

УДК 533.9.07

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД КИ-1 КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ В ПЛАЗМЕ ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ

© 2025 г. Е. С. Гончаров*, Е. М. Урвачев

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия***E-mail: eggoncharov@vniia.ru*

Исследования космической плазмы, при воздействии на нее естественных и искусственных источников, позволяют изучать широкий спектр физических процессов, являясь природной плазменной лабораторией. Основная проблема исследования естественных процессов заключается в невоспроизводимости условий эксперимента, что значительно усложняет процесс валидации теоретических моделей. Лабораторное моделирование решает эту проблему и позволяет детально изучать процессы в космической плазме, и, потенциально, прогнозировать отклик среды на разные возмущения. В настоящем обзоре представлены результаты исследований на многофункциональном экспериментальном стенде КИ-1 Института лазерной физики СО РАН, ориентированные на задачи изучения физических процессов в плазме ионосферы и магнитосферы. Описаны используемые подходы к моделированию и методы лабораторной диагностики. Полученные результаты доказывают актуальность использования экспериментальных стендов, в частности, установки КИ-1 для исследования процессов в космической плазме, а также необходимость развития новых подходов к моделированию и усовершенствования методов лабораторной диагностики плазмы.

Ключевые слова: космическая плазма, магнитосфера, ионосфера, лабораторное моделирование, лазерная плазма.

Для цитирования: Гончаров Е.С., Урвачев Е.М. Экспериментальный стенд КИ-1 как инструмент исследования явлений в плазме ионосферы и магнитосферы // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 1. С. 74–87. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_74

Введение

Космическая плазма представляет собой естественную плазменную лабораторию для исследования физических процессов, которые невозможно воспроизвести в околоземной атмосфере. Изучение естественных и искусственно инициированных процессов в космической плазме позволяет разрабатывать и валидировать теоретические модели фундаментальных физических процессов. Проведение измерений в космосе с привлечением искусственных спутников земли (ИСЗ) и геофизических ракет дает такую возможность, но, одновременно, сталкивается с большим количеством сложностей: асиноптический характер данных наблюдений (ИСЗ никогда не возвращается в точности в ту же точку орбиты), ограниченный объем и невозможность коррекции работы измерительно-вычислительной аппаратуры после запуска, высокая стоимость. В экспериментах, сопровождающихся активными воздействиями на ионосферу или магнитосферу, добавляется невозможность контроля условий проведения эксперимента и их воспроизведения в новых экспериментах. В исследованиях космической плазмы широко используется численное моделирование, однако сложные численные модели требуют точных данных для валидации и содержат внутренние ограничения на размер моделируемой области и необходимый временной масштаб. Все вышеуказанные причины доказывают необходимость развития экспериментальных наземных стендов, позволяющих моделировать процессы в плазме в ограниченном пространстве. Основной целью моделирующих экспериментальных установок является воспроизведение и подробное измерение в хорошо контролируемых условиях сложных и

редких природных процессов или явлений, которые не могут быть непосредственно изучены другими методами. Таким образом, лабораторное моделирование явлений такого рода является необходимой, а иногда и единственной альтернативой для получения новых научных результатов с одновременной оценкой точности. В настоящее время в области экспериментального моделирования процессов в космической плазме достигнуты определенные успехи. В мире существует ряд крупных зарубежных экспериментальных установок, таких как, например, *Large Plasma Device* (LAPD) [Gekelman et al., 1991; Liu et al., 2021], *NRL Space Physics Simulation Chamber* (NRL-SPSC) [Liu et al., 2021], а также отечественных, например, установка «Крот» [Айдакина и др., 2018], установка плазменного фокуса ПФ-3 (НИЦ «Курчатовский институт») [Ананьев и др., 2016], лабораторный стенд на базе лазерного комплекса PEARL (Институт прикладной физики РАН) [Курбатов и др., 2018], установка КИ-1 (Институт лазерной физики СО РАН). Целью настоящей работы является обзор основных результатов, полученных на экспериментальной установке КИ-1, созданной в 70-х годах прошлого столетия специально с целью моделирования процессов в космической плазме, в частности, плазме ионосферы и магнитосферы Земли.

Обзор имеет следующую структуру. В первой главе приведены: описание конструкции установки КИ-1, параметры лабораторной плазмы, основные диагностические инструменты экспериментальной установки, особенности измерительно-вычислительного комплекса. Во второй главе представлены результаты лабораторного моделирования эффектов, возникающих при различных воздействиях на плазму магнитосферы. Определены основные критерии подобия лабораторного эксперимента и описаны методы формирования магнитосферных возмущений на экспериментальной установке. Приведены результаты работ, основанных на моделировании разлета облака плазмы в вакуумное магнитное поле. В третьей главе описаны результаты исследования некоторых эффектов в физике плазмы (бесстолкновительная ударная волна, альфвеновская волна, медленная магнитозвуковая волна, плазменный джет), относящихся к новому направлению лабораторной астрофизики, и тесно связанных с процессами в ионосфере и магнитосфере Земли.

Описание экспериментальной установки КИ-1

Экспериментальный многофункциональный стенд КИ-1 Института лазерной физики (ИЛФ) СО РАН сконструирован в 70-х годах прошлого столетия с целью моделирования фундаментальных процессов в космической плазме. Стенд КИ-1 представляет собой цилиндрическую вакуумную (с остаточным давлением $\sim 10^{-6}$ Торр, соответствующим высоте 120–130 км) камеру длиной 500 см и диаметром 120 см. Для проведения экспериментов по генерации облака лазерной плазмы при различных условиях стенд КИ-1 оборудован генераторами плазмы и генераторами магнитного поля, а также измерительно-вычислительным комплексом. Формирование плазменного облака происходит при облучении мишеней (капролоновых или полиэтиленовых) различной геометрии пучками импульсного излучения многокаскадного CO_2 -лазерного усилителя «ЛУИ-2м» (с длительностью основного пика $\tau \sim 100$ нс) с энергией выхода ~ 1 кДж [Захаров и др., 1988; Авдыева и др., 1989; Шайхисламов, 2015]. Для генерации фоновой плазмы или имитации солнечного ветра используется индукционный Θ -пинч, формирующий поток полностью ионизованной водородной плазмы, направленный вдоль оси камеры и заполняющий всю камеру. Также стенд КИ-1 оборудован источниками однородного (до 1 кГс, вдоль оси камеры) и дипольного магнитных полей, реализованных на основе компактных сильноточных диполей с магнитным моментом $M = 10$ МГс·см³. Измерительно-вычислительный комплекс стенда КИ-1 состоит из миниатюрных ленгмюровских зондов для регистрации концентрации плазмы [Захаров, 1986], экранированных трехкомпонентных магнитных зондов [Chibrarov et al., 2019] для измерения возмущений магнитного поля, аппаратуры фотографирования с короткой экспозицией и аппаратуры анализа спектров свечения. Как правило, оптическая диагностика применяется в натурных и лабораторных экспериментах лишь для качественного анализа. Однако на основе результатов экспериментов на стенде КИ-1 [Оришич, Шайхисламов, 1992; Шайхисламов и др., 1995] в ИЛФ СО

