

## О ВОЗМОЖНОСТИ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МАГНИТНЫХ ТРУБКАХ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

## ON THE POSSIBILITY FOR LABORATORY SIMULATION OF GENERATION OF ALFVEN DISTURBANCES IN MAGNETIC TUBES IN THE SOLAR ATMOSPHERE

**П.А. Прокопов**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, paprok312@gmail.com*

**Ю.П. Захаров**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, ki1z@mail.ru*

**В.Н. Тищенко**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, tvn25@ngs.ru*

**Э.Л. Бояринцев**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, dlp@laser.nsc.ru*

**А.В. Мелехов**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, dlp@laser.nsc.ru*

**А.Г. Пономаренко**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, pon@academ.org*

**В.Г. Посух**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, posukh@mail.ru*

**И.Ф. Шайхисламов**

*Институт лазерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия, ildars@ngs.ru*

**P.A. Prokopov**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, paprok312@gmail.com*

**Y.P. Zakharov**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, ki1z@mail.ru*

**V.N. Tishchenko**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, tvn25@ngs.ru*

**E.L. Boyarintsev**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, dlp@laser.nsc.ru*

**A.V. Melekhov**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, dlp@laser.nsc.ru*

**A.G. Ponomarenko**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, pon@academ.org*

**V.G. Posukh**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, posukh@mail.ru*

**I.F. Shaikhislamov**

*Institute of Laser Physics SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, ildars@ngs.ru*

**Аннотация.** Исследовалась возможность генерации альфвеновских возмущений в магнитных трубках в условиях взрывающейся лазерной плазмы в замагниченной фоновой плазме. Аналогичные по эффекту возбуждения волн торсионного типа процессы, предположительно, обеспечивают перенос энергии от фотосферы Солнца к короне. Исследования проводились на экспериментальном стенде КИ-1, представляющем собой цилиндрическую высоковакуумную камеру диаметром 1.2 м, длиной 5 м, с внешним магнитным полем до 500 Гс вдоль оси камеры и давлением в рабочем режиме до  $2 \cdot 10^{-6}$  торр. Лазерная плазма создавалась при фокусировке  $\text{CO}_2$ -лазерного импульса на плоской полиэтиленовой мишени и распространялась в фоновой водородной (или гелиевой) плазме  $\theta$ -пинча. В результате экспериментально смоделирована магнитная трубка радиусом 15–20 см вдоль оси камеры и направления внешнего магнитного поля, измерено распределение концентрации плазмы в трубке. Зарегистрировано распространение альфвеновской волны вдоль магнитного поля по возмущению поперечной компоненты  $B_\phi$  магнитного поля и продольного тока  $J_z$ . Эти возмущения распространяются со скоростью 70–90 км/с, близкой к альфвеновской, и обладают левосторонней круговой поляризацией поперечной

**Abstract.** The paper deals with generation of Alfvén plasma disturbances in magnetic flux tubes through exploding laser plasma in magnetized background plasma. Processes with similar effect of excitation of torsion-type waves seem to provide energy transfer from the solar photosphere to corona. The studies were carried out at experimental stand KI-1 represented a high-vacuum chamber of 1.2 m diameter, 5 m long, external magnetic field up to 500 Gs along the chamber axis, and up to  $2 \cdot 10^{-6}$  Torr pressure in operating mode. Laser plasma was produced when focusing the  $\text{CO}_2$  laser pulse on a flat polyethylene target, and then the laser plasma propagated in  $\theta$ -pinch background hydrogen (or helium) plasma. As a result, the magnetic flux tube of 15–20 cm radius was experimentally simulated along the chamber axis and the external magnetic field direction. Also, the plasma density distribution in the tube was measured. Alfvén wave propagation along the magnetic field was registered from disturbance of the magnetic field transverse component  $B_\phi$  and field-aligned current  $J_z$ . The disturbances propagate at near-Alfvén velocity of 70–90 km/s and they are of left-hand circular polarization of the transverse component of magnetic field. Presumably, Alfvén wave is generated by the magnetic laminar mechanism of collisionless interaction between laser plasma cloud and background. The right-hand polarized high-frequency

компоненты магнитного поля. Предположительно, альфвеновская волна генерируется за счет магнитного ламинарного механизма бесстолкновительного взаимодействия облака лазерной плазмы и фона. Зарегистрирован высокочастотный вистлерный предвестник, распространяющийся перед альфвеновской волной со скоростью до 300 км/с, обладающий правосторонней поляризацией, направление поляризации меняется с приходом альфвеновской волны. Обнаружены признаки медленной магнитозвуковой волны в виде скачка концентрации фоновой плазмы с одновременным вытеснением внешнего магнитного поля. Это возмущение распространяется со скоростью ~20–30 км/с, близкой к скорости ионного звука при малом значении плазменного бета, и, по предварительным оценкам, переносит около 10 % исходной энергии лазерной плазмы.

**Ключевые слова:** нагрев солнечной короны, магнитные трубки, альфвеновские волны, медленные магнитозвуковые волны, вистлеры, магнитный ламинарный механизм.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Широко известной проблемой при исследованиях Солнца является проблема нагрева солнечной короны. Температура солнечной поверхности (фотосферы) составляет приблизительно 5800 °С, в то время как температура солнечной короны превосходит ее на несколько порядков [Прист, 1985]. Существуют различные гипотезы, объясняющие нагрев солнечной короны до столь высоких температур. Одна из гипотез предполагает перенос энергии от поверхности Солнца к короне посредством распространяющихся в плазме альфвеновских волн (АВ) или медленных магнитозвуковых (ММЗ) волн. Данные волны распространяются в плазме, находящейся во внешнем магнитном поле. Частицы плазмы движутся преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля и при достаточной напряженности поля образуют так называемую магнитную плазменную трубку вдоль силовой линии. В данной работе приведены результаты эксперимента по моделированию плазменных процессов в трубках, имеющих начало и конец в фотосфере, но большей частью находящихся в атмосфере Солнца (в короне). В целом модельные эксперименты посвящены исследованию генерации альфвеновских и ММЗ-волн (и, возможно, сопутствующих ударных волн) на стенде КИ-1 при инъекции сгустков лазерной плазмы (ЛП) в конусе с раствором ~1 ср и осью вдоль магнитного поля  $B_0$  (начальная конфигурация облака ЛП имеет вид направленного взрыва), что характерно для процессов генерации и распространения ММЗ-волн и АВ в солнечной атмосфере. Помимо них в ходе экспериментов были получены данные о быстрых высокочастотных возмущениях — электронных вистлерах, распространяющихся в магнитных трубках со скоростью больше альфвеновской и предшествующих АВ и ММЗ-волнам.

whistler predictor was registered which have been propagating before Alfvén wave at 300 km/s velocity. The polarization direction changed with Alfvén wave coming. Features of a slow magnetosonic wave as a sudden change in background plasma concentration along with simultaneous displacement of the external magnetic field were found. The disturbance propagates at ~20–30 km/s velocity, which is close to that of ion sound at low plasma beta value. From preliminary estimates, the disturbance transfers about 10 % of the original energy of laser plasma.

**Keywords:** Solar corona heating, magnetic flux tubes, Alfvén waves, slow magnetosonic waves, whistlers, magnetic laminar mechanism.

