

Объединение волн, создаваемых оптическими пробоями в разреженной плазме с магнитным полем.

Лабораторное моделирование

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

В лабораторных экспериментах с использованием лазерной плазмы подтверждены критерии, при выполнении которых периодические сгустки плазмы формируют одновременно два типа квазистационарных волн: торсионную альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волны, распространяющиеся вдоль силовой трубки магнитного поля.

Ключевые слова: механизм объединения волн, лазерная плазма, магнитное поле, торсионная альфвеновская волна, медленная магнитозвуковая волна.

В настоящее время установлено, что механизм объединения волн (МОВ), создаваемых периодическими сгустками плазмы взрывного типа, например оптическими пробоями на твердой мишени, позволяет формировать низкочастотные волны. В газе возможны низкочастотный звук и ультразвук одновременно [1, 2]. В магнитном поле в вакууме цуг сгустков создает квазистационарные волны: торсионную альфвеновскую волну (АВ) и медленную магнитозвуковую волну (МВ), которые распространяются в силовой трубке магнитного поля, заполняемой плазмой источника [3]. Из расчетов следует, что МОВ действует и в разреженной плазме с магнитным полем (далее – фон), где источник создает АВ и МВ, причем длины занимаемых ими областей плазмы (протяженности АВ и МВ) линейно зависят от числа сгустков [4–6]. Волны распространяются вдоль силовой трубки, радиус которой определяется энергией одного сгустка, и переносят импульс (МВ) и момент импульса (вращение плазмы в АВ), в то время как, например, в работах [7, 8] волны переносили только энергию. Возможность лабораторного моделирования АВ, создаваемых вспышкой на Солнце, рассматривалась в работе [9]. В [10] изучалась АВ, создаваемая одним сгустком в плазме с магнитным полем. Поля и токи в лазерной плазме исследовались вблизи мишени [11].

В общем случае источник создает последовательность АВ и МВ на частоте следования сгустков. Квазистационарные АВ и МВ формируются при выполнении критериев, полученных с использованием расчетов [6]. Цель настоящей работы – экспериментальная проверка критериев объединения АВ и МВ в плазме с магнитным полем. Критерии позволяют в лабораторных условиях моделировать ионосферные АВ и МВ, а также определять параметры источника в зависимости от характеристик фона.

В.Н.Тищенко, А.Г.Березуцкий, Э.Л.Бояринцев, Ю.П.Захаров, А.В.Мелехов, И.Б.Мирошниченко, А.Г.Пономаренко, В.Г.Посух, И.Ф.Шайхисламов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: tvn25@ngs.ru

Поступила в редакцию 4 мая 2017 г., после доработки – 26 июня 2017 г.

Перечислим основные характеристики АВ и МВ [3–6]. МВ – это волна сжатия (увеличения концентрации n_0) плазмы фона, магнитное поле при этом «вытеснено» (уменьшено) на величину B_z , так что суммарное давление плазмы и магнитного поля в МВ равно давлению фона. К характеристикам АВ относятся продольный ток J_z , азимутальное магнитное (B_φ) и радиальное электрическое (E_r) поля, скорость вращения плазмы V_φ . Величины n_0 , B_z и J_z максимальны на оси волн, а B_φ и E_r – на расстоянии от оси $r \approx 0.15R_d$, где R_d – динамический радиус, характеризующий расширение сгустка в фоне. Ток J_z замыкается на периферии АВ ($r \approx 0.5R_d$). Области плазмы с АВ и МВ совмещены в пространстве, если скорость АВ (C_A) равна скорости МВ (C_M). При $C_A \gg C_M$ (условия в ионосфере) области АВ и МВ частично совмещены на стадии действия источника, далее АВ отделяется и движется впереди МВ.

Определим критерии объединения волн.