РАН разработана методика диагностики [Шайхисламов, 1996] распределения концентрации ионов плазменных потоков, позволяющая получать количественные данные из результатов оптической диагностики. Данная методика основана на регистрации свечения линий, возбуждаемых в процессе перезарядки на нейтральном газе, напускаемом в камеру. В проведенных на установке КИ-1 экспериментах относительная погрешность предложенного метода составила 15–20% [Захаров и др., 1994]. Метод зондирования плазмы магнитными датчиками обычно применяется для исследования диамагнитных эффектов в плазме. Однако при взаимодействии лазерной плазмы с сильными магнитными полями наличие магнитного зонда в области плазмы приводит к возникновению возмущений. Для такого типа экспериментов в ИЛФ СО РАН была разработана методика измерения размеров диамагнитной каверны методом бесконтактного магнитного зондирования [Kasperczuk et al., 1999]. При исследовании процесса расширения плазмы поперек сильного магнитного поля результаты измерений формы и размеров диамагнитной каверны в квазистатическом состоянии методами интерферометрии и бесконтактного магнитного зондирования показали хорошее согласие. Это позволило доказать корректность метода бесконтактного магнитного зондирования [Zakharov et al., 2002] для изучения процесса взаимодействия плазмы с сильным магнитным полем, и возможность применения данного метода для оценки начальной кинетической энергии плазмы и исследования ее эволюции в магнитном поле.

Возможность варьировать геометрию расположения лазерных источников, параметры их работы, характеристики мишени, конфигурацию и напряженность магнитного поля, а также характеристики фоновой среды, позволяют использовать стенд КИ-1 для решения широкого спектра задач физики плазмы [Шайхисламов, 2015].

Экспериментальное моделирование процессов в магнитосфере

Одной из областей, в которой широко применяется лабораторное моделирование является физика магнитосферы. Наиболее общий подход для определения параметров лабораторного эксперимента основывается на применении критериев подобия. Как правило, из-за огромной разницы в масштабах лабораторного эксперимента и реальных планетных магнитосфер, в лабораторных условиях практически невозможно воспроизвести параметры плазмы и поля, требующиеся для точного и полного соответствия величин критерия подобия. Поэтому в практике экспериментов на установке КИ-1 применяется принцип «ограниченного физического подобия», суть которого заключается в том, что достаточно выдерживать точные значения только критериев подобия, близких по абсолютной величине к ~ 1 [Подгорный, Сагдеев, 1969; Schindler, 1969]. Как правило, такие критерии оказываются наиболее важными для корректного моделирования [Антонов и др., 2018; Kasperczuk et al., 1999]. Следуя этому принципу, в работах [Подгорный, Сагдеев, 1969; Schindler, 1969; Баранов, 1969; Захаров и др., 1988; Zakharov et al., 1986] было получено, что наиболее важными критериями задачи расширения плазменного облака в однородную среду во внешнем магнитном поле должно быть магнитное число Маха (M_A), а также критерий ионной замагниченности $\varepsilon_b = R_h/P_d$, где R_h – Ларморовский радиус, а P_d – радиус торможения облака плазмы.

На установке КИ-1 исследования магнитосферной плазмы проводились при помощи двух генераторов импульсной плазмы (плазмы индукционного Θ -пинча и плазмы, создаваемой CO_2 -лазером) [Антонов и др., 1985], плазма которых сильно различается по энергетическим и пространственно-временным характеристикам. Комбинация двух источников в полях компактных магнитных диполей [Zakharov et al., 2013a, b; Shaikhislamov et al., 2009; Shaikhislamov et al., 2017; Антонов и др., 2018] позволила промоделировать выбросы плазмы в околоземном пространстве, а также воздействие на магнитосферу плазмы солнечного ветра.

Экспериментальный стенд КИ-1 позволил изучить продольные токи, связывающие пограничный слой магнитосферы с полярной ионосферой [Shaikhislamov et al., 2009; 2011; Шайхисламов и др., 2014]. Было выполнено экспериментальное моделирование взаимодействия импульса плазмы солнечного

ветра с замороженным поперечным магнитным полем с магнитосферой Земли [Shaikhislamov et al., 2014b]. Обнаруженная над лунными магнитными аномалиями мини-магнитосфера [Shaikhislamov et al., 2013; Shaikhislamov et al., 2014b; Shaikhislamov et al., 2015] (потенциально может существовать и вокруг намагниченных астероидов) также успешно изучается на стенде КИ-1. В одном из лабораторных экспериментов были зарегистрированы потоки магнитно-отраженных ионов, качественно соответствующие потокам, наблюдаемым над лунными магнитными аномалиями [Руменских и др., 2020; Rumenskikh et al., 2023]. В эксперименте [Shaikhislamov et al., 2016; Shaikhislamov et al., 2017] была исследована принципиально новая комбинация взаимодействующих потоков плазмы и магнитного поля дипольной магнитосферы. Особенность дипольной магнитосферы заключалась в том, что генерация лазерной плазмы происходила внутри этой магнитосферы на двух мишенях, симметрично расположенных на корпусе диполя. При этом лазерная плазма двигалась против потока плазмы Θ -пинча и обладала достаточно большой кинетической энергией, чтобы вытеснить дипольное магнитное поле. Постановка подобного эксперимента была мотивирована обнаружением новых астрофизических объектов так называемых горячих «Юпитеров», обращающихся экстремально близко к звезде со сверхзвуковыми течениями в верхней атмосфере [Antonov et al., 2013; Shaikhislamov et al., 2016; 2014a; Chibrarov et al., 2021]. Проведенные измерения обнаружили, что лазерная плазма, проходя через фоновую плазму, частично вытесняет ее из-за кулоновских столкновений, и несет с собой магнитное поле, которое оказывается на порядок больше, чем значение поля вакуумного диполя на таком расстоянии. Полученные данные свидетельствуют о новом и неожиданном эффекте захвата магнитосферного поля лазерной плазмой и дальнейшего его «уноса» на дальнее расстояние. Сравнение результатов [Shaikhislamov et al., 2016] показало, что обнаруженный эффект можно воспроизвести только с использованием лазерной плазмы. Захват магнитного поля можно интерпретировать как процесс проникновения поля в электронную жидкость лазерной плазмы. Температура электронов и проводимость плазмы достаточно высоки и проникновение поля происходит аномально быстро. Основная сложность интерпретации эксперимента заключается в том, что наблюдаемый эффект проникновения поля не описывается известными процессами взаимодействия лазерной плазмы с магнитным полем, такими, как микро-неустойчивости, холловские процессы или желобковые неустойчивости [Ефимов и др., 2021].

Практический интерес результатов экспериментов по инъекции плазменных облаков в случае дипольного магнитного поля – моделирование мощных внутримангнитосферных взрывов, потенциально возможных в случае экстремальной астероидной опасности [Ponomarenko et al., 2001; Антонов и др., 2001]. Еще одно практическое применение состоит в лабораторном моделировании экстремального воздействия на магнитосферу Земли сверхмощным потоком солнечного коронального вещества [Ponomarenko et al., 2007; Ponomarenko et al., 2008; Zakharov et al., 2008; Zakharov et al., 2016]. Лабораторные эксперименты в этом направлении позволили выполнить энергетические оценки максимального воздействия на магнитосферу Земли в результате искусственных или природных явлений экстремального характера. В ходе проведенных исследований было обнаружено, что в этих явлениях в лабораторной магнитосфере формируется интенсивная полярная токовая система, аналогичная во многих чертах продольным токам зоны-1 на Земле [Shaikhislamov et al., 2009]. Также удалось впервые подробно изучить физические свойства магнитосферного МГД-генератора в низкоширотном пограничном слое [Антонов и др., 2010; Shaikhislamov et al., 2011; Шайхисламов и др., 2012; Шайхисламов и др., 2014]. В лабораторном эксперименте [Antonov et al., 2013] была впервые воссоздана магнитосфера, сдуваемая потоком плазмы с поверхности диполя, и обнаружено формирование тонкого экваториального магнитодиска.