Одной из основных целей данных модельных опытов являлось исследование возможности генерации АВ торсионного типа и их распространения в условиях плазменных структур, имитирующих магнитные трубки в солнечной атмосфере. Такие волны, генерируемые вращательными движениями (по азимуту) на поверхности фотосферы [Antolin, Shibata, 2010], в настоящее время считаются одними из наиболее эффективных источников нагрева короны [De Moortel, Nakaryakov, 2012; Antolin et al., 2015; Okamoto et al., 2015]. Основанием для новых модельных экспериментов данного типа на стенде КИ-1 послужили расчеты [Тищенко, Шайхисламов, 2010, 2014; Тищенко и др., 2014, 2015] формирования цилиндрических каналов вдоль магнитного поля (наподобие магнитной трубки), внутри которых распространялись сгустки ЛП (вместе с генерируемыми ими АВ и ММЗ-волнами), а также результаты предшествующих экспериментов с ЛП [Антонов и др., 1985; Захаров и др., 2006; Шайхисламов и др., 2015] по моделированию различных нестационарных процессов в космической плазме [Вшивков и др., 1987; Brady et al., 2009; Dudnikova et al., 1990; Mourenas et al., 2006; Ponomarenko et al., 2007, 2008; Zakharov, 2002, 2003; Zakharov et al., 2009]. Эксперименты по генерации и распространению торсионных альфвеновских волн (ТАВ) проводились и ранее, но только в фоновой плазме (ФП) с размерами  $L$  поперек поля, сравнимыми с антенной [Muller, 1974] или стенками камеры [Wilcox et al., 1961], либо при больших  $L$ , но в отсутствие магнитно-плазменных структур типа магнитной трубки, т. е. скорее в однородной безграничной ФП [Yagai et al., 2003] с собственными дисперсионными и поляризационными характеристиками ТАВ.

Другой новой и важной проблемой моделирования ТАВ является сам способ генерации именно торсионных АВ, который по возможности должен наиболее близко физически соответствовать натурным условиям — сдвигово-поворотным смещениям силовых линий магнитного поля (в фотосфере). В этом отношении наиболее перспективным является так называемый магнитный ламинарный механизм (МЛМ) бесстолкновительного взаимодействия [Башурин и др., 1983] сверхальфеновских потоков плазмы, распространяющихся поперек магнитного поля  $B_0$ . Этот механизм впервые был экспериментально подтвержден на стенде КИ-1 [Антонов и др., 1985], а впоследствии в работе [Шайхисламов и др., 2015]. Там же более подробно был исследован основной механизм магнитного ламинарного бесстолкновительного взаимодействия — обмен электронами ЛП и ФП, определяющий в данном случае размер  $R^*$  (см. таблицу) диамагнитной каверны [Wright, 1971]. С точки зрения генерации ТАВ важным свойством МЛМ является формирование на масштабах  $R^*$  вихревых электрических полей  $E_\phi$ , ускоряющих ионы ФП вместе с замороженным в нее магнитным полем [Prokhorov et al., 2016]. В результате там (под углами  $\theta \approx \pm 45^\circ$  к полю  $B_0$ ) формируется система  $B_\phi$ -полей напряженностью вплоть до  $B_0/2$  [Башурин и др., 1983], что в совокупности с  $E_\phi$  может достаточно эффективно генерировать ТАВ. В дальнейших гибридных расчетах по МЛМ [Winske, Gary, 2007] действительно наблюдалось формирование возмущений магнитного поля альфеновского типа вблизи оси  $Z$  (вдоль  $B_0$ ) снаружи сферического облака плазмы.

В данной работе представлены первые результаты экспериментов по моделированию процессов генерации ТАВ именно за счет МЛМ, хотя их постановка не исключает проявления и других механизмов генерации, рассматриваемых пока только теоретически [Oraevsky et al., 2002; Vranjes, 2015].

## 1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлена схема эксперимента «Дуплет» на экспериментальном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН [Zakharov, 2003]. Цилиндрическая высоковакуумная камера длиной 5 м, диаметром 1.2 м заполняется фоновой плазмой ( $H^+$  или  $He^+$ ) из источника типа  $\theta$ -пинча при исходном давлении в рабочем режиме  $\sim 10^{-6}$  торр. ЛП-сгустки могут генерироваться двумя независимыми лазерными  $CO_2$ -системами микросекундного диапазона (ЛУИ-1, ЗГ-2) с близкими параметрами излучения (до 200 Дж), сфокусированными на плоскую или выпуклую мишень из полиэтилена (размер лазерного пятна фокусировки  $\varnothing 2.5$  см). Внешнее магнитное поле  $B_0$  до 500 Гс в камере создается квазистационарными источниками, подающими ток на соленоид, покрывающий всю внешнюю поверхность камеры. Диагностика плазмы в камере проводится с помощью двойных зондов Ленгмюра P1 (совмещенного с магнитными зондами Mz и Mφ) и P0 (с магнитными зондами Vg, Vz и Vf) и пары зондов IK1, IK2 с соответствующими трехкомпонентными магнитными зондами RM1 и RM2 ( $L, T, H$ ). Для прямой регистрации токов  $J_z$ , связанных с генерируемыми АВ воз-

мущениями фона [Oraevsky et al., 2002; Nieman et al., 2013], использовался пояс Роговского (PR) диаметром 5 см, электростатически экранированный от наводок потенциала плазмы (как и магнитные зонды). Миниатюрные коллекторы KB1 и KB2 направленного потока ионов  $J_i = eznV_i$  (с концентрацией  $n$  и скоростью  $V_i$ ) в основном применялись для регистрации таких потоков вдоль оси  $Z$ , а зонды KB3 в виде симметричных двойных электродов (радиусом больше радиуса Дебая  $r_D$ ) — для оценки  $J_i$  и температуры электронов плазмы  $T_e$ .

Основные параметры и критерии подобия эксперимента «Дуплет» приведены в таблице с учетом характерных скоростей в ФП для данной задачи.

Приведенные в таблице основные безразмерные критерии являются достаточными для постановки на стенде КИ-1 только обычных для его основной программы экспериментов по моделированию процессов и явлений с облаками взрывающейся плазмы в космосе [Zakharov, 2003]. Однако для данной работы они являются только ориентировочными: в ней, по сути, применяется метод физического моделирования, в котором главное — воспроизведение в лаборатории основных условий реализации тех или иных интересующих нас процессов, в данном случае генерации и распространения ТАВ в магнитных трубках. Главным залогом успешного решения такой задачи было обнаруженное явление (см. раздел 3) формирования протяженной структуры (не менее 2 м) типа магнитной трубки при взаимодействии сгустков ЛП с замагниченной ФП с поперечным размером каналирования порядка радиуса диамагнитной каверны ЛП. Этот результат может иметь большое значение не только для физики активных явлений на Солнце, но и для анализа уже проведенных и планирования новых активных экспериментов [Oraevsky et al., 2002] в магнитосфере Земли.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной общей проблемой постановки лабораторных опытов по моделированию в МГД-режиме процессов и явлений в космической плазме [Zakharov, 2003] являются недостаточно большие размеры ( $L \sim 1$  м) обычных плазменных установок. Поскольку в данном случае длина волны  $\lambda \gg C/\omega_{pi}$ , требуется либо применение фоновой плазмы повышенной концентрации  $n^*$  до  $10^{14}$  см $^{-3}$ , либо создание установки с продольным магнитным полем очень большой протяженности  $L \geq 10$  м. Естественно, что почти все опыты по генерации и исследованию АВ проводятся по первому варианту (установки VINETA [Rahbarina et al., 2010], HELIX [Kline, Scime, 2003] и HITOP [Yagai et al., 2003]). Эксперименты по второму варианту проводятся только на установке LAPD [Gekelman et al., 2003; Niemann et al., 2013] длиной  $L \geq 19$  м и с газоразрядной плазмой низкой плотности  $n^* \geq 10^{12}$  см $^{-3}$ . Экспериментальные возможности стенда КИ-1 ИЛФ СО РАН позволяют не только исследовать процессы распространения и взаимодействия АВ, но и изучать принципиально важные процессы их генерации именно посредством облаков взрывающейся (в том числе лазерной) плазмы как вероятного источника АВ на Солнце, связанного с явлениями вспышечного типа [Vranjes, 2015].

