

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МАГНИТНЫХ ТРУБКАХ НА ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЦА

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

LABORATORY SIMULATION OF GENERATION OF PLASMA PERTURBATIONS IN MAGNETIC TUBES ON THE SUN'S SURFACE

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

Альфвеновские и медленные магнитозвуковые волны, распространяющиеся в магнитных трубках на поверхности Солнца, могут являться одним из источников нагрева короны. Процессы генерации и распространения этих волн исследовались на стенде КИ-1: высоковакуумная камера длиной 5 м и диаметром 1.2 м, с внешним магнитным полем B до 500 Гс вдоль оси камеры. Лазерная плазма создавалась при фокусировке CO_2 -лазерного импульса на плоской полиэтиленовой мишени и распространялась в фоновой водородной (или гелиевой) плазме от θ -пинча. В результате, было промоделировано движение плазмы в магнитной трубке, установлена зависимость диаметра трубки от поля B . Получено радиальное распределение концентрации плазмы, ее скорости, токов вдоль магнитного поля и возмущений магнитных полей. Найдены признаки распространения более быстрой альфвеновской волны и медленной магнитозвуковой волны.

Alfven and slow magnetosonic waves propagating in magnetic tubes on the surface of the Sun can be one of the causes of solar corona heating. Generation and propagation of these waves were studied at experimental Facility KI-1: high-vacuum chamber 5 m in length and 1.2 m in diameter with applied external magnetic field B of up to 500 Gs. Laser plasma generated by focusing CO_2 laser pulse on flat polyethylene target propagated in the background plasma of hydrogen or helium generated by θ -pinch. As a result, propagation of plasma in the magnetic tube was simulated, the dependence of the diameter of the magnetic tube on the field B was found. Radial distribution of plasma density, speed, currents along the magnetic field and magnetic field perturbations were obtained. Evidence of propagation of quicker Alfven wave and slow magnetosonic wave was found.

Введение

Широко известной проблемой в исследованиях Солнца является вопрос нагрева солнечной короны. Температура солнечной поверхности составляет приблизительно 5800 °С, в то время как температура солнечной короны превосходит ее на несколько порядков [Прист, 1985]. Существуют различные гипотезы, объясняющие механизм нагрева солнечной короны до столь высоких температур. Одна из гипотез предполагает перенос энергии от поверхности Солнца к короне посредством распространяющихся в плазме Альфвеновских и медленных магнитозвуковых 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. Внутри этой трубки распространяются плазменные возмущения, осуществляющие перенос энергии от поверхности Солнца к короне. В данной работе представлены предварительные результаты экспериментов по исследованию генерации ударных волн (и сопутствующих АВ и ММЗ) на экспериментальном стенде КИ-1 при инжекции лазерной плазмы (ЛП) вдоль магнитного поля B_0 , что характерно для процессов генерации и распространения ММЗ и АВ в солнечной атмосфере.

1. Схема эксперимента

На рис. 1 представлена схема эксперимента «Дуплет» на экспериментальном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН. Высоковакуумная камера длиной 5 м, диаметром 1.2 м заполняется фоновой плазмой (H^+

или He^+) из источника типа θ -пинча. Давление вакуума в рабочем режиме $\sim 10^{-6}$ торр. ЛП генерируется двумя независимыми лазерными CO_2 -системами мкс-диапазона (ЛУИ-1, ЗГ-2) с близкими параметрами излучения (до 200 Дж), сфокусированными на плоскую мишень из полиэтилена (размер пятна фокусировки $\varnothing 2.5$ см). Внешнее магнитное поле в камере создается квазистационарными источниками, подающим ток на соленоид, покрывающий всю внешнюю поверхность камеры, и может достигать 500 Гс. Диагностика плазмы в камере проводится с помощью систем двойных зондов Ленгмюра P1 (вместе с магнитными зондами M_z и M_ϕ), P0 (с B_R , B_z и B_ϕ) и пара зондов IK1, IK2 с соответствующими магнитными RM1 (L, T, H), RM2 (L, T, H). Для прямой регистрации токов J_z , связанных с АВ-возмущениями фона [Nieman 2013; Oraevsky 2002], использовался пояс Роговского (PR) диаметром 5 см, электростатически экранированный от наводок потенциала плазмы (как и магнитные зонды). Миниатюрные коллектора KB1 и KB2 направленного потока ионов $J_i = eznV_i$ (с их 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 $\gg r_D$) для оценки J_i и температуры электронов плазмы T_e .