Разлет облака плазмы в вакуумное магнитное поле

Моделирование выброса плазмы в космическое пространство или астрофизическую замагниченную среду в лабораторных условиях [Zakharov, 2000] необходимо для понимания природы таких явлений, как, например, вспышки сверхновых [Захаров и др., 1988; Zakharov et al., 1996; 1986; Zakharov et al.,

1999; Antonov et al., 1990] и для воспроизведения активных геофизических экспериментов, таких, как искусственный выброс бария (Ba) (эксперименты AMPTE, CRRES) [Zakharov et al., 2002] или инъекция ионизованной плазмы [Zakharov, 1996; 1997; Wolowski et al., 1999] (эксперименты *Porcupine*, APEX, *Fluxus*, *North Star* [Зецер и др., 2021; Лосева и др., 2017; 2018; 2019; 2021; 2022; Ковалев, Ковалева, 2017]) в космическое пространство, а также предсказания возмущений космической плазмы, вызванных работой ракетного двигателя, основанного на использовании термоядерных микровзрывов [Hyde et al., 1972]. Впервые для решения задач лабораторного моделирования космофизических явлений взрывного характера (активные эксперименты типа AMPTE, с выбросами бария) на стенде КИ-1 при облучении сферической мишени с четырех сторон было сформировано, близкое к сферически симметричному, облако лазерной плазмы со скоростью ~ 100 км/с и энергией до 30 Дж, взаимодействующее с магнитным полем [Захаров и др., 2022]. В эксперименте было успешно смоделировано формирование диамагнитной каверны, развитие желобковой неустойчивости при разлете бариевых облаков поперек геомагнитного поля и динамика этих облаков в направлении вдоль геомагнитного поля [Berezutsky et al., 2023]. В последней серии экспериментов описан новый, ранее не изученный, процесс аномального коллапса каверны и его связи с холловскими магнитными полями и токами [Chibrarov et al., 2024].

Лабораторная астрофизика на установке КИ-1

Бесстолкновительная ударная волна (БУВ)

С середины 1990-х годов с ростом мощности лазерных систем начался современный этап развития лабораторного моделирования, получивший название Лабораторная астрофизика с лазерами [Zakharov, 2003], включающий в себя изучение геофизических явлений. Одним из важнейших направлений исследований в этой области является лабораторное моделирование бесстолкновительной ударной волны [Drake, 2000; Zakharov, 2003] с различными числами Альфвена-Маха, M_A . Изучение БУВ является актуальнейшей задачей в современной физике плазмы. БУВ встречается во многих природных явлениях, таких, как планетарные магнитосферы, гелиосфера, останки сверхновых звезд, астросферы вокруг молодых звезд [Шайхисламов, 2015]. Большинство космофизических взрывных явлений (выбросы на Солнце или активные эксперименты в ионосфере) характеризуются умеренными начальными числами $M_{A0} \leq 10$ и предполагаемой существенной ролью магнитного поля B_0 в различных задачах, связанных с БУВ. В России эксперименты по моделированию БУВ проводились на стенде КИ-1 [Zakharov et al., 2013c; Zakharov et al., 2014] в сотрудничестве с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». В результате исследований была впервые разработана модель магнитного ламинарного механизма (МЛМ), описывающая бесстолкновительное взаимодействие сферического облака плазмы с фоновой плазмой [Захаров и др., 2016; Башурин и др., 1983]. Несколько позднее данная задача решалась в США и механизм назывался *Larmor Coupling* [Bondarenko et al., 2017]. Основу модели МЛМ составляет оценка критерия эффективности δ передачи энергии облака E_0 фону в виде простого соотношения $E_{\max} \sim \delta E_0$ (при $\delta < 1$).

Впервые экспериментальные подтверждения эффективности МЛМ были получены на стенде КИ-1 при небольших значениях $\delta \approx 0.3$ и максимальном радиусе диамагнитной каверны $R^* \approx 20$ см (при энергии квазисферического облака лазерной плазмы $E_0 \approx 45$ Дж) [Антонов и др., 1985]. Сформированные таким образом осесимметричные облака лазерной плазмы максимально эффективно вытесняют магнитное поле B_0 (для реализации МЛМ) без паразитных эффектов поляризации и дрейфа несимметрично разлетающихся сгустков лазерной плазмы поперек магнитного поля B_0 . В то же время в рамках МЛМ механизма для формирования БУВ за счет сильного взаимодействия лазерной и фоновой плазмы необходимо выполнение условия $\delta \gg 1$. Для устранения этого противоречия на установке КИ-1 стали создавать лазерную плазму с большим числом частиц с целью увеличения радиуса, внутри которого плотность электронов плазменного поршня превышает плотность фоновой плазмы. Проведенный анализ [Захаров и др., 1988; Zakharov, 2003] показал, что для экспериментов в обычном лабораторном диапазоне параметров, характерном для крупных плазменных установок (с напряженностью

магнитного поля до нескольких кГс и концентрацией фоновой плазмы $n^* \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в объеме не менее 1 м^3), для достижения $\delta \geq 1$ при $M_{A0} \geq 10$ необходимо создать сферическое облако лазерной плазмы с энергией $E_0 \geq 1 \text{ кДж}$. Используя опыт экспериментов по моделированию сверхсжатия магнитосферы Земли [Ponomarenko et al., 2007; Zakharov et al., 2009; Zakharov et al., 2016], на установке КИ-1 разработали подход для повышения эффективного числа частиц облака [Zakharov, 2003; Zakharov et al., 2013a; Zakharov et al., 2013b], заключающийся в генерации квазинаправленных потоков плазмы, расширяющихся в ограниченном телесном угле за счет одностороннего облучения мишени. Важным свойством таких мишеней оказалось существенное расширение сгустков лазерной плазмы при разлете. Этот факт определяет эффективное взаимодействие с однородным и дипольным магнитным полем [Ponomarenko et al., 2007; Zakharov et al., 2016] аналогично варианту сферически-симметричного облака лазерной плазмы, несмотря на сферически несимметричный характер разлета. В таком режиме расширения лазерной плазмы обеспечивается требуемый для вытеснения поля B_0 диамагнитный ток, а критерием эффективности становятся полное число электронов в лазерной плазме и эффективная энергия в единичном телесном угле. Эти два параметра характеризуют выигрыш от применения направленно разлетающихся сгустков лазерной плазмы от плоских мишеней, так как в этих направлениях можно сконцентрировать имеющиеся кинетическую энергию сгустка и полное число электронов, «растягивая», например, требуемый размер R^* для увеличения параметра $\delta \geq 1$ и достижения условия формирования БУВ [Захаров и др., 2016]. Описанная выше постановка эксперимента позволила получить эффективность передачи энергии фоновой плазме 25% [Шайхисламов и др., 2015], что хорошо согласуется с теоретической оценкой, а также впервые достигнуть рекордной величины параметра взаимодействия $\delta \sim 1$ [Zakharov et al., 2013a,b]. Полученные на экспериментальном стенде КИ-1 результаты подтвердили эффективность МЛМ ускорения фона расширяющимся облаком плазмы.