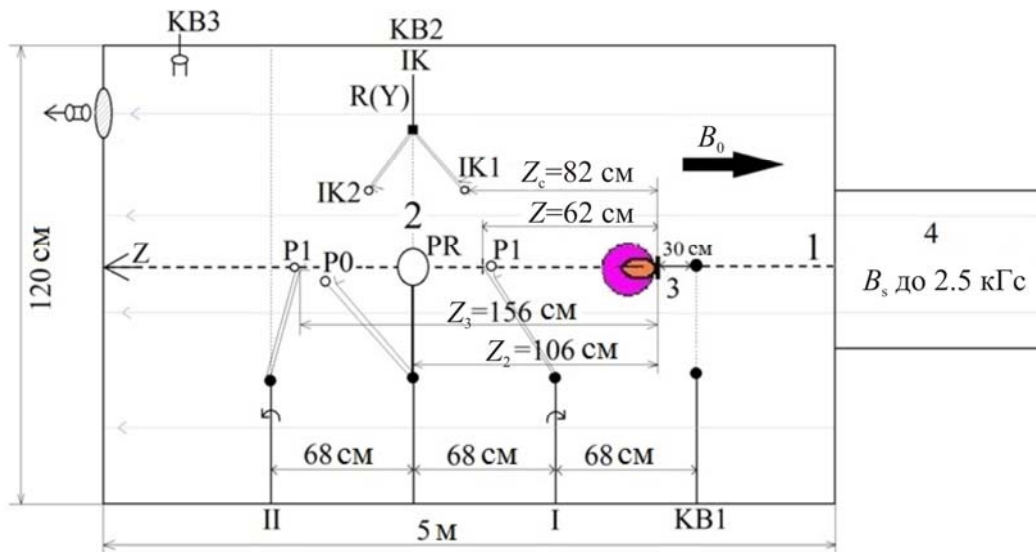


Рис. 1. Схема экспериментального стенда КИ-1: 1 — ось симметрии камеры; 2 — центральное сечение камеры; 3 — лазерная мишень; 4 —  $\theta$ -пинч. На схеме показаны два положения, в которых находился зонд P1 на разных этапах эксперимента

Параметры эксперимента

Размерные параметры	
Концентрация $H^+/He^+$ -фона, $n^*$	$(0.5 \div 3.5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Ионный скин-масштаб (по фону)	$C/\omega_{pi} \sim 4 \text{ см}$
Магнитное поле в камере (в фоне)	$B_0 = 100 \div 500 \text{ Гс}$
Скорость фронта облака в вакууме без поля (в вакууме в магнитном поле)	$V_0 \approx 150 \text{ км/с}$ ( $V_M \approx 90 \text{ км/с}$ )
Кинетическая энергия сгустка ЛП (эффективная $E_0 = E_k \cdot 4\pi/\Delta\Omega$ , при полном эффективном числе $N_0$ электронов ЛП)	$E_k \sim 10 \text{ Дж}$ ( $E_0 = 30 \text{ Дж}$ и $N_0 \sim 10^{18}$ при обычном определении эффективной энергии как $E_0 = 0.3 N_0 (m/z) V_0^2$ )
Радиус торможения ЛП магнитным полем $B_0$ в вакууме (радиус каверны)	$R_b = (3E_0/B_0^2)^{1/3} \sim 30 \text{ см}$ с учетом геометрии ЛП при $B_0 = 175 \text{ Гс}$
Температура электронов фона	$T_e^* \sim 10 \div 20 \text{ эВ}$
Длина свободного пробега ионов ЛП в фоне по начальной скорости $V_0$ (или по их вдвое уменьшенной скорости, относительно фона до $V_R$ )	$\lambda_{ii}^* \sim 200 \text{ см}$ по ион-ионным кулоновским столкновениям (до $\leq 20 \text{ см}$ при $V_R \approx 60 \text{ км/с}$ в $H^+$ -фоне)
Скорость Альфвена. Длина волны Альфвена (по $Z$ )	$C_A = 70 \text{ км/с}$ , $\lambda_A \sim 50 \text{ см}$ ( $B_0 = 175 \text{ Гс}$ , фон — водород, $n^* = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ )
Размеры ФП вдоль ( $Z_f$ ) и поперек ( $R_f$ )	$\sim 100\text{--}200 \text{ см}$ и $20 \text{ см}$
Безразмерные критерии подобия	
Число Альфвена–Маха	$M_A = V_M/C_A \geq 1$
$L_{pi} = (C/\omega_{pi})/R_b$	$L_{pi} \sim 0.5$
Замагниченность ионов облака при зарядово-массовом составе облака $\langle m_i/Z_i \rangle \approx 2.6$ а.е.м.	$\epsilon_b = R_L/R_b = 0.7 (\leq 1)$ при ларморовском радиусе ионов облака $R_L = 21 \text{ см}$
Радиус каверны облака в фоне	$R^* \approx (3N_0/4\pi n^*)^{1/3} \approx 20 \text{ см}$
МЛМ-параметр в $H_+$ -фоне	$\delta = R^2/R_L R_L^* \sim 2.5$ при ларморовском радиусе ионов облака $R_L \approx 20 \text{ см}$ , ионов фона $R_L^* \approx 8 \text{ см}$ ( $\propto V_0$ ) и меньшей скорости $\sim 0.7 V_0$ разлета (под углом $\sim 45^\circ$ к нормали мишени)
Плазменное $\beta$	$\beta = 8\pi n k T_e^*/B_0^2 \sim 0.5$
Число Кнудсена	$Kn_i = \lambda_{ii}^*/R_b \sim 10$ (по начальной скорости $V_0$ , однако до $\leq 1$ (!) при реальной скорости $V_R \approx 60 \text{ км/с}$ )
Минимальные требования по размерам среды выполняются как $Z_f > \lambda_A$ и $R_f \geq R_b^*$	

Вспышки плазмы взрывного типа как источник АВ существенно отличаются от наиболее часто рассматриваемых различных неустойчивостей (или генераторов токов и магнитных полей), однако наиболее естественным образом могут воспроизвести сопутствующие взрывным явлениям процессы инжекции сгустков энергичной плазмы в фоновую вместе с генерацией АВ. Поэтому выбранная в данной работе постановка модельного эксперимента хотя и усложняет интерпретацию его результатов (в отличие от варианта инжекции поперек магнитного поля, когда ось конуса разлетающейся ЛП направлена перпендикулярно внешнему магнитному полю  $B_0$  [Niemann et al., 2013] и сгусток ЛП оказывается в «хвостовой» части АВ, движущейся вдоль магнитного поля), но позволяет исследовать влияние на АВ не только генерируемых одновременно с ними электронных вистлеров, но и ММЗ-волн.