1. Единая АВ и единая МВ формируются, если безразмерные частоты следования сгустков близки к «резонансной» частоте $\omega_r \approx 0.25 - 0.5$:

$$f_A R_d / C_A \approx \omega_r, \quad f_M R_d / C_M \approx \omega_r. \quad (1)$$

Здесь f_A и f_M – частоты, соответствующие объединению отдельных АВ и МВ в квазистационарные АВ и МВ; $R_d = \{8\pi Q / [B_0^2(1 + \beta)]\}^{1/3} \approx 630 \{Q / [B_0^2(1 + \beta)]\}^{1/3}$ (R_d взято в см); Q (в Дж) – энергия сгустка; B_0 (в Гс) – внешнее магнитное поле; $\beta = 8\pi k_B(1 + Z_0)n_0 T_0 / B_0^2 = 4 \times 10^{-11}(1 + Z_0)n_0 T_0 / B_0^2$ – отношение давления плазмы к давлению магнитного поля в фоне; n_0 (в см⁻³), Z_0 и T_0 (в эВ) – концентрация, заряд ионов и температура плазмы фона соответственно. Скорости (в см/с) распространения АВ и МВ вдоль силовой трубки $C_A = B_0 / (4\pi n_0 m_0)^{1/2} = 2.18 \times 10^{11} B_0 / (n_0 m_0)^{1/2}$ и $C_M = C_A / \sqrt{1 + 2/(\gamma\beta)}$, где m_0 (в а. е. м.) – масса ионов фона, а $\gamma \approx 1.6$ – показатель адиабаты фона. В ионосфере $\beta < 1$ и $C_A \gg C_M$. Источник, действующий на частоте f , создает следующие волны. При $f \geq f_A \approx \omega_r C_A / R_d \approx 3.46 \times 10^8 \omega_r B_0^{5/3} \times (1 + \beta)^{1/3} / [Q^{1/3}(n_0 m_0)^{1/2}]$ (f взято в Гц) создается единая АВ и единая МВ. При $f \gg f_A$ протяженность АВ слабо зависит от числа сгустков (см. ниже). В области $f \leq f_M \approx \omega_r C_M / R_d \approx f_A / \sqrt{1 + 2/(\gamma\beta)}$ формируются отдельные пе-

риодические АВ и МВ, а в диапазоне $f_M < f < f_A$ – единая МВ и отдельные АВ.

2. Отношение $\alpha = r_L/l_{pi}$ ларморовского радиуса ионов источника r_L к ионно-плазменной длине фона l_{pi} удовлетворяет следующему неравенству:

$$\alpha \geq M_A m_2 Z_0 / (m_0 Z_2) > 5, \quad (2)$$

где $M_A = V_2/C_A \approx 0.5 - 2$ [5]; V_2 – начальная скорость разлета плазмы сгустка; m_2 и Z_2 – масса и заряд ионов сгустка соответственно. В области $\alpha < 5$ альфвеновская волна нестабильна и ее амплитуда (J_z и B_φ) мала. При $\alpha > 5$ амплитуда АВ увеличивается с ростом α .

3. АВ наиболее интенсивна, если нормированный на R_d ларморовский радиус ионов сгустков r_L близок к единице:

$$R_L = r_L/R_d = 1.59 \times 10^{-7} V_2 m_2 (1 + \beta)^{1/3} / [Z_2 (B_0 Q)^{1/3}] \approx 1. \quad (3)$$

В диапазоне $R_L \approx 0.5 - 2$ амплитуда АВ слабо зависит от R_L .

4. АВ формируется, если нормированная на R_d ионно-плазменная длина l_{pi} удовлетворяет условию

$$L_{pi} = l_{pi}/R_d = 3.66 \times 10^4 Z_0^{-1} \times \sqrt{m_0/n_0} \sqrt[3]{B_0^2(1 + \beta)/Q} \leq 0.25. \quad (4)$$

При увеличении L_{pi} амплитуда АВ уменьшается и возрастает роль вистлеров [9, 12].

С использованием приведенных выражений оценим преимущества цуга из N_p сгустков для создания волн большой протяженности по сравнению с одиночным сгустком с большой энергией. Протяженности волн и их длительности (время прохождения волн через точку наблюдения) при одновременном формировании АВ и МВ таковы:

$$\begin{aligned} L_A &\approx C_A N_p / f_A \approx N_p R_d / \omega_r, L_M \approx a C_M N_p / f_A \\ &= a N_p R_d / [\omega_r \sqrt{1 + 2/(\gamma\beta)}], t_A \approx L_A / C_A \approx N_p / f_A \\ &= N_p R_d / (\omega_r C_A), t_M \approx L_M / C_M = a N_p R_d / (\omega_r C_A). \end{aligned}$$

