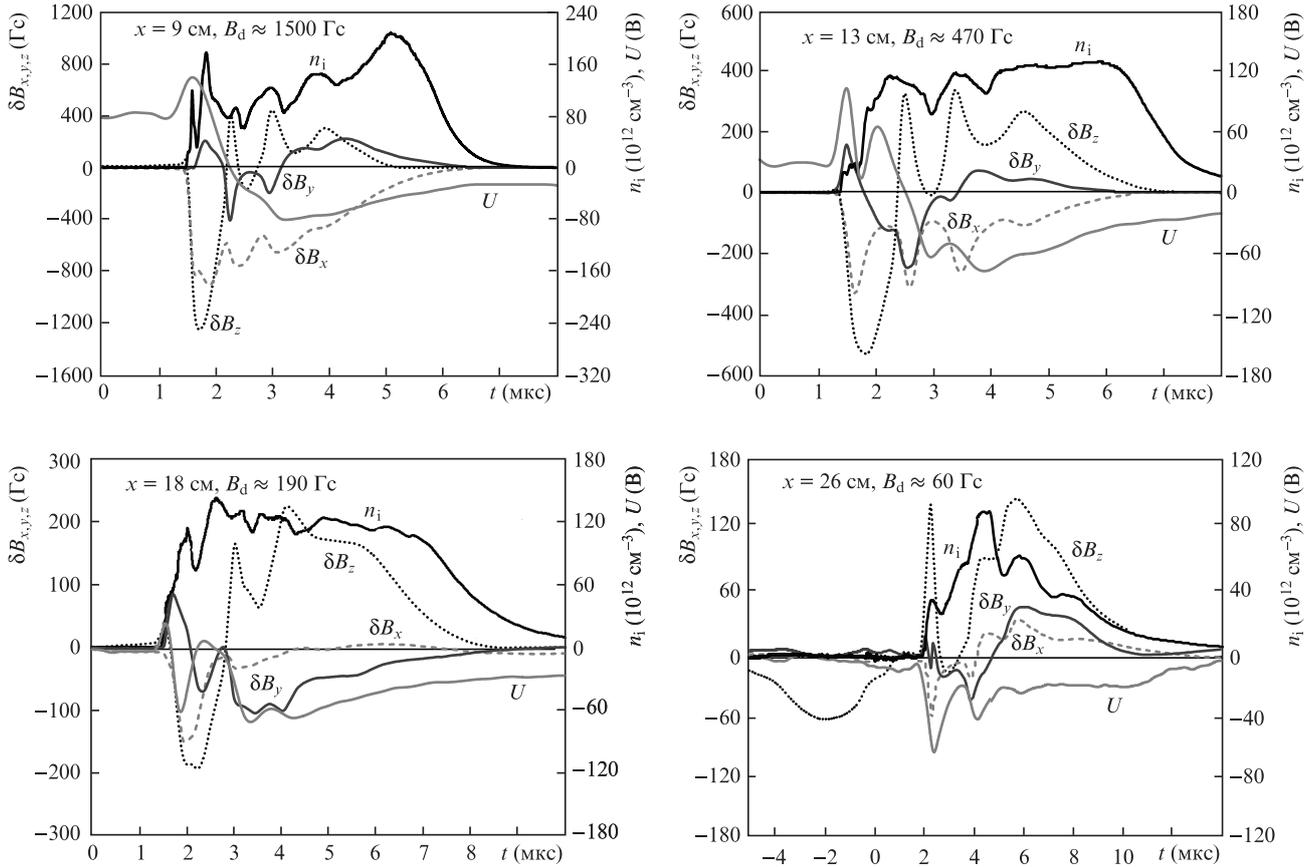


Рис.4. Осциллограммы компонент магнитного поля δB_z , δB_x и δB_y , концентрации n_i и потенциала U при различных расстояниях по оси x , на которых проведены измерения, и величинах магнитного поля диполя B_d .

плазмой. Вытеснение дипольного поля фоновой плазмой дополнительно свидетельствует о том, что создаваемая магнитосфера имеет размер менее 26 см.

Видно, что фаза вытеснения на фронте лазерной плазмы длится короткое время ($< 1 \text{ мкс}$). Новым фактом, наблюдаемым в настоящем эксперименте, является быстрое появление положительной фазы возмущения поля, что говорит об усилении внешнего магнитного поля. Смена полярности отчетливо видна на расстояниях 9, 13 и 18 см, т.е. внутри магнитосферы. Четко прослеживается, что положительная фаза имеет выраженные максимумы, совпадающие с локальными максимумами потока лазерной плазмы. На расстоянии 26 см отрицательная фаза, связанная с лазерной плазмой, отсутствует. Вместо этого с приходом фронта лазерной плазмы уже наступает положительная фаза, т.е. усиление поля. Возможно, это обусловлено тем, что данная точка находится за пределами магнитосферы. Амплитуда поля в положительной фазе его усиления уменьшается с расстоянием и составляет примерно 300, 200, 150 и 100 Гс при $x = 9, 13, 18$ и 26 см соответственно. Зависимость достаточно близка к зависимости вида $\delta B_z \propto 1/x$.