На основе критериев подобия задачи был проведен анализ требуемой постановки эксперимента и были получены соответствующие экспериментальные параметры, приведенные в разделе 1 и ниже. Важно отметить, что упомянутый во введении гипотетический МЛМ-вариант генерации ТАВ за счет  $B_\phi$ -полей в облаке плазмы был частично и успешно опробован в японских экспериментах [Yagai et al., 2003], в которых использовалась эффективная антенна в виде кольцеобразного пояса Роговского, подключенная к генератору импульсного тока и создающая в итоге именно поле  $B_\phi$  внутри пояса и ток  $J_z$  вдоль поля  $B_0$  за счет вихревых электрических полей в ФП. Основным результатом проведенного анализа заключается в выявленной зависимости для  $B_\phi$ -полей, пропорциональных  $\delta \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta$  [Prokhorov et al., 2016]. Такая зависимость обусловлена вмороженностью магнитного поля в ФП и начальным ускорением ее ионов именно в азимутальном направлении (как в торсионных АВ). Таким образом, в данном случае МЛМ-ускорение максимально на экваторе облака. В результате в нем формируются две кольцевые структуры противоположных  $B_\phi$ -полей, расположенных выше и ниже экватора (при  $\theta \approx 45^\circ$ ), почти на границе каверны свехальфеновского облака плазмы в фоне с расчетным радиусом  $R^* = (3N_0/4\pi n)^{1/3}$  для полного числа электронов в облаке  $N_0$ , связанного с его энергией как  $E_0 = 0.3(m/z)N_0V_0^2$ . Если рассматривать такую систему двух токов (разнесенных по Z на  $\Delta \approx 1.5R^*$ ) в качестве генератора ТАВ, то можно было бы ожидать возбуждения их с длиной волны  $\lambda \approx 3R^*$ . Согласно экспериментальному дисперсионному соотношению для осесимметричных АВ [Yagai et al., 2003], отклонение их скорости от МГД-значения ( $C_A$ ) происходит при  $K = k_{||}C/\omega_{pi} \geq 0.5$  или  $\lambda \leq 4\pi C/\omega_{pi}$ , тогда для их моделирования в лаборатории необходим размер каверны  $R^* \geq 6C/\omega_{pi} \approx 25$  см, что заведомо выполняется в эксперименте «Дуплет» (см. таблицу). Аналогично данному пространственному критерию генерации АВ при достаточно больших  $\delta \sim 5$  (что достаточно хорошо выполняется в эксперименте) можно оценить и временной кри-

терий торможения  $T_d$  облака ЛП в замагниченной ФП как  $T_d \sim 1.5R_b/V_0 > T_{ci}^*/2$ , что, согласно данным о генерации АВ при заданной частоте генератора  $B_\phi$ -полей на установке НИТОР [Yagai et al., 2003], также выполняется. Здесь  $T_{ci}^* = 2\pi/\omega_{ci}$  — период, соответствующий  $\omega_{ci}^*$  — циклотронной частоте ионов фона.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

#### 3.1. Альфвеновские и медленные магнитозвуковые волны

Все результаты опытов были получены за счет реализации плазменной магнитной трубки, геометрия которой была исследована во внешнем магнитном поле напряженностью 100, 175, 350 Гс. Установлен спад концентрации плазмы по мере продвижения вдоль  $B_0$  и удаления от мишени. Радиус магнитной трубки составляет  $\sim 15\text{--}20$  см. На рис. 2 приведены измерения радиального распределения концентрации плазмы на различных расстояниях от мишени. Большой разброс точек связан с низкой воспроизводимостью параметров эксперимента и погрешностью измерительного оборудования  $\sim 15\%$ .

В отсутствие ФП и внешнего магнитного поля скорость фронта ЛП составляет  $\sim 150$  км/с. При движении в магнитном поле скорость фронта ЛП в вакууме при выходе из каверны уменьшается до  $\sim 100$  км/с. На стадии формирования магнитной каверны ионы ЛП теряют поперечную составляющую скорости и перенаправляются магнитным полем вдоль оси, поэтому фронт ЛП в магнитном поле имеет меньшую скорость, чем в его отсутствие. В ФП возмущение распространяется со скоростью  $\sim 60\text{--}80$  км/с при собственной скорости движения ФП  $\sim 20\text{--}30$  км/с. Проведенные независимо наблюдения ЛП в ФП и в отсутствие ФП показывают, что при наличии ФП вдоль магнитного поля регистрируется распространение не ЛП, а волны сжатия ФП. На рис. 3, 4 приведены примеры R-t-диаграмм, описывающих время прихода плазмы на зонды на различном удалении от мишени. Приведенные значения скорости

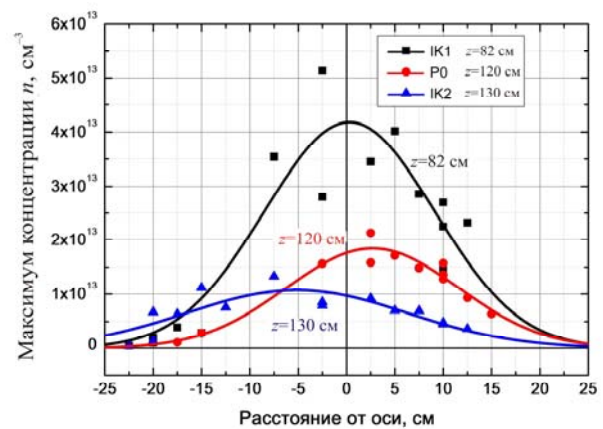


Рис. 2. Радиальное распределение концентрации плазмы на различных расстояниях  $z$  от мишени.  $B_0=350$  Гс, двойной лазерный импульс ЗГ2+ЛУИ, задержка между импульсами 10 мкс, вакуум, максимум концентрации плазмы через  $\sim 30$  мкс после импульса



рассчитывались путем усреднения множества аналогичных R-t-диаграмм.

Важным результатом работы была регистрация типичных признаков альфвеновских и ММЗ-волн. На рис. 5 приведены сигналы, отражающие характерные признаки АВ. Показания магнитных зондов RM1H и RM2H, находившихся на расстояниях 82 и 130 см от мишени соответственно, отражают возмущение компоненты магнитного поля  $B_\phi$ , которое является одним из характерных признаков АВ. Другим признаком АВ является ток  $J_z$ , которому соответствует возмущение  $B_z$ . Ток измерен поясом Роговского (ПР) на расстоянии 106 см от мишени. Из графика видно, что максимумы этих сигналов приходят на датчики с временной задержкой, соответствующей их удалению от мишени. В случае когда оба магнитных зонда находились на расстоянии 106 см от мишени (там же, где и ПР), но были смещены по радиусу относительно оси на  $\sim 5$  см, максимумы возмущения поля  $B_\phi$  и тока  $J_z$ , измеренного ПР, совпадали по времени. Вертикальными штриховыми линиями на графике обозначены моменты времени, соответствующие началу АВ (7.85 мкс) на зонде RM1H и максимуму вытеснения внешнего поля  $B_z$ , что соотносится с ММЗ-возмущением (см. далее).

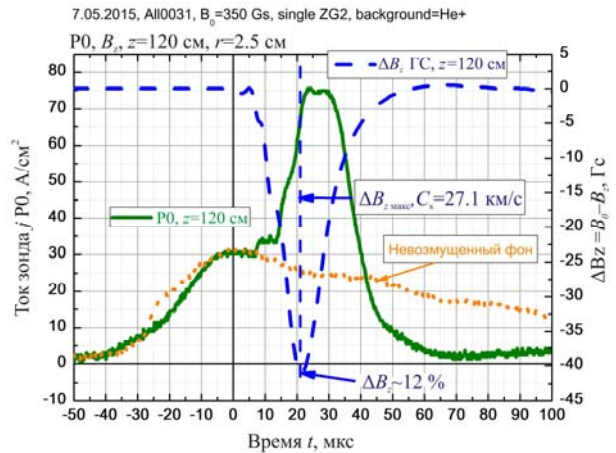


Рис. 5. Возмущения магнитных полей  $B_\phi$  и тока  $J_z$ , признаки АВ.  $B_0=175$  Гс, лазер ЗГ2, фон — гелий, координаты датчиков: RM1H —  $r=5$  см,  $z=82$  см; ПР —  $r=0$  см,  $z=106$  см; RM2H —  $r=5$  см,  $z=130$  см