В выражениях для L_M и t_M множитель $a \approx 1$ на большом расстоянии от источника и ~ 1.5 при $z < 5R_d$, т. к. в ближней зоне фронт МВ движется со скоростью $\sim 1.5C_M$. Отношения L_A и L_M к протяженностям волн от одного сгустка с энергией, равной суммарной энергии цуга $Q_s = N_p Q$, составляют $\sim N_p^{2/3}$. Один сгусток создает волны с такой же протяженностью, как и N_p сгустков, если его энергия в $\sim N_p^2$ раз больше Q_s . Основные недостатки одиночного мощного сгустка с точки зрения создания АВ и МВ – это малая протяженность волн и их затухание на масштабах в сотни R_d , а также ограничение максимальной энергии сгустка условием (3) формирования интенсивной АВ в ионосфере.

На рис.1 приведена схема эксперимента на стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН. Космический фон моделировался в вакуумной ($\sim 2 \times 10^{-6}$ Тор) камере диаметром 1.2 м с длиной 5 м, где создавались аксиальное магнитное поле $B_0 \approx 175 - 350$ Гс и поток водородной плазмы (концентрация $n_0 \approx 10^{13}$ см $^{-3}$, скорость $\sim 3 \times 10^6$ см/с). Сгустки лазерной

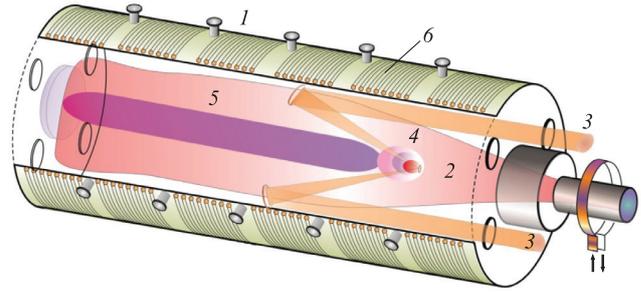


Рис.1. Схема моделирования АВ и МВ на стенде КИ-1:

1 – вакуумная камера; 2 – поток плазмы; 3 – излучение СО $_2$ -лазера; 4 – сгустки плазмы на облучаемой мишени; 5 – АВ и МВ; 6 – соленоид, создающий аксиальное магнитное поле.

плазмы образовывались в результате последовательного облучения полиэтиленовой мишени (диск с диаметром 2.5 см и толщиной 0.5 см) излучением двух СО $_2$ -лазеров. Энергии импульсов составляли 150–200 Дж, их длительности – около 1 мкс, плотности энергии на мишени – примерно 40 Дж/см 2 . Каждый из лазерных пучков предварительно делился на две части, которые одновременно создавали плазму. Варьирование времени задержки τ второго лазерного импульса ($\tau \approx 0 - 100$ мкс) позволяло определить диапазон частот ω_r , в котором сгустки формируют единую АВ и единую МВ.

Измерялись следующие параметры: для МВ – продольная компонента магнитного поля B_z , концентрация плазмы $n(t)$ и величина nV_z , где V_z – продольная скорость плазмы в волне; для АВ – азимутальная компонента магнитного поля B_φ , электрическое поле E_r и продольный ток J_z (с помощью пояса Роговского). Регистрировались пространственно-временная структура свечения плазмы с использованием электронно-оптического преобразователя, энергия и форма лазерных импульсов. Измерения проводились в нескольких сечениях камеры на расстояниях $\sim 1 - 2.5$ м от мишени. Температуры плазм фона ($T_0 \approx 10$ эВ) и МВ ($T_2 \approx 30$ эВ) определены из вольт-амперных характеристик датчиков. С использованием этих данных найдена энергия сгустка $Q \approx 25$ Дж.