Основные параметры и критерии подобия эксперимента «Дуплет» приведены ниже с учетом характерных скоростей в фоновой плазме для данной задачи: скорости Альфвена $C_A = B_0 / (4\pi n^* m^*)^{1/2}$ и ионно-звуковой $C_S = (T_e^* / m^*)^{1/2}$, а также скорости $V^* \approx 20 \div 30$ км/с $\sim C_S$ собственного движения фоновой плазмы по оси Z и среднего зарядо-массового состава ионов ЛП

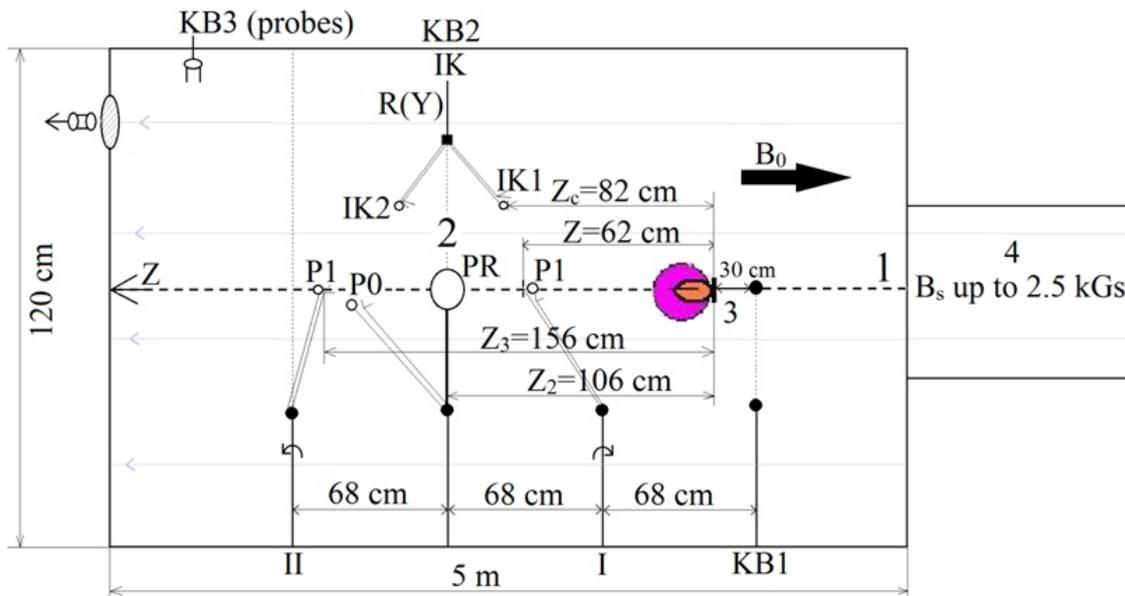


Рис. 1. Схема эксперимента.