Перед началом АВ на зонде RM1H видно более высокочастотное вистлерное возмущение (см. раздел 3.2). Экспериментальное значение скорости АВ получено как отношение расстояния от мишени ко времени прихода возмущения и составляет в данном случае 104.5 км/с. За вычетом скорости движения ФП (30 км/с), внутри которой распространяется возмущение, экспериментальная скорость распространения АВ относительно ФП составляет  $V_A=74.5$  км/с. При напряженности внешнего магнитного поля  $B_0=175$  Гс, концентрации ФП  $n^*=5 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ , массе ионов ФП  $m_i^*=4$  а.е.м. расчетное значение скорости составляет

$$C_A = 2.2 \cdot 10^{11} B_0 / \sqrt{n^* m_i^*} = 86.1 \text{ км/с}$$

Были получены также результаты, отражающие характерные признаки ММЗ-волны. Сигнал тока двойного зонда Ленгмюра пропорционален концентрации плазмы на зонде. На рис. 6 приведен сигнал зонда P0. Видно, как появляется возмущение концентрации ФП (резкий скачок), вызванное взрывом ЛП, после которого не приходит уже никакой плазмы. Для сравнения приведен сигнал только от ФП без лазерного импульса. Видно, что ЛП «выметает» фон, образуя резкий скачок концентрации, за которым ничего не следует. На рисунке приведен также сигнал магнитного зонда  $B_z$ , сопряженного с зондом P0, показывающий вытеснение внешнего магнитного поля примерно на 12 %, что также является признаком ММЗ-волны. Экспериментальная скорость данного возмущения, рассчитанная аналогичным способом, равна 57.1 км/с, что, за вычетом скорости ФП  $V_b=30$  км/с, составляет 27.1 км/с. Расчетное значение скорости ионного звука

$$C_s = 10^6 \sqrt{Z_i^* T_e^* / m_i^*} = 22.4 \text{ км/с}$$

при зарядовом числе ионов  $Z_i^*=1$ , температуре электронов ФП  $T_e^*=20$  эВ, массе ионов ФП  $m_i^*=4$  а.е.м.

В ИЛФ СО РАН было проведено компьютерное моделирование аналогичных плазменных процессов,

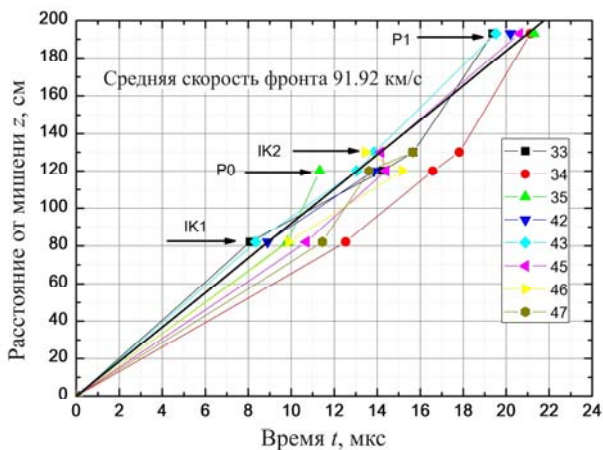


Рис. 3. R-t-диаграмма для случая облака ЛП в вакууме с магнитным полем.  $B_0=100$  Гс, лазер ЗГ2, вакуум

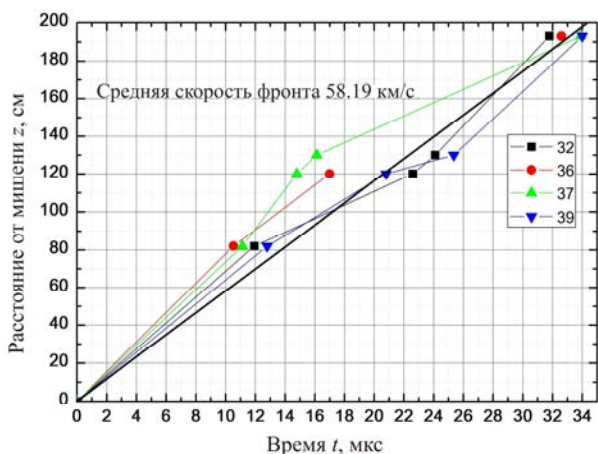


Рис. 4. R-t-диаграмма для случая облака ЛП в фоне (гелий).  $B_0=100$  Гс, лазер ЗГ2

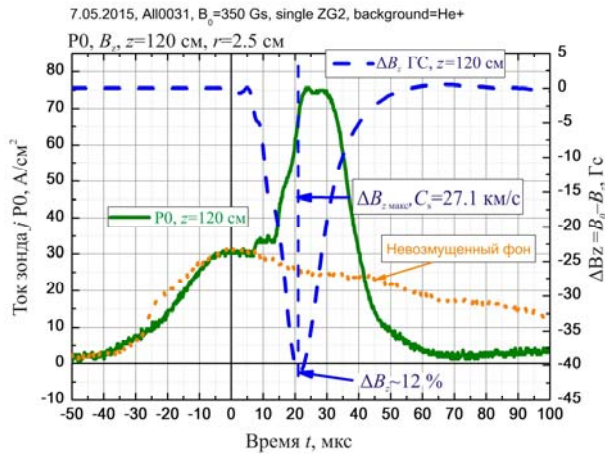


Рис. 6. Скачок концентрации ФП и вытеснение внешнего магнитного поля, признаки ММЗ-волны.  $B_0=350$  Гс, лазер ЗГ2, фон — гелий, координаты датчиков P0, Bz:  $r=2.5$  см,  $z=120$  см

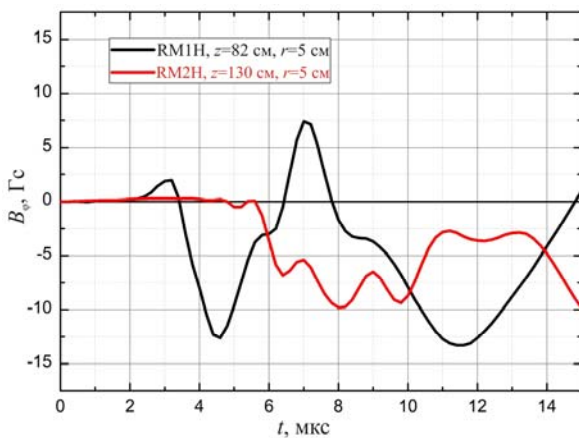


Рис. 7. Возмущение поля  $B_\phi$  на различных расстояниях  $z$  от мишени.  $B_0=175$  Гс, двойной лазерный импульс ЛУИ+ЗГ2, задержка между импульсами 3.3 мкс, фон — гелий, координаты зондов: RM1H —  $r=5$  см,  $z=82$  см; RM2H —  $r=5$  см,  $z=130$  см

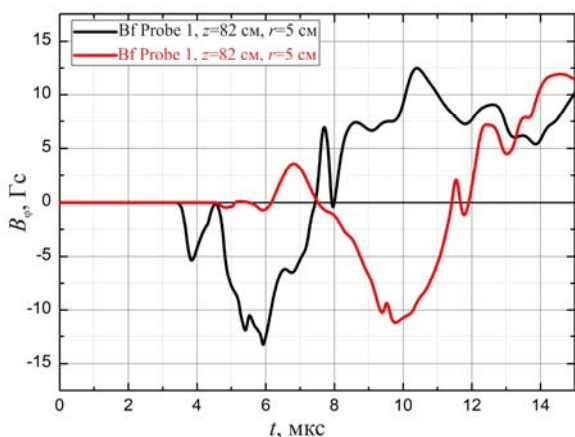


Рис. 8. Возмущения поля  $B_\phi$  по данным компьютерной модели. Наблюдается сходство с экспериментальными данными на рис. 7 по амплитуде сигнала и времени прихода сигнала на зонды

результаты которого обладают качественным соответствием с результатами эксперимента [Тищенко, Шайхисламов, 2010, 2014; Тищенко и др., 2014, 2015]. На рис. 7, 8 приведены данные [Тищенко и

др., 2015] о возмущении поля  $B_\phi$ , полученные в эксперименте и по компьютерной модели. Видно, что времена прихода сигналов на зонд и их амплитуды довольно близки.