В эксперименте характеристики фона и задержка импульсов τ выбирались с учетом условий (1) – (4) и возможностей стенда, определяющих энергию сгустков, начальную скорость их разлета, радиус камеры и т.д. Минимальная концентрация фоновой плазмы получена из (2) с использованием формулы для C_A :

$$n_0 \geq 4.75 \times 10^{22} m_0 [\alpha B_0 Z_2 / (V_2 Z_0 m_2)]^2. \quad (5)$$

Результаты расчета n_0 и других параметров эксперимента показаны на рис.2. Здесь приняты следующие значения: $\alpha = 5$, $m_0 = 1$ а.е.м., $Z_0 = 1$, $T_0 \approx 10$ эВ, $m_2 = 7$ а.е.м., $Z_2 = 2$, $V_2 = 2 \times 10^7$ см/с. Значения n_0 ограничены сверху условием $\beta < 1$. Ларморовский радиус определен из формулы (3), а ионно-плазменная длина $L_{pi} = 1.68 \times 10^{-7} V_2 m_2 (1 + \beta)^{1/3} \times [\alpha Z_2 (Q B_0)^{1/3}]^{-1} \approx 0.8/B_0^{1/3}$ – из формул (4) и (5). Отношение давления плазмы фона к давлению магнитного поля $\beta = 1.9 \times 10^{12} (1 + Z_0 T_0 m_0 \alpha^2 [Z_2 / (V_2 Z_0 m_2)]^2) \approx 0.2$. Из выражений (2) и (5) находятся скорости волн $C_A = V_2 Z_0 m_2 \times (a m_0 Z_2)^{-1} \approx 1.4 \times 10^7$ см/с и $C_M = C_A / [\sqrt{1 + 2/(\gamma\beta)}] \approx 5.2 \times 10^6$ см/с и максимальная задержка лазерных импульсов $\tau = 132 / (\omega_r B_0^{2/3})$, ограничивающая сверху диапазон значений τ , при которых формируется единая АВ. Рассчитанное значение $\tau(B_0)$ соответствует оптимальной частоте

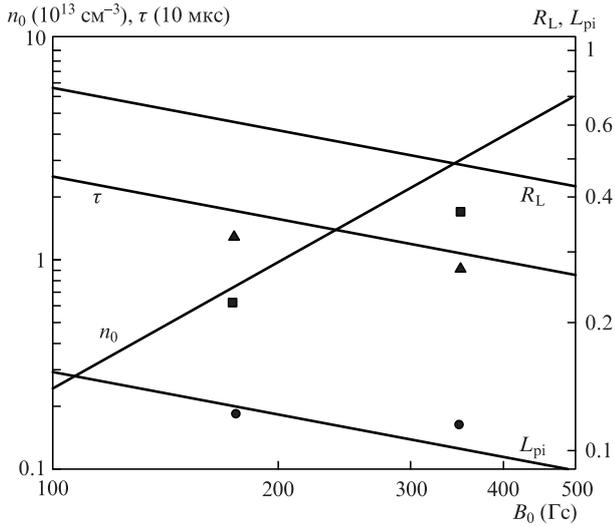


Рис.2. Зависимости от магнитного поля параметров эксперимента. Сплошные линии – расчет, точки – эксперимент.

$\omega_r \approx 0.25$. При этом формируется и единая МВ, т.к. для нее максимальная задержка в $\sqrt{1 + 2/(\gamma\beta)} \approx 2$ раза больше, чем для АВ.

В эксперименте создавалась фоновая плазма с концентрацией $n_0 \approx (0.5-3) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, близкой к расчетной. Максимальная энергия сгустков и минимальное поле $B_0 \approx 175 \text{ Гс}$ ограничены радиусом камеры, равным $\sim 60 \text{ см}$. Максимальная протяженность АВ ($L_A \approx 2 \text{ м}$) не превышает продольного размера камеры. Из рис.2 видно, что измеренные в эксперименте концентрация n_0 , а также ларморовский радиус и ионно-плазменная длина, нормированные на динамический радиус сгустка, близки к оптимальным значениям (2) – (5). Величина τ соответствует максимальной задержке второго лазерного импульса, при которой в эксперименте наблюдалось формирование единой АВ и единой МВ.

Объединение АВ и МВ, создаваемых сгустками плазмы при облучении мишени двумя лазерными импульсами, иллюстрирует рис.3. Время $t = 0$ соответствует приходу на приемник потока фоновой плазмы (рис.3,а, б) или волн (рис.3,в). Для МВ показаны концентрация плазмы n и изменение внешнего поля B_z в МВ, а для АВ – продольный ток J_z и азимутальное магнитное поле B_ϕ . Варьировалась задержка импульсов τ , что позволяло определить ее максимальное значение и, тем самым, минимальную частоту ω_r , при которой МОВ реализуется.