Генерация волновых возмущений

В магнитной гидродинамике космической плазмы, в частности плазмы ионосферы и магнитосферы Земли, особое место занимают альфвеновские волны (АВ) и медленные магнитозвуковые (ММЗ) волны [Ковалева, Ковалев, 2021; Ковалева и др., 2020]. При распространении таких МГД-волн частицы плазмы движутся преимущественно вдоль силовых линий геомагнитного поля и при достаточной напряженности последнего образуют так называемую магнитную плазменную трубку, вытянутую вдоль силовой линии поля. Для подтверждения гипотезы нагрева солнечной короны [Antolin, Shibata, 2010; De Moortel, Nakariakov, 2012] посредством распространяющихся в плазме АВ или ММЗ-волн на стенде КИ-1 был поставлен эксперимент, воспроизводящий генерацию АВ в магнитных трубках, замыкающихся на фотосферу, но большей частью находящихся в атмосфере Солнца (в короне) [Прокопов и др., 2016]. Этот эксперимент опирался на результаты предшествующих работ [Ponomarenko et al., 2006; Шайхисламов и др., 2015] по моделированию нестационарных процессов в космической плазме. В новой постановке исследовалась генерация ММЗ и АВ на стенде КИ-1 при инъекции сгустков лазерной плазмы в конусе с раствором ~ 1 ср и осью инъекции, направленной вдоль магнитного поля B_0 , что характерно для процессов генерации и распространения ММЗ-волн и АВ в солнечной атмосфере. В эксперименте произошла генерация плазменной трубки во внешнем магнитном поле [Прокопов и др., 2016] радиусом $\sim 15\text{--}20 \text{ см}$ и протяженностью 2 м . Оказалось, что концентрация плазмы спадает по мере продвижения вдоль B_0 и удаления от мишени. В эксперименте регистрировались типичные признаки АВ и ММЗ-волн и высокочастотное вистлерное возмущение, распространяющееся перед ММЗ-волной и АВ со скоростью $\sim 300 \text{ км/с}$. Идентификация вистлерной моды выполнялась по измерениям поляризации поперечной компоненты магнитного поля волны.

Параметры современных лазеров установки КИ-1 позволяют создавать оптический пульсирующий разряд (ОПР) [Тищенко и др., 2004]. ОПР открыл принципиально новые возможности применения лазерного излучения в лазерных плазменных технологиях и аэрокосмических приложениях [Аполлонов, Тищенко, 2004]. С применением импульсно-периодического лазерного излучения в ИЛФ

СО РАН было впервые показано [Грачев и др., 2006; Тищенко и др., 2011], что периодические сгустки плазмы, создаваемые в газе при определенном соотношении между энергией и частотой повторения лазерных импульсов («резонанс» сгустков лазерной плазмы с окружающей средой) генерируют в окружающем газе протяженную волну, частота которой лежит в инфразвуковом диапазоне. Данная волна является результатом объединения ударных волн, создаваемых отдельными оптическими пробоями газа. Этот феномен получил название «механизм объединения волн» (МОВ). Длина волны линейно зависит от количества лазерных импульсов, а амплитуда – от энергии одиночного импульса. Обнаруженный на стенде КИ-1 эффект позволяет со сравнительно малыми затратами энергии генерировать низкочастотные волны, частота которых зависит от количества лазерных импульсов. МОВ, последовательно создаваемый оптическими пробоями или иными сгустками плазмы взрывного характера, позволяет создавать источник инфразвука в газах [Тищенко и др., 2004; Грачев и др., 2006], а при наличии магнитного поля становится возможной генерация низкочастотной торсионной АВ и ММЗ-волны [Тищенко, Шайхисламов, 2010; Тищенко и др., 2016]. Помимо газов подобные эффекты были получены в замагниченной плазме для волн, распространяющихся вдоль силовой трубки магнитного поля. В серии экспериментов на установке КИ-1 были определены критерии МОВ, при которых импульсы лазерного излучения создают периодические сгустки плазмы с дальнейшей генерацией квазистационарных низкочастотных волн, распространяющихся вдоль силовой трубки магнитного поля, и содержащих до $\sim 50\%$ вложенной энергии. Также была продемонстрирована возможность генерации интенсивных вистлеров и определены необходимые для этого параметры эксперимента [Тищенко и др., 2016; Березуцкий и др., 2019; Березуцкий, 2022].

Плазменные джеты

Для лабораторной астрофизики особый интерес представляют эксперименты по изучению влияния внешних, квазистационарных и сверхсильных (до 10 МГс и более) магнитных полей B_0 на динамику разлета лазерной плазмы. В таких экспериментах наблюдается формирование струй, распространяющихся вдоль или поперек поля B_0 на значительные расстояния [Захаров и др., 2019; Zakharov et al., 2021]. Это направление представляет собой лабораторный аналог для моделирования процессов распространения астрофизических (или магнитосферных [Zakharov, 2002; Mishin, 2013]) струй. Оптимальный режим формирования джета определяется геометрическим критерием $\Lambda = \tau V_0 / r_0 < 1$ (r_0 – радиус лазерного фокального пятна) [Захаров и др., 2016]. Так как начальная стадия формирования сферической диамагнитной каверны важна как при моделировании струй, так и при моделировании БУВ [Захаров и др., 2016], то был определен критерий формирования наибольшей каверны для лазерной плазмы в случае плоской мишени [Захаров и др., 2019]. Эксперимент *Super-Jet* с лазерной плазмой большой эффективной энергии ($E_0 \sim 250$ Дж) при умеренных магнитных полях B_0 (до 300 Гс) на стенде КИ-1 позволил впервые сформировать и исследовать коллимированную струю плазмы больших размеров (до ~ 70 вдоль и до ~ 30 см поперек вектора начальной скорости лазерной плазмы V_0) при поперечном магнитном поле. Сгусток плазмы на начальной стадии (6–7 мкс) взаимодействия с полем формирует магнитную каверну, размер которой по нормали к мишени достигает расчетного размера $R_b = (3E_0 / B_0^2)^{1/3} \approx 45$ см при кинетической энергии лазерной плазмы $E_0 = 50$ Дж. При дальнейшем разлете заторможенного (скорость $\sim V_0/2$) сгустка лазерной плазмы поперек поля из него формируется струя длиной более полуметра, внутри которой магнитно-плазменная каверна аномально быстро схлопывается к горизонтальной оси струи. Стоит отметить, что полученные результаты дают возможность построения законченной теории таких поперечных струй.