### 3.2. Вистлеры

Регистрация поперечной поляризации магнитных возмущений и анализ их дисперсии [Dudnikova et al., 1990] показывают, что перед скачком концентрации фона (с признаками ММЗ-возмущения) распространяется не только возмущение типа АВ, но и более быстрый вистлерный предвестник. Регистрация этих компонент, проведенная зондами Bf, Bg и RM1H, RM1L (рис. 9), показывает, что поперечная компонента магнитного поля обладает характерной для вистлеров правосторонней круговой поляризацией. Направление поляризации меняется на противоположное с приходом АВ (в момент времени 11.5 мкс). На рис. 10 приведены прямые сигналы магнитных зондов — производные вариаций поперечной компоненты магнитного поля, они более наглядно отражают высокочастотные вистлерные колебания. Вертикальной штриховой линией показан момент смены поляризации — момент прихода АВ.

На рис. 11 приведены вариации концентрации плазмы по данным зонда P0 и измеренные магнитным

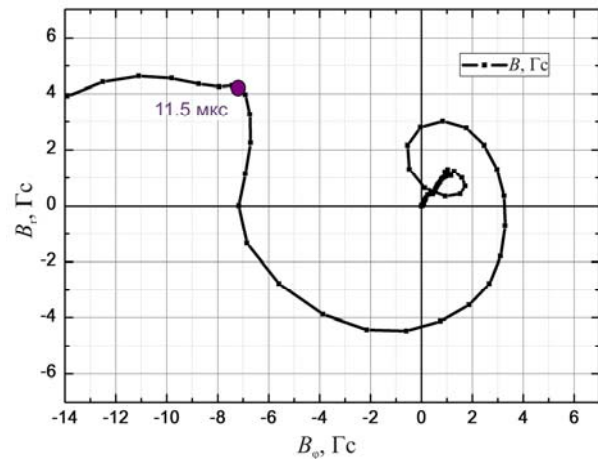


Рис. 9. Голограф поперечной компоненты магнитного поля. Правосторонняя поляризация вистлеров переходит в левостороннюю поляризацию АВ.  $B_0=175$  Гс, лазер ЛУИ, фон — водород

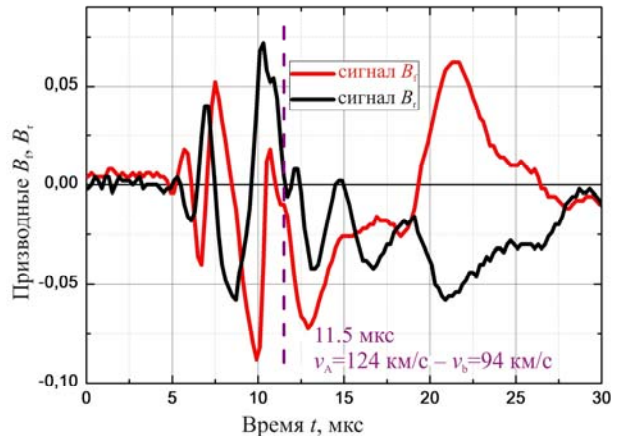


Рис. 10. Производные вариаций магнитных полей  $B_\phi, B_r$ , вистлерный предвестник.  $B_0=175$  Гс, лазер ЛУИ, фон — водород  $V_0=30$  км/с

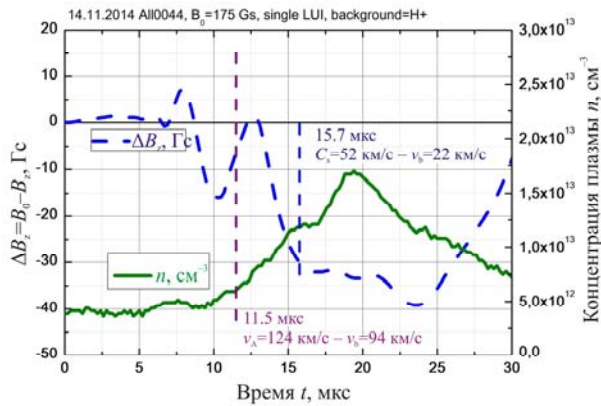


Рис. 11. Скачок концентрации ФП и вытеснение поля  $B_z$ .  $B_0=175$  Гс, лазер ЛУИ, фон — водород  $V_b=30$  км/с

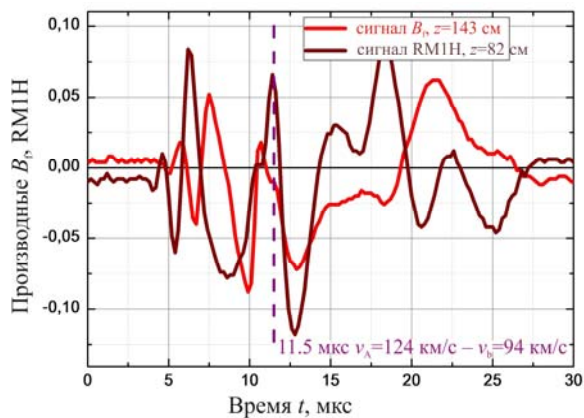


Рис. 12. Производные вариаций магнитного поля  $B_z$  на различных расстояниях от мишени.  $B_0=175$  Гс, лазер ЛУИ, фон — водород  $V_b=30$  км/с

зондом вариации компоненты магнитного поля  $B_z$ , показывающие вытеснение внешнего магнитного поля. Видно, что вистлеры не сопровождаются значительными возмущениями концентрации ФП, но практически в то же время происходят колебания продольной компоненты магнитного поля. Скорость вистлеров, вычисленная аналогичным методом как отношение расстояния от зонда до мишени ко времени прихода, составляет 286 км/с на момент начала возмущения 5 мкс, зонд находится на расстоянии 143 см от мишени. На рис. 12 приведены сигналы магнитных зондов, измеряющих  $B_z$ , расположенных на разном расстоянии от мишени, чтобы продемонстрировать, что данное вистлерное возмущение действительно распространяется вдоль  $Z$ , а не локализовано в области, в которой расположен зонд.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе экспериментов на установке КИ-1 успешно проведено лабораторное моделирование магнитной трубки радиусом  $\sim 15\text{--}20$  см и протяженностью около 2 м. Концентрация плазмы за границей магнитной трубки приблизительно в 20 раз меньше, чем в ее центре.

Другим важным результатом является регистрация высокочастотных вистлерных возмущений, распространяющихся перед альфвеновской и

ММЗ-волной в некоторых режимах эксперимента (внешнее поле 175 Гс,  $H_+$ -фон, энергия лазера  $\sim 190$  Дж). Скорость вистлеров составляет  $\sim 300$  км/с, возмущения обладают правосторонней поляризацией поперечной компоненты магнитного поля, измерения которой и сделали возможной их идентификацию.

Достигнута цель эксперимента — лабораторное моделирование АВ. Получены данные о распространении в плазменной трубке возмущения магнитного поля  $B_z$  и тока  $J_z$ , коррелирующих между собой. Скорость этого возмущения составляет  $\sim 70\text{--}90$  км/с, что близко к расчетному значению скорости АВ. В условиях бесстолкновительной плазмы, используемой в эксперименте, генерация данных волн происходит, предположительно, за счет МЛМ-взаимодействия облака ЛП с фоном.

В эксперименте промоделировано также распространение в магнитной трубке ММЗ-волны, сопровождаемой сильным скачком концентрации плазмы и вытеснением внешнего магнитного поля. Скорость распространения, измеренная по максимуму вытеснения поля  $B_0$ , составляет 20–30 км/с, что также близко к расчетному значению скорости ионного звука. По предварительным оценкам, около 10 % исходной энергии лазерного импульса переходит в энергию ММЗ-волны.