На рис.3,а приведена концентрация фоновой плазмы при $B_0 = 175 \text{ Гс}$ в отсутствие лазерной плазмы, а также концентрация плазмы при облучении мишени лазерными импульсами одновременно ($\tau = 0$) и с задержкой $\tau = 8.5 \text{ мкс}$. Два сгустка создают более протяженную волну, чем один сгусток с удвоенной энергией. Хорошее соответствие измеренных длительностей волн ~ 20 и 35 мкс (по полувысоте) расчетным значениям $\sim 17 \text{ мкс}$ (один сгусток) и 30 мкс (два сгустка) указывает на эффективность МОВ для создания протяженных волн. На рис.3,б проиллюстрирован случай, когда условие объединения частично выполнено для МВ ($f_M R_d / C_M \approx 0.37$, см. (1)), но не выполнено для АВ ($f_A R_d / C_A \approx 0.15$). В результате формируется квазиединая МВ (см. кривые для n и B_z) и отдельные АВ (кривые для B_ϕ). Амплитудная модуляция МВ уменьшается по мере распространения волны. АВ движется впереди МВ из-за различия их скоростей.

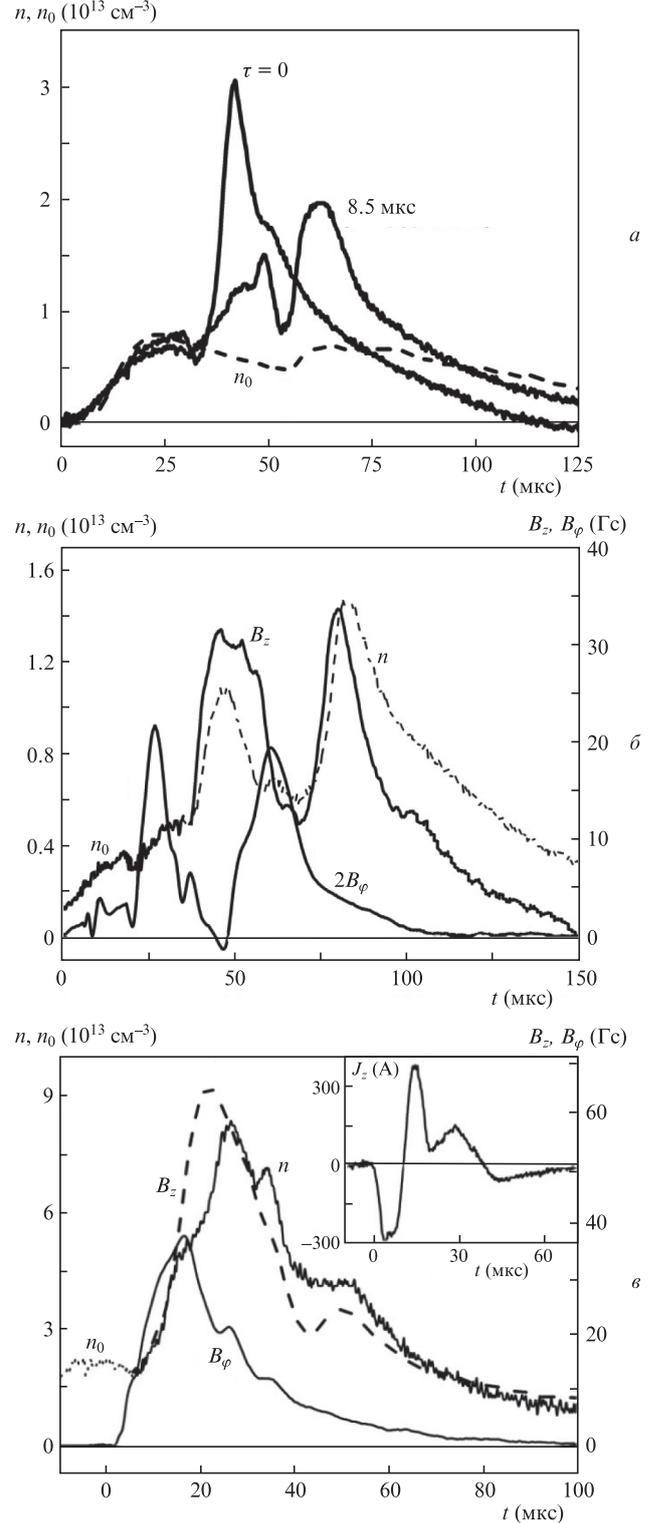


Рис.3. Временные зависимости концентрации плазмы n , концентрации фоновой плазмы n_0 и магнитного поля B_z в медленной МВ, а также азимутального магнитного поля B_ϕ и продольного тока J_z (на вставке) в торсионной АВ при $B_0 = 175$ (а, б) и 350 Гс (в). Концентрация плазмы в МВ определялась при $\tau = 0$ и 8.5 мкс на расстоянии $z = 120 \text{ см}$ от мишени (а), при $\tau = 20 \text{ мкс}$, $z = 190 \text{ см}$ (б) и при $\tau = 7.5 \text{ мкс}$, $z = 150 \text{ см}$ (в).

На рис.3,в представлен пример одновременного формирования единой АВ и единой МВ, создаваемых сгустками в магнитном поле $B_0 = 350 \text{ Гс}$. Концентрация фоновой плазмы $n_0 \approx 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, задержка между лазерными

импульсами $\tau = 7.5$ мкс соответствует частотам, удовлетворяющим проявлению МОВ для АВ и МВ одновременно. Другие параметры близки к оптимальным ($\alpha \approx 7$, $\beta = 0.27$, $L_{\text{pi}} = 0.12$, $R_L = 0.35$), в результате формируется интенсивная АВ – продольный ток $J_z \approx 300$ А, скорость вращения плазмы $V_\varphi \approx C_A B_\varphi / B_0 = 1.6 \times 10^6$ см/с и достигает $\sim 0.25 C_M$. Следовательно, МВ и АВ переносят не только импульс, но и большой момент импульса.