Поскольку потоки лазерной плазмы не являются идеально симметричными относительно плоскости xu , то помимо основной компоненты δB_z наблюдаются также и другие. Возмущение второй дипольной компоненты δB_x не показывает обращения полярности сигнала и фазы вытеснения поля. На рис.5 приведены осциллограммы сигналов, измеренные над экватором под углом $\varphi \approx 45^\circ$ при радиальном расстоянии от центра диполя $R \approx 14 \text{ см}$.

Видно, что под этим углом поток лазерной плазмы, как и температура, на порядок меньше, чем в экваториальной плоскости (рис.4), что соответствует относительно малому телесному углу расширения плазменного факела. Возмущение магнитного поля тоже относительно мало. Тем не менее четко наблюдается фаза вытеснения компоненты δB_x , за которой следует фаза усиления. Компонента δB_z также демонстрирует усиление поля. Таким образом, геометрия возмущения магнитных силовых линий указывает на раздувание дипольного магнитного поля и вытягивание силовых линий.

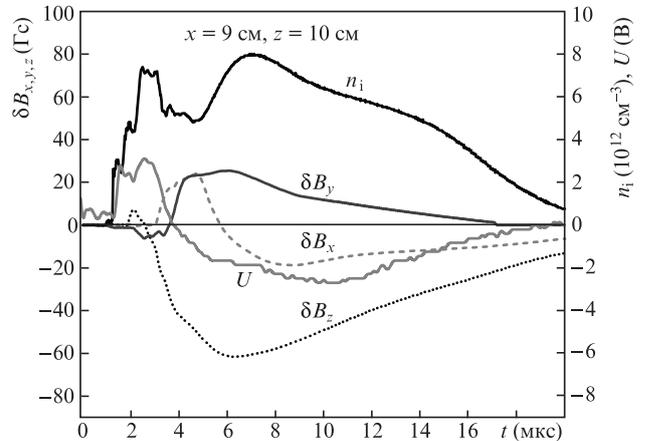


Рис.5. Осциллограммы компонент магнитного поля δB_z , δB_x и δB_y , концентрации n_i и потенциала U , измеренные над экваториальной плоскостью.

3. Выводы и обсуждение полученных данных

Ниже приведены наиболее важные размерные и безразмерные параметры плазмы Θ -пинча, мини-магнитосферы, создаваемой вокруг магнитного диполя, и лазерной плазмы, которая образуется внутри магнитосферы и расширяется в фоновую плазму (где C_s – скорость звука, λ_{ii} – средняя длина свободного пробега ионов, ω_{pi} – плазменно-ионная частота, R_L – ларморовский радиус, ω_e – частота электронов, τ_{ei} – частота столкновения электронов с ионами).

Параметры фоновой плазмы

Скорость V_* (км/с)	100
Средняя концентрация n (см ⁻³)	$.5 \times 10^{12}$
Число Маха V_*/C_s	~ 3

Параметры магнитосферы

Размер магнитосферы R_m (см)	~ 20
Относительный радиус диполя R_d/R_m	0.25
Число Кнудсена λ_{ii}/R_m	~ 20
Число Рейнольдса $4\pi\sigma R_m V_*/c^2$	~ 1000
Параметр Холла $R_m \omega_{pi}/c$	2.5
Степень замагничности ионов R_m/R_L	2

Параметры лазерной плазмы

Отношение энергии лазерной плазмы к магнитной энергии диполя Q_{LP}/Q_d	~ 1
Скорость относительно фона V_{LP}/V_*	~ 2.5
Число Кнудсена λ_{ii}/R_m	~ 100
Число Рейнольдса $4\pi\sigma R_m V_{LP}/c^2$	> 1000
Степень замагничности электронов $\omega_e \tau_{ei}$	> 100

Созданная мини-магнитосфера является в достаточной степени бесстолкновительной, а по значению параметра Холла и степени замагничности – переходной. Подробно свойства мини-магнитосферы при указанных параметрах изучались в нашей предыдущей работе [25].