Заключение

Лабораторное моделирование является мощным и доступным инструментом для исследования явлений в космической плазме, ионосфере и магнитосфере Земли. Воспроизводимость эксперимента позволяет проводить валидацию теоретических моделей в физике плазмы, полученных на основе

аналитических оценок и численного моделирования. Накопленный многолетний опыт лабораторных исследований и диагностики лазерной плазмы на лабораторном стенде КИ-1, а также полученные результаты показывают, что технические и методические возможности экспериментального стенда позволяют успешно решать широкий спектр задач, связанных с моделированием естественных и искусственных воздействий на ионосферу и магнитосферу Земли. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия бесстолкновительного расширяющегося облака плазмы и внешнего магнитного поля на лазерной установке КИ-1 позволили получить большое количество точных данных и важных фундаментальных результатов по динамике облака плазмы, диамагнитной каверны, формировании неустойчивостей плазмы при различных параметрах лазерной и замагниченной фоновой плазмы. При этом большое количество результатов, полученных в результате проведения экспериментов, было воспроизведено при помощи численных моделей (например, [Lembege, Simonet, 2001; Ponomarenko et al., 2001; Тищенко и др., 2022; Zakharov, Nakashima, 2001; Ponomarenko et al., 2007; Shaikhislamov et al., 2013; Divin et al., 2021]), что является несомненным доказательством уникальной роли лабораторного плазменного эксперимента в валидации теоретических моделей.

Список литературы

- Авдыева А.А., Захаров Ю.П., Максимов В.В., Оришич А.М., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Снытников В.Н., Яценко А.С. Создание сферических облаков лазерной плазмы двухсторонним облучением // Прикладная механика и техническая физика. 1989. № 6. С. 62–66. <https://www.elibrary.ru/jlfcha>
- Айдакина Н.А., Галкина А.Г., Гундорин В.И., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Лоскутов К.Н., Могилевский М.М., Привер С.Э., Стриковский А.В., Чугунин Д.В., Янин Д.В. Моделирование физических явлений в ионосфере и магнитосфере Земли на плазменном стенде «КРОТ»: Некоторые результаты и перспективы // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 3. С. 331–342. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030033>
- Ананьев С.С., Велихов Е.П., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Калинин Ю.Г., Крауз В.И., Мялтон В.В. Параметры плазменных струй, истекающих из плазменного фокуса в экспериментах на установке ПФ-3 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. № 2. С. 58–68. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2016-39-2-58-68>
- Антонов В.М., Батулин В.П., Голубев А.И., Жмайло В.А., Захаров Ю.П., Оришич А.М., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Снытников В.Н. Экспериментальное исследование бесстолкновительного взаимодействия сверхальфвеновских взаимопроникающих потоков плазмы // Прикладная механика и техническая физика. 1985. № 6. С. 3–10. <https://www.elibrary.ru/nvaibv>
- Антонов В.М., Бояринцев Э.Л., Захаров Ю.П., Мелехов А.В., Посух В.Г., Пономаренко А.Г., Шайхисламов И.Ф. Влияние проводимости поверхности на формирование магнитосферы в экспериментах по обтеканию магнитного диполя лазерной плазмой // Прикладная механика и техническая физика. 2010. № 5. С. 25–34. <https://www.elibrary.ru/mvkapb>
- Антонов В.М., Бояринцев Э.Л., Захаров Ю.П., Мелехов А.В., Посух В.Г., Пономаренко А.Г., Шайхисламов И.Ф. Лабораторные эксперименты с Терреллой: влияние кинетических масштабов на физическое подобие планетарным магнитосферам. Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / Под ред. Л. М. Зелёного, А. А. Петруковича, И. С. Веселовского. Москва. 2018. С. 383–406.
- Антонов В.М., Захаров Ю.П., Мелехов А.В., Ораевский В.Н., Пономаренко А.Г., Посух В.Г. Исследование динамики взрыва в дипольном поле в режиме квазизахвата взрывающейся плазмы // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 6. С. 27–38. <https://www.elibrary.ru/onvikn>
- Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. Механизм объединения ударных волн в лазерном воздушно-реактивном двигателе // Квантовая Электроника. 2004. Т. 34. № 12. С. 1143–1146.
- Баранов В.Б. Моделирование течения межпланетной плазмы мимо магнитосферы Земли или планет // Космические исследования. 1969. Т. 7. С. 98–104.
- Башиурин В.П., Голубев А.И., Терехин В.А. Обесстолкновительном торможении ионизованного облака, разлетающегося в однородную замагниченную плазму // Прикладная механика и техническая физика. 1983. № 5. С. 10–17.
- Березуцкий А.Г. Преобразование импульсно-периодического лазерного излучения в низкочастотные волны в замагниченной плазме с применением механизма объединения волн: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: Институт лазерной физики СО РАН. 2022. – 133 с.

Березуцкий А.Г., Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф. Генерация крутильных альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн периодическими сгустками лазерной плазмы в замагниченном фоне // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 2. С. 178–180. <https://www.elibrary.ru/yzhqjv>

Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Смирнов А.Л., Трапезников С.И., Стаценко П.А., Зимин М.И., Мякушина А.А., Запругаев В.И., Гулидов А.И., Бойко В.М., Павлов А.А., Соболев А.В. Объединение ударных волн, создаваемых движущимся оптическим пульсирующим разрядом // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 5. С. 470–472. <https://www.elibrary.ru/tteqjr>

Ефимов М.А., Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Руменских М.С., Посух В.Г., Захаров Ю.П., Бояринцев Э.Л., Трушин П.А., Смолина Е.В., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф. Захват магнитного поля диполя лазерной плазмой // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 3. С. 222–227. <https://www.elibrary.ru/kmwlzd>

Захаров Ю.П. Особенности зондовых методов исследования взаимодействия потоков лазерной плазмы с замагниченной фоновой средой. Мощные СО₂-лазеры для плазменных экспериментов и технологий / Под ред. А. Г. Пономаренко. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР. 1986. С. 125–132.

Захаров Ю.П., Оришич А.М., Пономаренко А.Г. Лазерная плазма и лабораторное моделирование нестационарных космических процессов / Под ред. Н. Г. Преображенского. Новосибирск: АН СССР (СО), Институт теоретической и прикладной механики. 1988. – 320 с.

Захаров Ю.П., Оришич А.М., Снытников В.Н., Шайхисламов И.Ф. Использование процесса перезарядки в спектральной диагностике плазменных потоков // Прикладная механика и техническая физика. 1994. № 3. С. 174–180. <https://www.elibrary.ru/nhgebp>

Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Терехин В.А., Посух В.Г., Шайхисламов И.Ф., Чибранов А.А. Новый тип крупномасштабных экспериментов для лабораторной астрофизики с коллимированными струями лазерной плазмы в поперечном магнитном поле // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 2. С. 181–186. <https://doi.org/10.1070/QEL16884>

Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Антонов В.М., Мелехов А.В., Посух В.Г., Прокопов П.А., Терехин В.А. Генерация сгустков лазерной плазмы с высокой эффективностью концентрации энергии для лабораторного моделирования бесстолкновительных ударных волн в замагниченной космической плазме // Квантовая электроника. 2016. Т. № 5. С. 399–405. <https://www.elibrary.ru/wgaqlt>

Захаров Ю.П., Терехин В.А., Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г., Трушин П.А., Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Руменских М.С., Ефимов М.А. Создание сферических облаков лазерной плазмы для моделирования трехмерных эффектов динамики искусственных плазменных выбросов в околоземном космическом пространстве // Квантовая электроника 2022. Т. 52. № 2. С. 155–159. <https://www.elibrary.ru/ocitzi>

Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Erlandson R.E. Активные эксперименты в ионосфере на высотах 140–360 км. Реанализ результатов оптических наблюдений // Физика Земли. 2021. № 5. С. 184–201. <https://doi.org/10.31857/S0002333721050227>

Ковалев А.Т., Ковалева И.Х. Роль малых добавок и процессов перезарядки в формировании плазменного облака в активных геофизических ракетных ионосферных экспериментах // Динамические процессы в геосферах. 2017. № 9. С. 116–124. <https://www.elibrary.ru/yrbgqi>

Ковалева И.Х., Ковалев А.Т. О формировании альфвеновской волны в активном ионосферном эксперименте «North Star» // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 158–165. https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_158

Ковалева И.Х., Ковалев А.Т., Зецер Ю.И. Формирование магнитозвуковой нелинейной структуры на фронте расширяющегося плазменного потока // Динамические процессы в геосферах. 2020. № 12. С. 140–148. <https://doi.org/10.26006/IDG.2020.84.15.013>

Курбатов Е.П., Бисикало Д.В., Стародубцев М.В., Чиарди А., Фукс Ж., Соловьев А.А., Бурдонов К.Ф., Реве Г., Чен С. Сравнение безразмерных параметров в астрофизических приложениях МГД и лабораторном эксперименте // Астрономический журнал. 2018. Т. 95. № 8. С. 509–518. <https://doi.org/10.1134/S0004629918080066>

Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Черменин А.В. Начальная стадия развития плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах // Динамические процессы в геосферах. 2017. № 9. С. 102–110. <https://www.elibrary.ru/yrbgpi>

Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. Характеристики плазменной струи взрывного генератора в экспериментах «ФЛАКСУС»: измерения и численное моделирование // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 175–186. https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_175

Лосева Т.В., Косарев И.Б., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Черменин А.В. Свечение высокотемпературного алюминиевого облака на начальной стадии его разлета в ионосфере // Динамические процессы в геосферах. 2018. № 10. С. 193–200. <https://doi.org/10.26006/IDG.2018.10.20196>

Лосева Т.В., Косарев И.Б., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Черменин А.В. Ионизация воздуха тепловым излучением плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах «Флаккус» // Динамические процессы в геосферах. 2019. № 11. С.134–142. <https://doi.org/10.26006/IDG.2019.11.38615>

Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Урвачев Е.М. Численное моделирование начальной стадии динамики высокоскоростной плазменной струи в активных геофизических экспериментах «Флаккус» и «Северная звезда» // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 10. С. 956–961. <https://doi.org/10.31857/S0367292122600583>

Оришич А.М., Шайхисламов И.Ф. Спектральная диагностика плазмы, расширяющейся в фоновый газ и магнитное поле // Прикладная механика и техническая физика. 1992. № 3. С. 13–19.

Подгорный И.М., Сагдеев Р.З. Физика межпланетной плазмы и лабораторные эксперименты // Успехи физических наук. 1969. Т. 98. № 3. С. 409–440.

Прокопов П.А., Захаров Ю.П., Тищенко В.Н., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Шайхисламов И.Ф. О возможности лабораторного моделирования процессов генерации альфвеновских возмущений в магнитных трубках в атмосфере солнца // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 1. С. 14–23. <https://doi.org/10.12737/13481>

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. Лабораторное моделирование взаимодействия солнечного ветра с лунными магнитными аномалиями // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 111. № 6. С. 335–342. <https://doi.org/10.31857/S0370274X20060016>

Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. Взаимодействие оптического пульсирующего разряда с газом: условия стабильной генерации и объединения ударных волн // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 10. С. 941–947.

Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Дмитриева Л.Р., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф. Генерация альфвеновских волн в замагниченной плазме сгустками лазерной плазмы при числах Маха много меньше единицы // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 2. С. 101–107. <https://doi.org/10.12737/szf-82202214>

Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Шайхисламов И.Ф., Березуцкий А.Г., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Прокопов П.А. Торсионная альфвеновская и медленная магнитозвуковая волны, создаваемые плазмой в магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. № 5. С. 303–305. <https://www.elibrary.ru/wkquyh>

Тищенко В.Н., Посух В.Г., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Павлов А.А., Бояринцев Э.Л., Голубев М.П., Кавун И.Н., Мелехов А.В., Голобокова Л.С., Мирошниченко И.Б., Павлов А.А., Шмаков А.С. Критерии формирования низкочастотного звука при облучении твердых тел широкоапертурным импульсно-периодическим лазерным излучением // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. №. 10. С. 895–900. <https://www.elibrary.ru/ttfimb>

Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф. Механизм объединения ударных волн в замагниченной плазме: критерии и эффективность формирования низкочастотных магнитозвуковых волн // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 5. С. 464–469. <https://www.elibrary.ru/ttfhbd>

Шайхисламов И.Ф. Лабораторное моделирование магнитосферных процессов. Дис. ...док. физ.-мат. наук. Новосибирск: Институт лазерной физики СО РАН. 2015. – 240 с.

Шайхисламов И.Ф. Новые методы спектральных измерений температуры электронов и распределения плотности лазерной плазмы для лабораторного моделирования космических явлений. Дис. ...канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: Институт лазерной физики СО РАН. 1996.

Шайхисламов И.Ф., Антонов В.М., Бояринцев Э.Л., Посух В.Г., Мелехов А.В., Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г. Измерение трансполярного потенциала в лабораторной магнитосфере // Космические исследования. 2012. Т. 50. № 6. С. 441–451. <https://www.elibrary.ru/peugbx>

Шайхисламов И.Ф., Антонов В.М., Захаров Ю.П., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В., Посух В.Г., Пономаренко А.Г. Продольные токи и магнитосферный генератор в экспериментах по обтеканию магнитного диполя лазерной плазмой // Космические исследования. 2014. Т. 52. № 4. С. 296–296. <https://doi.org/10.7868/S0023420614040098>

Шайхисламов И.Ф., Антонов В.М., Захаров Ю.П., Мелехов А.В., Посух В.Г., Стояновский В.О. Применение процесса перезарядки в оптической диагностике взаимодействия лазерной плазмы с дипольным магнитным полем // Прикладная механика и техническая физика. 1995. Т. 36. № 4. С. 8–15. <https://www.elibrary.ru/gmgijn>

Шайхисламов И.Ф., Захаров Ю.П., Посух В.Г., Мелехов А.В. Экспериментальное исследование бесстолкновительного сверхальфвеновского взаимодействия взаимопроникающих плазменных потоков // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 5. С. 434–442. <https://doi.org/10.7868/S0367292115050054>

- Antolin P., Shibata K. The role of torsional alfvén waves in coronal heating // The astrophysical journal. 2010. Vol. 712 (1). P. 494–510. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/712/1/494>
- Antonov V.M., Boyarinsev E.L., Boyko A.A., Zakharov Yu.P., Melekhov A.V., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H. Inflation of a dipole field in laboratory experiments: toward an understanding of magnetodisk formation in the magnetosphere of a hot Jupiter // The Astrophysical Journal. 2013. Vol. 769 (1). P. 28. <https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/769/1/28>
- Antonov V.M., Zakharov Yu.P., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Snytnikov V.N., Stoyanovsky V.O. Laboratory simulation of the astrophysical burst processes in non-uniform magnetised media // ESA Special Publication. 1990. Vol. 311. P. 189–190.
- Berezutsky A.G., Chibrarov A.A., Efimov M.A., Posukh V.G., Rumenskikh M.S., Trushin P.A., Miroshnichenko I.B., Zakharov Yu.P., Terekhin V.A., Shaikhislamov I.F. Sub-Alfvénic expansion of spherical laser-produced plasma: flutes, cavity collapse and field-aligned jets // Plasma physics reports. 2023. Vol. 49 (3). P. 351–361. <https://dx.doi.org/10.1134/S1063780X22601195>
- Bondarenko A.S., Schaeffer D.B., Everson E.T., Clark S.E., Lee B.R., Constantin C.G., Vincena S., Van Compernelle B., Tripathi S.K.P., Winske D., Niemann C. Laboratory study of collisionless coupling between explosive debris plasma and magnetized ambient plasma // Physics of plasmas. 2017. Vol. 24 (8). P. 082110. <https://doi.org/10.1063/1.4995480>
- Chibrarov A., Berezutsky A., Efimov M., Zakharov Y., Miroshnichenko I., Posukh V., Rumenskikh M., Trushin P., Shaikhislamov I. Laboratory modeling of a field-aligned currents system generated by a flow of inner magnetospheric plasma // Journal of physics: Conference Series. 2021. Vol. 2067 (1). P. 012020. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2067/1/012020>
- Chibrarov A., Efimov M., Romanchenko I., Berezutsky A., Rumenskikh M., Shaikhislamov I., Posukh V., Zakharov Y. Investigation and analysis of the characteristics of the laser plasma expansion by the spectroscopic methods, magnetic and optical diagnostics. In: AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2098 (1). P. 020005. <https://doi.org/10.1063/1.5098149>
- Chibrarov A.A., Shaikhislamov I.F., Berezutskiy A.G., Posukh V.G., Trushin P.A., Zakharov Y.P., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S., Terekhin V.A. Hall effects and diamagnetic cavity collapse during a laser plasma cloud expansion into a vacuum magnetic field // Astronomy Reports. 2024. Vol. 68 (4). P. 418–428. <https://doi.org/10.1134/S1063772924700409>
- De Moortel I., Nakariakov V.M. MGD waves and coronal seismology: an overview of recent results // Philosophical transactions of the royal society of London series A. 2012. Vol. 370. C. 3193–3216. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1202.1944>
- Divin A., Shaikhislamov I., Rumenskikh M., Zaitsev I., Semenov V., Deca J., Korovinskiy, D. Numerical and laboratory studies of magnetic enhancements produced by solar wind interaction with Lunar crustal magnetic fields. In: EGU general assembly conference abstracts. 2021. P. EGU21-16209. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-16209>
- Drake R.P. The design of laboratory experiments to produce collisionless shocks of cosmic relevance // Physics of plasmas. 2000. Vol. 7 (11). P. 4690–4698. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1314625>
- Gekelman W., Pfister H., Lucky Z., Bamber J., Leneman D., Maggs J. Design, construction and properties of the large plasma research device – The LAPD at UCLA // Review of scientific instruments. 1991. Vol. 62 (12). P. 2875–2883. <https://doi.org/10.1063/1.1142175>
- Hyde R., Wood L., Nuckolls J. Prospects for rocket propulsion with laser initiated fusion microexplosions. In: 8th joint propulsion specialist conference. 1972. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120345717>
- Kasperczuk A., Pisarczyk T., Zakharov Yu.P. Investigation of dynamic and stability of laser-produced plasma in strong transverse magnetic field // Laser and Particle Beams. 1999. Vol. 17 (3). P. 537–545. <https://doi.org/10.1017/S0263034699173221>
- Lembege B., Simonet F. Hybrid and particle simulations of an interface expansion and of collisionless shock: a comparative and quantitative study // Physics of plasmas. 2001. Vol. 8 (9). P. 3967–3981. <https://doi.org/10.1063/1.1389862>
- Liu Yu, Shi P., Zhang X., Lei J., Ding W. Laboratory plasma devices for space physics investigation // Review of scientific instruments. 2021. Vol. 92 (7). P. 071101. <https://doi.org/10.1063/5.0021355>
- Mishin E.V. Interaction of substorm injections with the subauroral geospace: 1. Multispacecraft observations of SAID // Journal of Geophysical Research (Space Physics). 2013. Vol. 118 (9). P. 5782–5796. <https://doi.org/10.1002/jgra.50548>
- Ponomarenko A.G., Zakharov Y.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F. Simulation of global solar flares and their effects on space weather by using a laser-produced plasma clouds: Proceedings of the international astronomical union. 2006. Vol. 2 (S233). P. 59–60. <https://doi.org/10.1017/S1743921306001414>
- Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Vchivkov K.V. Simulation of strong magnetospheric disturbances in laser-produced plasma experiments // Plasma physics and controlled fusion. 2008. Vol. 50 (7). P. 074015. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/50/7/074015>

Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Nakashima H., Antonov V.M., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Muranaka T., Nikitin S.A. Laboratory and computer simulations of the global magnetospheric effects caused by anti-asteroidal explosions at near-Earth space // *Advances in Space Research*. 2001. Vol. 28 (8). P. 1175–1180.

[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00487-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00487-2)

Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Konstantin V.V. Laser plasma experiments to simulate coronal mass ejections during giant solar flare and their strong impact on magnetospheres // *IEEE transactions on plasma science*. 2007. Vol. 35 (4). P. 813–821.

<https://doi.org/10.1109/TPS.2007.902633>

Rumenskikh M.S., Chibrarov A.A., Efimov M.A., Berezutsky A.G., Posukh V.G., Zakharov Y.P., Boyarintsev E.L., Miroshnichenko I.B., Trushin P.A., Divin A.V., Shaikhislamov I.F. Laboratory modelling of solar wind interaction with Lunar Magnetic Anomalies // *Astronomy reports*. 2023. Vol. 67 (1). P. 78–85. <https://doi.org/10.1134/S1063772923010079>

Schindler K. Laboratory experiments related to the solar wind and the magnetosphere // *Reviews of geophysics*. 1969. Vol. 7 (1–2). P. 51–75. <https://doi.org/10.1029/RG007i001p00051>

Shaikhislamov I.F., Antonov V.M., Zakharov Y.P., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Ponomarenko A.G. Mini-magnetosphere: Laboratory experiment, physical model and Hall MHD simulation // *Advances in Space Research*. 2013. Vol. 52 (3). C. 422–436. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.03.034>

Shaikhislamov I.F., Antonov V.M., Zakharov Yu.P., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Ponomarenko A.G. Laboratory simulation of field aligned currents in an experiment on laser-produced plasma interacting with a magnetic dipole // *Plasma physics and controlled fusion*. 2009. Vol. 51 (10). P. 105005. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/10/105005>

Shaikhislamov I.F., Posukh V.G., Melekhov A.V., Boyarintsev E.L., Zakharov Y.P., Prokopov P.A., Ponomarenko A.G. Laboratory simulation of energetic flows of magnetospheric planetary plasma // *Journal of physics: Conference Series*. 2017. Vol. 793 (1). P. 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/793/1/012025>