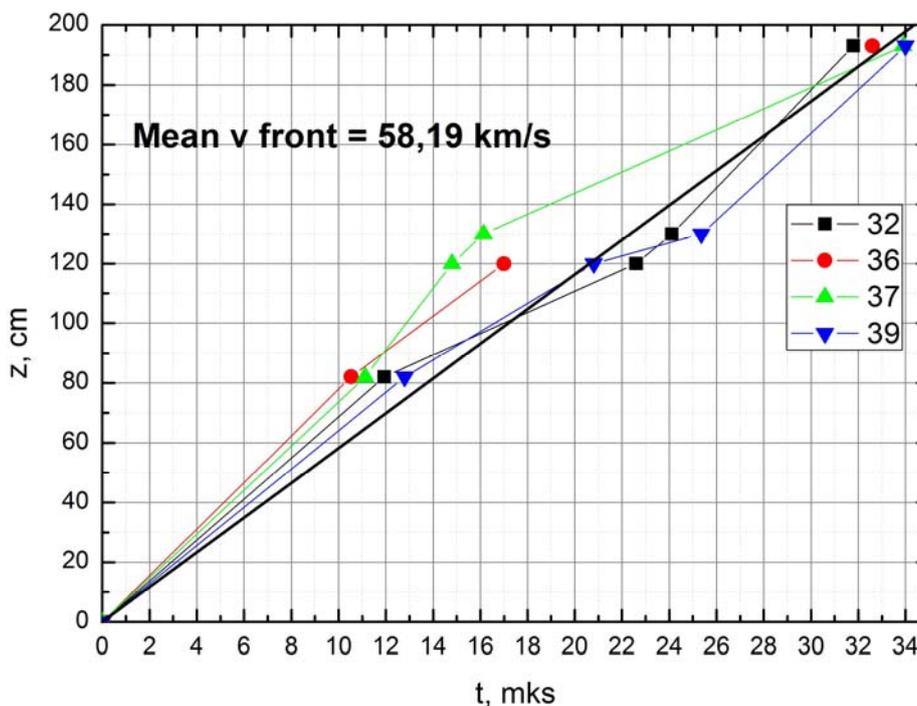


Рис. 2. R-t-диаграмма распространения ЛП гелиевом фоне с внешним магнитным полем 100 Гс.

$c\langle m/z \rangle \approx 2.5$ а.е.м. Концентрация H^+/He^+ фона n^* : $1.5 \div 3.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; ионный скин-масштаб (по фону): $C/\omega_{pi} \sim 5 \text{ см}$; магнитное поле в камере: $B_0 = 100 \div 500 \text{ Гс}$; начальная скорость фронта облака ЛП: $V_0 \approx 200 \text{ км/с}$; кинетическая энергия сгустка ЛП: $E_k \sim 20 \text{ Дж}$; радиус торможения ЛП магнитным полем B_0 : $R_b = (3E_0/B_0^2)^{1/3} \sim 25 \text{ см}$; температура электронов фона: $T_e^* \sim 10 \text{ эВ}$ и его максимальные размеры (по Z и R): $\sim 250 \text{ см} \times 21 \text{ см}$; число Альфвена-Маха: $M_A = V_0/C_A \sim 1$; $L_{pi} = (C/\omega_{pi})/R_b \approx 0.5$; замагниченность ионов облака $\epsilon_b = R_L/R_b \equiv L_{pi}^* M_A$; MLM-параметр [3]: $\delta = R^{*2}/R_L R_L^* \sim 5$; радиус каверны: $R^* \sim 20 \text{ см}$; радиус Лармора облака ЛП: $RL = 10 \text{ см}$ ($\propto V_0$), при учете меньшей скорости $\sim 0.7 V_0$ разлета (под углом $\sim 45^\circ$ к

нормали мишени); плазменное бета: $\beta = 8\pi n k T_e^*/B_0^2 \sim 0.5$.

2. Результаты эксперимента

Все результаты опытов были получены за счет реализации плазменной магнитной трубки. Исследована геометрия плазменной магнитной трубки во внешнем магнитном поле напряженностью 100, 175, 350 Гс. Установлен спад концентрации плазмы по мере продвижения вдоль B_0 по мере удаления от мишени. Радиус магнитной трубки составляет $\sim 15 \text{ см}$ при напряженности внешнего магнитного поля 350 Гс и незначительно увеличивается по мере его уменьшения. При напряженности поля 100 Гс радиус составляет $\sim 20 \text{ см}$.

При движении в магнитном поле скорость фронта ЛП в вакууме уменьшается до ~ 100 км/с. В фоновой плазме возмущение распространяется со скоростью $\sim 60\div 80$ км/с, при собственной скорости движения фона $\sim 20\div 30$ км/с. Проведенные независимо наблюдения ЛП в отсутствии фона и в фоне показывают, что при наличии фоновой плазмы вдоль магнитного поля регистрируется распространение не ЛП, а волны сжатия концентрации фона, скорость которой практически не зависит от B_0 . На рис. 2 приведен пример $R-t$ -диаграммы, описывающей время приходы плазмы на зонды на различном удалении от мишени.

На данном этапе основным результатом модельных опытов является успешная регистрация типичных признаков АВ и ММЗ. Признаками АВ являются возмущения магнитного поля B_ϕ , и соответствующий ему ток J_z , а для ММЗ – сжатие фона с вытеснением B_z . На рис. 3 и 4 приведены типичные виды сигналов, характеризующих изменение данных величин. Наблюдается временная корреляция между возмущением B_ϕ , B_z , J_z и n , причем АВ-возмущение обладает явно большей скоростью, чем ММЗ. В ИЛФ СО РАН была создана компьютерная модель аналогичных плазменных процессов, результаты которой обладают качественным соответствием с результатами эксперимента [Тищенко, 2014].