Условия в целом незначительно отличаются от условий подобного эксперимента [30], в котором был обнаружен эффект захвата лазерной плазмой магнитного поля диполя. Целью настоящего опыта было получение дополнительных данных об этом процессе. Видно, что осциллограммы сразу за пределами магнитосферы (рис.4, $x = 26$ см) качественно соответствуют полученным ранее результатам. Наблюдается возмущение поля, динамически коррелирующее с потоком лазерной плазмы, что свидетельствует о его переносе плазмой. При этом возмущение имеет тот же знак (направление), что и поле диполя, но значительно превышает его по величине ($\delta B_z = 100 - 150$ Гс, $B_d \approx 60$ Гс). Внутри магнитосферы отчетливо прослеживается динамический переход от фазы вытеснения поля диполя к фазе его захвата. Фаза вытеснения является короткой и наблюдается только на фронте потока лазерной плазмы.

Другая особенность, которая также наблюдалась в предыдущем эксперименте на далеких расстояниях от диполя, заключается в выраженной модуляции захваченного магнитного поля. Поток лазерной плазмы состоит из отдельных слившихся сгустков. Как это обсуждалось в нашей работе [20], импульс излучения CO₂-лазера имеет

несколько пиков с интервалом примерно 0.5 мкс и создает не менее трех последовательных потоков лазерной плазмы, которые следуют друг за другом. Скорость первого потока в 1.5–2 раза выше скорости второго и в 2–3 раза выше скорости третьего. Поскольку на оси x происходит сложение двух лазерных факелов, то модуляция потока имеет большее число максимумов и минимумов. Глубина модуляции магнитного поля существенно больше глубины модуляции концентрации плазмы и составляет примерно 100%, т.е. минимальное значение поля снижается практически до нуля.

Захват магнитного поля можно интерпретировать как процесс проникновения поля в электронную жидкость лазерной плазмы. Проблема состоит в том, что температура электронов и проводимость плазмы достаточно высоки. Магнитное число Рейнольдса для лазерной плазмы превышает 10^3 , а параметр замагничности $\omega_e \tau_{ei}$ составляет не менее 10^2 . Таким образом, проникновение поля происходит аномально быстро. Можно предполагать наличие эффекта микро-неустойчивостей либо холловских процессов. Микро-неустойчивости сопровождаются высокочастотными колебаниями магнитного поля. Стохастический шум в диапазоне нижегибридных частот обычно наблюдается внутри разреженной лабораторной мини-магнитосферы [30], однако в наших экспериментах он отсутствовал во время пролета лазерной плазмы. Что касается холловских процессов, то они проявляются, когда параметр Холла – отношение характерного размера к ионной плазменной длине – становится примерно равным единице или меньше ее. При концентрации лазерной плазмы $\sim 10^{14}$ см⁻³ и размере магнитосферы ~ 25 см этот параметр составляет ~ 10 .

Другой процесс проникновения магнитного поля в плазму заключается в развитии желобковой неустойчивости на границе плазма–магнитное поле. В работе [35] этот механизм, наряду с другими, был подробно исследован как в эксперименте, так и с помощью трехмерного магнитогидродинамического численного моделирования. Безразмерные параметры настоящего опыта и эксперимента, проведенного в [35], в целом сходны, несмотря на существенно различные абсолютные значения магнитного поля, масштаба взаимодействия, концентрации и температуры плазмы. Принципиальное отличие заключается в геометрии взаимодействия. В [35] магнитное поле постоянно в пространстве и конический поток лазерной плазмы быстро трансформируется в относительно тонкий лист толщиной порядка ионно-плазменной длины. В этих условиях желобковая неустойчивость и холловские эффекты, совместно с аномальной диффузией, позволяют полю быстро проникать в плазму. В наших опытах давление магнитного поля быстро уменьшалось с расстоянием и кинематическое давление плазмы превышало его во всей рассматриваемой области. Структура плазменного факела в настоящем эксперименте имеет большие, чем в эксперименте [35], размеры, поэтому поле не может быстро проникать в плазму.

Таким образом, основной вывод работы заключается в том, что обнаружен эффект взаимодействия лазерной плазмы с магнитным полем, который сложно объяснить на основе наиболее известных и изученных процессов, и поэтому требуются дополнительные эксперименты.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 18-12-00080, а также при поддержке РФФИ (гранты № 18-29-21018 и

19-02-00993) и Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117021750017-0).