Таким образом, при выполнении условий объединения волн цуг сгустков формирует протяженные волны – медленную МВ и сильную торсионную АВ, протяженности которых линейно зависят от числа сгустков.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №31 «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности».

1. Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **34**, (10), 941 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, (10), 941 (2004)].
2. Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Смирнов А.Л., Трашкеев С.И., Стаценко П.А., Зимин М.И., Мякушина А.А., Запрягаев В.И., Гулидов А.И., Бойко В.М., Павлов А.А., Соболев А.В. *Квантовая электроника*, **36** (5), 470 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (5), 470 (2006)].
3. 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. *Письма в ЖЭТФ*, **104** (5), 302 (2016).
4. Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф. *Квантовая электроника*, **40** (5), 464 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (5), 464 (2010)].
5. Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф. *Квантовая электроника*, **44** (2), 98 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (2), 98 (2014)].
6. Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф., Березуцкий А.Г. В сб.: *Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: Альманах* (М.: Изд-во МГУ, 2014, с. 65–74).
7. Гушин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В., Одзерихо Д.А., Привер С.Э., Стриковский А.В. *Письма в ЖЭТФ*, **92** (2), 89 (2010).
8. Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Badin V.I., Deminov M.G. *Adv. Space Res.*, **29** (9), 1327 (2002).
9. Прокопов П.А., Захаров Ю.П., Тищенко В.Н., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Шайхисламов И.Ф. *Солнечно-земная физика*, **2** (1), 1 (2016).
10. Niemann C., Gekelman W., Constantin C.G., Everson E.T., Schaeffer D.B., Clark S.E., Winske D., Zylstra A.B., Pribyl P., Tripathi S.K.P., et al. *Phys. Plasmas*, **20**, 012108 (2013).
11. Аполлонов В.В., Бугров Н.В., Захаров Н.С., Сороченко В.Р. *Труды ЦФТИ МО РФ* (М., 2001).
12. Dudnikova G.I., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Vshivkov V.A., Zakharov Yu.P. *Proc. Conf. of Plasma Astrophysics* (Telavi, USSR, ESA, 1990, SP-311, p. 191).