Работа выполнена в рамках программы исследований ИЛФ СО РАН П.10.1.4 (01201374303), программы Президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий...», а также по проекту РФФИ № 14-29-06036 офи-м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов В.М., Башурин В.П., Голубев А.И. и др. Экспериментальное исследование бесстолкновительного взаимодействия взаимопроникающих потоков плазмы // Журнал прикладной механики и технической физики. 1985. № 6. С. 3–10.
- Башурин В.П., Голубев А.И., Терехин В.А. О бесстолкновительном торможении ионизированного облака, разлетающегося в однородную замагниченную плазму // Журнал прикладной механики и технической физики. 1983. № 5. С. 10–17.
- Вшивков В.А., Дудникова Г.И., Захаров Ю.П. и др. Генерация плазменных возмущений при бесстолкновительном взаимодействии сверхальфвеновских потоков: Препринт № 20-87. Институт теоретической и прикладной механики, 1987. 49 с.
- Захаров Ю.П., Антонов В.М., Бояринцев Э.Л. и др. Роль желобковой неустойчивости холловского типа при взаимодействии лазерной и космической плазмы с магнитным полем // Физика плазмы. 2006. Т. 32, № 3. С. 207–229.
- Прист Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985. 589 с.
- Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф. Механизм объединения ударных волн в плазме с магнитным полем: критерии и эффективность формирования низкочастотных магнитозвуковых волн // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 5. С. 464–469.
- Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф. Механизм объединения волн: формирование низкочастотных альфвеновских и магнитозвуковых волн в плазме // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 2. С. 98–101.



Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф., Березуцкий А.Г. Механизм объединения волн в космической плазме с магнитным полем: транспортировка импульса и момента импульса // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: альманах / Под ред. ак. В.А. Садовниченко, ак. Г.И. Савина, чл.-корр. Вл.В. Воеводина. М.: Изд-во МГУ, 2014. С. 65–74.

Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Бояринцев Э.Л. и др. Моделирование лазерной плазмой процессов генерации альфвеновских и ударных волн в космической плазме с магнитными полями // VI Всероссийская конференция по взаимодействию высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. Новосибирск, 2015. С. 111–115.

Шайхисламов И.Ф., Захаров Ю.П., Посух В.Г. и др. Экспериментальное исследование бесстолкновительного сверхальфвеновского взаимодействия взаимопроникающих плазменных потоков // Физика плазмы. 2015. Т. 41, № 5. С. 434–442.

Antolin P., Shibata K. The role of torsional Alfvén waves in coronal heating // *Astrophys. J.* 2010. V. 712, N 1. P. 494–510.

Antolin P., Okamoto T. J., De Pontieu B., et al. Resonant absorption of transverse oscillations and associated heating in a solar prominence. I. Numerical aspects // *Astrophys. J.* 2015. V. 809, N 1. P. 72.

Brady P., Ditmire T., Horton W., et al. Laboratory experiments simulating solar wind driven magnetospheres // *Physics of Plasmas*. 2009. V. 16, N 4. 043112.

De Moortel I., Nakaryakov V.M., Magnetohydrodynamic waves and coronal seismology: An overview of recent results // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012. V. 370, N 1970. P. 3193–3216.

Dudnikova G.I., Orshich A.M., Ponomarenko A.G., et al. Laboratory and computer simulations of wave generation processes in non-stationary astrophysical phenomena // *Plasma Astrophysics, ESA No SP*. 1990. V. 311. P. 191–194.

Gekelman W., Van Zeeland M., Vincena S., Pribyl P. Laboratory experiments on Alfvén waves caused by rapidly expanding plasmas and their relationship to space phenomena // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2003. V. 108, N A7. P. 1281.

Kline J.L., Scime E.E. Parametric decay instabilities in the HELIX helicon plasma source // *Physics of Plasmas*. 2003. V. 10, N 1. P. 135–144.

Mourenas D., Simonet F., Zakharov Yu.P., et al. Laboratory and PIC simulations of collisionless interaction between expanding space plasma clouds and magnetic field with and without ionized background // *Journal de Physique IV*. 2006. V. 133. P. 1025–1030.

Muller G. Experimental study of torsional Alfvén waves in a cylindrical partially ionized magnetoplasma // *J. Plasma Phys.* 1974. V. 16. P. 813–822.

Niemann C., Gekelman W., Constantin C.G., et al. Dynamics of exploding plasmas in a large magnetized plasma // *Physics of Plasmas*. 2013. V. 20, N 1. 012108.

Okamoto T.J., Antolin P., De Pontieu B., et al. Resonant absorption of transverse oscillations and associated heating in a solar prominence. I. Observational aspects // *Astrophys. J.* 2015. V. 809, N 1. P. 71.

Oravsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Badin V.I., Deminov M.G. Alfvén wave generation by means of high orbital injection of barium cloud in magnetosphere // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29, N 9. P. 1327–1334.

Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Antonov V.M., et al. Laser plasma experiments to simulate coronal mass ejections during giant solar flare and their strong impact on magnetospheres // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2007. V. 35, N 4, pt. 1. P. 813–821.

Prokopov P.A., Zakharov Yu.P., Tishchenko V.N., et al. Laser plasma simulations of the generation processes of

Alfvén and collisionless shock waves in space plasma // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. In print.

Rahbarnia K., Ullrich S., Sauer K., et al. Alfvén wave dispersion behavior in single and multicomponent plasmas // *Physics of Plasmas*. 2010. V. 17, N 3. 032102.

Vranjes J. Alfvén wave coupled with flow-driven fluid instability in interpenetrating plasmas // *Physics of Plasmas*. 2015. V. 22, N 5. 052102.

Wilcox J.M., DeSilva A.W., Cooper W.S. Experiments on Alfvén-wave propagation // *Physics of Fluids*. 1961. V. 4. P. 1506.

Winske D., Gary S.P. Hybrid simulations of debris, ambient ion interactions in astrophysical explosions // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A10303.

Wright T.P. Early-time model of laser plasma expansion // *Physics of Fluids*. 1971. V. 14, N 9. P. 1905–1910.

Yagai T., Kumagai R., Hosokawa Y., et al. Excitation of an axisymmetric shear Alfvén wave by a Rogowski-type antenna // *Plasma Physics: 11<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics: ICPP2002*. AIP Publishing, 2003. V. 669, N 1. P. 137–140.

Zakharov Yu.P. Laboratory simulations of artificial plasma releases in space // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29, N 9. P. 1335–1344.

Zakharov Yu.P. Collisionless laboratory astrophysics with lasers // *Plasma Science. IEEE Transactions on Plasma Science*. 2003. V. 31, N 6. P. 1243–1251.

Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Vchivkov K.V., et al. Laser-plasma simulations of artificial magnetosphere formed by giant coronal mass ejections // *Astrophys. Space Sci.* 2009. V. 322, N 1–4. P. 151–154.

## REFERENCES

Antolin P., Shibata K. The role of torsional Alfvén waves in coronal heating. *Astrophys. J.* 2010, vol. 712, no. 1, pp. 494–510.

Antolin P., Okamoto T.J., De Pontieu B., Uitenbroek H., Van Doorselaere T., Yokoyama T. Resonant absorption of transverse oscillations and associated heating in a solar prominence. I. Numerical aspects. *Astrophys. J.* 2015, vol. 809, no. 1, p. 72.

Antonov V.M., Bashurin V.P., Golubev A.I., Zhmailo V.A., Zakharov Y.P., Ponomarenko A.G., Posukh V.G. Experimental study of the collisionless interaction of interpenetrating plasma flows. *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 1985, no. 6, p. 3 (in Russian).

Bashurin V.P., Golubev A.I., Terekhin V.A. About collisionless braking ionized clouds, fly away in a homogeneous magnetized plasma. *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 1983, no. 5, pp. 10–17 (in Russian).

Brady P., Ditmire T., Horton W., Mays M.L., Zakharov Yu.P., Laboratory experiments simulating wind driven magnetospheres. *Physics of Plasmas*. 2009, vol. 16, no. 4, 043112.

De Moortel I., Nakaryakov V.M. Magnetohydrodynamic waves and coronal seismology: An overview of recent results. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012, vol. 370, no. 1970, pp. 3193–3216.

Dudnikova G.I., Orshich A.M., Ponomarenko A.G., Vshivkov V.A., Zakharov Yu.P. Laboratory and computer simulations of wave generation processes in non-stationary astrophysical phenomena. *Plasma Astrophysics, ESA No SP*. 1990, vol. 311, pp. 191–194.

Gekelman W., Van Zeeland M., Vincena S., Pribyl P. Laboratory experiments on Alfvén waves caused by rapidly expanding plasmas and their relationship to space phenomena. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2003, vol. 108, no. A7, p. 1281.

П.А. Прокопов, Ю.П. Захаров, В.Н. Тищенко, Э.Л. Бояринцев, А.В. Мелехов, А.Г. Пономаренко, В.Г. Посух, И.Ф. Шайхисламов,

P.A. Prokopov, Y.P. Zakharov, V.N. Tishchenko, A.V. Melekhov, E.L. Boyarintsev, A.G. Ponomarenko, V.G. Posukh, I.F. Shaikhislamov

Kline J.L., Scime E.E. Parametric decay instabilities in the HELIX helicon plasma source. *Physics of Plasmas*. 2003, vol. 10, no. 1, pp. 135–144.

Mourenas D., Simonet F., Zakharov Yu.P., et al. Laboratory and PIC simulations of collisionless interaction between expanding space plasma clouds and magnetic field with and without ionized background. *Journal de Physique IV*. 2006, vol. 133, pp. 1025–1030.

Muller G. Experimental study of torsional Alfvén waves in a cylindrical partially ionized magnetoplasma. *J. Plasma Physics*. 1974, vol. 16, pp. 813–822.

Niemann C., Gekelman W., Constantin C.G., et al. Dynamics of exploding plasmas in a large magnetized plasma. *Physics of Plasmas*. 2013, vol. 20, no. 1, 012108.

Okamoto T.J., Antolin P., De Pontieu B., Uitenbroek H., Van Doorselaere T., Yokoyama T. Resonant absorption of transverse oscillations and associated heating in a solar prominence. I. Observational aspects. *Astrophys. J.* 2015, vol. 80, no. 1, p. 71.

Oravsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Badin V.I., Deminov M.G. Alfvén wave generation by means of high orbital injection of barium cloud in magnetosphere. *Adv. Space Res.* 2002, vol. 29, no. 9, pp. 1327–1334.

Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Antonov V.M., et al. 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, no. 4, pt. 1, pp. 813–821.

Priest E.R. *Solnechnaya magnitogidrodinamika* [Solar Magnetohydrodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1985, 589 p. (in Russian).

Prokopov P.A., Zakharov Yu.P., Tishchenko V.N., Shaikhislamov I.F., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Terekhin V.A. Laser plasma simulations of the generation processes of Alfvén and collisionless shock waves in space plasma. *Journal of Physics. Conference Series*. 2016. In print.

Rahbarnia K., Ullrich S., Sauer K., et al. Alfvén wave dispersion behavior in single- and multicomponent plasmas. *Physics of Plasmas*. 2010, vol. 17, no. 3, 032102.

Shaikhislamov I.F., Zakharov Y.P., Posukh V.G., Melekhov A.V., Boyarintsev E.L., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A. Experimental study of super-Alfvén collisionless interaction of interpenetrating plasma flows. *Fizika plazmy* [Plasma Physics]. 2015, vol. 41, no. 5, pp. 434–442. DOI: 10.7668/S0367292115050054 (in Russian).

Tishchenko V.N., Shaikhislamov I.F. Wave merging mechanism: formation of low-frequency Alfvén and magnetosonic waves in cosmic plasmas. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics]. 2014, vol. 44, no. 2, p. 98 (in Russian).

Tishchenko V.N., Shaikhislamov I.F. The mechanism of merging of shock waves in a plasma with a magnetic field: criteria and efficiency of formation of low-frequency magnetosonic waves. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics]. 2010, vol. 40, no. 5, pp. 464–469 (in Russian).

Tishchenko V.N., Shaikhislamov I.F., Berezutskiy A.G. The mechanism of merging of waves in space plasma with magnetic field: transportation of momentum and angular momentum. *Superkomp'yuternye tekhnologii v nauke, obrazovanii i promyshlennosti: al'manakh* [Supercomputers Technologies in Science, Education and Industry: The almanac]. Moscow, MSU Publ., 2014, pp. 65–74 (in Russian).

Tishchenko V.N., Zakharov Y.P., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Prokopov P.A., Berezutskiy A.G. Simulation of laser plasma generation processes and Alfvén shock waves in space plasma with magnetic fields. *VI Vserossiiskaya konferentsiya po vzaimodeistviyu vysokokontsentrirrovannykh potokov energii s materialami v perspektivnykh tekhnologiyah i meditsine* [6<sup>th</sup> National Conference on the Interaction of Highly Concentrated Flows of Energy Materials in Advanced Technology and Medicine]. Novosibirsk, 2015, pp. 111–115 (in Russian).

Vchivkov V.A., Dudnikova G.I., Zakharov Y.P., Orishich A.M. *Generatsiya plazmennyykh vozmushchenii pri besstolknovitel'nom vzaimodeistvii sverkhalfvenovskikh potokov* [Generation of Plasma Disturbances in the Collisionless Interaction of Super-Alfvén Flows]. Preprint no. 20-87. Novosibirsk, Institute of Theoretical and Applied Mechanics Publ., 1987, 49 p.

Vranjes J. Alfvén wave coupled with flow-driven fluid instability in interpenetrating plasmas. *Physics of Plasmas*. 2015, vol. 22, no. 5, 052102.

Wilcox J.M., DeSilva A.W., Cooper W.S. Experiments on Alfvén-wave propagation. *Physics of Fluids*. 1961, vol. 4, p. 1506.

Winske D., Gary S.P. Hybrid simulations of debris, ambient ion interactions in astrophysical explosions. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A10303.

Wright T.P. Early-time model of laser plasma expansion. *Physics of Fluids*. 1971, vol. 14, no. 9, pp. 1905–1910.

Yagai T., Kumagai R., Hosokawa Y., Hattori K., Ando A., Inutake M. Excitation of an axisymmetric shear Alfvén wave by a Rogowski-type antenna. *Plasma Physics: 11<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics. ICPP2002*. AIP Publ., 2003, vol. 669, no. 1, pp. 137–140.

Zakharov Yu.P. Laboratory simulations of artificial plasma releases in space. *Adv. Space Res.* 2002, vol. 29, no. 9, pp. 1335–1344.

Zakharov Yu.P. Collisionless laboratory astrophysics with lasers. *Plasma Science. IEEE Transactions on Plasma Science*. 2003, vol. 31, no. 6, pp. 1243–1251.

Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., et al. The role of the Hall flute instability in the interaction of laser and space plasma with magnetic field. *Fizika plazmy* [Plasma Physics]. 2006, vol. 32, no. 3, pp. 207–229 (in Russian).

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. *Astrophys. Space Sci.* 2009, vol. 322, no. 1–4, pp. 151–154.