1. Keilhacker M., Kornherr M., Niedermeyer H., Steuer K.-H., Chodura R. *Proc. of the fourth Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (Madison, USA, International Atomic Energy Agency, 1971, Vol. III, pp 265–276).
2. Cheung A.Y., Goforth R.R., Koopman D.W. *Phys. Rev. Lett.*, **31** 429, (1973).
3. Borovsky J.E., Pongratz M.B., Roussel-Dupre R.A., Tan T.-H. *Astrophys. J.*, **280**, 802 (1973).
4. Antonov V.M., Bashurin V.P., Golubev A.I., Zhmailo V.A., Zakharov Yu.P., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Snytnikov V.N. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **26**, 757 (1985).
5. Golubev A.I., Solov'ev A.A., Terekhin V.A. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **19**, 602 (1978).
6. Winske D., Gary S.P. *J. Geophys. Res. A: Space Phys.*, **112**, A10 (2007).
7. Longmire C.L. *Notes on Debris-Air Magnetic Interaction* (Santa Monica, Cal, Rand Corporation, Report RM-3386-PR, 1963).
8. Wright T.P. *Phys. Fluids*, **14**, 1905 (1971).
9. Zakharov Yu.P. et al. *Proc. VI Int. Symp. on Modern Problems of Laser Physics* (Novosibirsk, Russia, 2013, pp 193, 194).
10. Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G., Melekhov A.V., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A. *Plasma Phys. Rep.*, **41**, 399 (2015).
11. Подгорный И.М., Сагдеев Р.З. *ВФН*, **98**, 409 (1969) [*Phys.-Usp.*, **12**, 445 (1970)].
12. Баранов В.Ю. *ТБТ*, **4** (5), 621 (1966).
13. Schindler K. *Space Sci. Rev.*, **17**, 589 (1975).
14. Антонов В.М., Бояринцев Э.Л., Захаров Ю.П., Мелехов А.В., Посух В.Г., Пономаренко А.Г., Шайхисламов И.Ф. В кн.: *Современные достижения в плазменной гелиогеофизике* (М., 2018, с. 396–418).
15. Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Nakashima H., Antonov V.M., Melekhov A.V., Nikitin S.A., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Muranaka T. *Adv. Space Res.*, **28**, 1175 (2001).
16. Ponomarenko A.G., Antonov V.M., Posukh V.G., Melekhov A.V., Boyarintsev E.L., Afanasyev D.M., Yurkov R.N. *Report on MinPromNauka Project Investigation of Solar Activity and its Magnifications in Near Earth Space and Atmosphere. Part III* (Russia, 2004).
17. Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Vchivkov K.V. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **50**, 074015 (2008).
18. Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **35**, 813 (2007).
19. Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Vchivkov K.V., Nakashima H., Ponomarenko A.G. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **112**, 042011 (2008).
20. Shaikhislamov I.F., Antonov V.M., Zakharov Yu.P., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Ponomarenko A.G. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **51**, 105005 (2009).
21. Shaikhislamov I.F., Zakharov Y.P., Posukh V.G., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Antonov V.M., Ponomarenko A.G. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **53**, 035017 (2011).
22. Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G., Melekhov A.V., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **56**, 125007 (2014).
23. Halekas J.S., Mitchell D.L., Lin R.P., Hood L.L., Acuña M.H., Binder A.B. *Geophys. Res. Lett.*, **29** (10), 77 (2002).
24. Shaikhislamov I.F., Antonov V.M., Zakharov Yu.P., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Ponomarenko A.G. *Adv. Space Res.*, **52**, 422 (2013).
25. Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G., Melekhov A.V., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **56**, 025004 (2014).
26. Shaikhislamov I.F., Posukh V.G., Melekhov A.V., Zakharov Yu.P., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **57**, 075007 (2015).
27. Omid N., Blanco-Cano X., Russell C.T., Karimabadi H., Acuna M. *J. Geophys. Res.*, **107**, 1487 (2002).
28. Blanco-Cano X., Omid N., Russell C.T. *J. Geophys. Res.*, **108**, 1216 (2003).
29. Руменских М.С., Чибранов А.А., Ефимов М.А., Березуцкий А.Г., Посух В.Г., Захаров Ю.П., Бояринцев Э.Л., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф. *Письма в ЖЭТФ*, **111** (6), 335 (2020).
30. Shaikhislamov I.F. et al. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **58** (11), 115002 (2016).
31. Khodachenko M.L., Alexeev I., Belenkaya E., Lammer H., Grießmeier M.J., Leitzinger M., Odert P., Zaqarashvili T., Rucker H.O. *Astrophys. J.* **744** (1), 70 (2012).
32. Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Prokopov P.A. *Astrophys. J.*, **813**, 50 (2015).
33. Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Boyko A.A., Zakharov Y.P., Melekhov A.V., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H. *Astrophys. J.*, **769**, 28 (2013).
34. Funaki I., Kimura T., Ueno K., et al. *Proc. 30th Int. Electric Propulsion Conf.* (Florence, IEPC-2007-94, 2007).
35. Khlar B., Revet G., Ciardi A., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 205001 (2019).