Shaikhislamov I.F., Posukh V.G., Melekhov A.V., Zakharov Y.P., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G. West-east asymmetry of a mini-magnetosphere induced by Hall effects // *Plasma physics and controlled fusion*. 2015. Vol. 57 (7). P. 075007. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/7/075007>

Shaikhislamov I.F., Posukh V.G., Melekhov A.V., Prokopov P.A., Boyarintsev E.L., Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G. Interaction of counter-streaming plasma flows in a dipole magnetic field // *Plasma physics and controlled fusion*. 2016. Vol. 58 (11). P. 115002. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/58/11/115002>

Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Antonov V.M., Ponomarenko A.G. Laboratory experiment on region-1 field-aligned current and its origin in the low-latitude boundary layer // *Plasma physics and controlled fusion*. 2011. Vol. 53 (3). P. 035017. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/3/035017>

Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G., Melekhov A.V., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G. Experimental study of a mini-magnetosphere // *Plasma physics and controlled fusion*. 2014a. Vol. 56 (2). P. 025004. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/56/2/025004>

Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G., Melekhov A.V., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G. Laboratory model of magnetosphere created by strong plasma perturbation with frozen-in magnetic field // *Plasma physics and controlled fusion*. 2014b. Vol. 56 (12). P. 125007. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/56/12/125007>

Wolowski J., Kasperczuk A., Parys P., Pisarczyk T., Woryna E., Zakharov Yu.P. Laser-produced plasmas interaction with high pulsed magnetic field // *Plasma physics and controlled fusion*. 1999. Vol. 41 (3A). P. A771–A778. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/3A/069>

Zakharov Y.P. Collisionless laboratory astrophysics with lasers // *IEEE transactions on plasma science*. 2003. Vol. 31 (6). P. 1243–1251. <https://doi.org/10.1109/TPS.2003.820957>

Zakharov Y.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Vchivkov K.V., Nakashima H., Ponomarenko A.G. New type of laser-plasma experiments to simulate an extreme and global impact of giant coronal mass ejections onto Earth's magnetosphere // *Journal of physics. Conference series*. 2008. Vol. 112. P. 042011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/112/4/042011>

Zakharov Yu.P. Laboratory simulation of polarization and long-range propagation of expanding space plasma beams in transverse magnetic field. In *11-th International Conference on High Power Particle Beams*, Prague. 1996. P. 4–5.

Zakharov Yu.P. Laboratory simulation of transverse magnetic field effects on dynamics of plasma streams in magnetosphere. In: *Potential formation and related nonlinear phenomena in plasmas*, Prague. 1997. P. 225–230.

Zakharov Yu.P. Laboratory simulation of plasma releases into space and astrophysical magnetized media // *Journal of technical physics (Poland)*. 2000. Vol. 41. P. 125–132.

Zakharov Yu.P. Laboratory simulation of artificial plasma releases in space // *Advances in Space Research*. 2002. Vol. 29 (9). P. 1335–1344. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00184-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00184-9)

Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Ponomarenko A.G., Tishchenko V.N., Shaikhislamov I.F. Generation of laser-produced plasma with a high energetic efficiency for various model experiments. In: *Techn. Digest of VI Int. Symp. «Modern Problems of Laser Physics»*, Novosibirsk. 2013a. P. 191–192.

Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Melekhov A. V., Nikitin S.A., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Stoyanovsky V.O., Shaikhislamov I.F. Simulation of astrophysical plasma dynamics in the laser experiments. In: *Laser interaction and related plasma phenomena: 12th international conference, American institute of physics conference*. 1996. Vol. 369. P. 357–362. <https://doi.org/10.1063/1.50454>

Zakharov Yu.P., Eremin A.V., Orishich A.M., Parys P., Wolowski J., Woryna E. Laboratory simulation of depolarization and deflection of plasma jets drifting across magnetic field in geoplasma background. In *Proc. XXIV ICPIG*, Warsaw. 1999.

Zakharov Yu.P., Eremin A.V., Orishich A.M., Parys P., Wolowski J., Woryna E. Laboratory simulation of plasma jet propagation across geomagnetic field at presence of plasma background // *Advances in space research*. 2002. Vol. 29 (9). P. 1351–1356. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00195-3)

Zakharov Yu.P., Nakashima H. Instability analysis of exploding plasma in magnetic fields using a 3D hybrid code. In: *2nd International Conference on «Inertial fusion science and applications»*. 2001. P. 1194–1197. <https://doi.org/10.13140/2.1.4801.4082>

Zakharov Y.P., Neznamov V.P., Terekhin V.A., Shaikhislamov I.F., Posukh V.G., Trushin P.A., Chibrarov A.A., Berezutsky A.G., Rumenskikh M.S., Efimov M.A. On the opportunity of laser plasma simulation of plasma jets formation in moderate magnetic fields ~ kGs // *Journal of physics: Conference series*. 2021. Vol. 2067 (1). P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2067/1/012021>

Zakharov Yu.P., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Posukh V. G., Syntnikov V.N. Laboratory simulation of collisionless coupling between supernova remnants and magnetized interstellar medium // *Plasma Astrophysics*. 1986. Vol. 251. P. 37–40.

Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F. Laser-plasma experiments to study super high-energy phenomena during extreme compression of the Earth's magnetosphere by coronal mass ejections // *Journal of physics. Conference series*. 2016. Vol. 688. P. 012129. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/688/1/012129>

Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F. Large-scale laboratory simulation of space collisionless shocks in magnetized background by using laser-produced plasma blobs of kJ-range effective energy. In: *Techn. digest of VI int. symp. «Modern problems of laser physics»*, Novosibirsk. 2013b. P. 193–194.

Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A., Antonov V.M., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F. Generation of collisionless shocks by laser-plasma piston in magnetized background: experiment-BUW // *Plasma Phys. Technol*. 2014. Vol. 1 (3). P. 163–165.

Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F. In: *Proc. 6th int. symp. «Modern problem of laser physics»*, Novosibirsk. 2013.

Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Vchivkov K.V., Horton W., Brady P. Laser-plasma simulations of artificial magnetosphere formed by giant coronal mass ejections // *Astrophysical Space Science*. 2009. Vol. 322. P. 151–154. <https://doi.org/10.1007/s10509-009-0002-1>

PLASMA DEVICE KI-1 AS A TOOL FOR IONOSPHERE AND MAGNETOSPHERE PLASMAS INVESTIGATIONS

© 2025 E. S. Goncharov*, E. M. Urvachev

Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

**E-mail: eggoncharov@vniia.ru*

Space plasmas appear a useful tool for fundamental physics investigations. The major drawback of in-situ space experiments and measurements is inability of desirable experiment reproduction under the same physical conditions. This limitation significantly complicates space plasmas research. Yet laboratory plasma devices solve this drawback which allows to investigate space plasma phenomena in details. The paper is devoted to achievements of KI-1 laboratory plasma device (designed by Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the RAS) in exploration of fundamental physics of magnetosphere and ionosphere plasmas. Obtained results reveal relevance of laboratory space physics investigations generally and KI-1 plasma device in particular.

Keywords: space plasmas, magnetosphere, ionosphere, laboratory modeling, laser plasma.