Регистрация поперечной поляризации магнитных возмущений и анализ их дисперсии показывают,

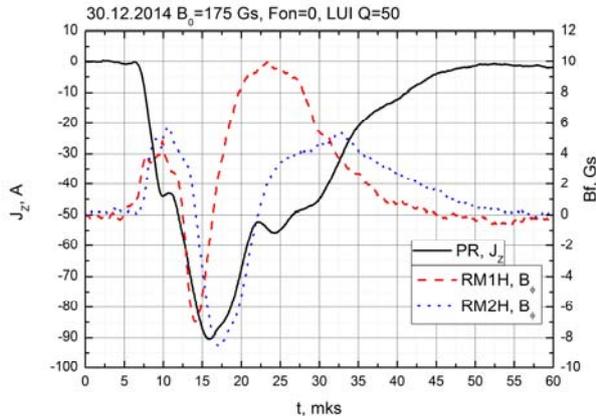


Рис. 3. Корреляция тока J_z и полей B_ϕ .

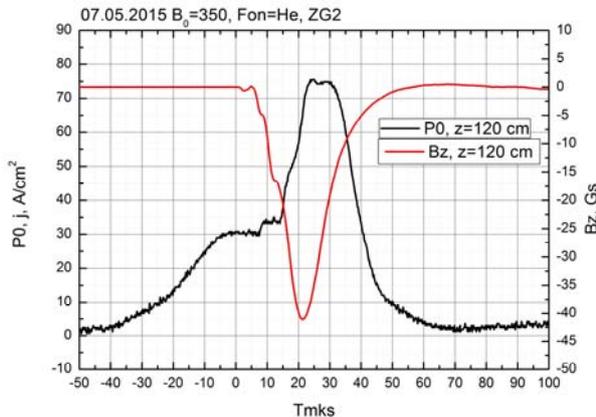


Рис. 4. Корреляция возмущения концентрации и вытеснения поля B_z .

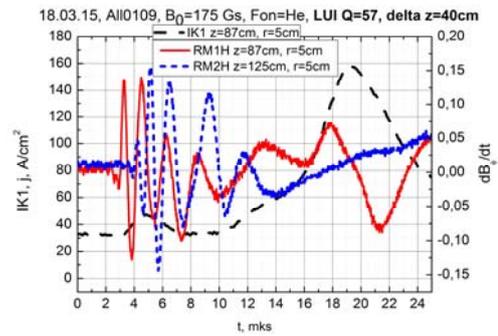


Рис. 5. Высоочастотные вистлерные колебания поля B_ϕ (при $3 \text{ мкс} < t < 10 \text{ мкс}$).

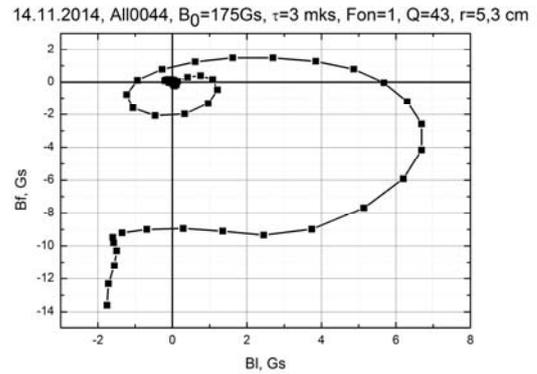


Рис. 6. Годограф поперечной компоненты магнитного поля.

что перед скачком концентрации фона (с признаками ММЗ) распространяется не только возмущение типа АВ, но и более быстрый вистлерный предвестник. Регистрация этих компонент, проведенная зондами B_ϕ , B_z и RM1H, RM1L (рис. 5), показывает, что поперечная компонента магнитного поля обладает характерной для вистлеров правосторонней круговой поляризацией. Направление поляризации меняется на противоположное с приходом АВ (рис. 6), характеризующейся большей амплитудой возмущения B_ϕ . С появлением вистлеров на зондах появляется незначительное возмущение концентрации плазмы независимое от фронта основного возмущения и обладающего более высокой скоростью.

Работа выполнена в рамках программы исследования СО РАН П.10.1.4 (01201374303).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Прист Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985. 589 с.
- 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.
- 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. P. 012108.
- Oraevsky 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.

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия