

**Ю.П. Захаров** Институт Лазерной Физики (ИЛФ) СО РАН, Россия, г. Новосибирск  
e-mail: ki1z@mail.ru

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ОБЛАКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ МЕТОДОМ ЧАСТИЦ (ИОНОВ) ПО ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ

В данной статье представлены результаты расчетов методом частиц (ионов) по Гибридной Модели (Вшивкова и Дудниковой), для определения требуемых параметров планируемых модельных экспериментов на КИ-1 ИЛФ, по генерации квази-сферических Бесстолкновительных Ударных Волн (БУВ), впервые при инъекции сферических Облаков Лазерной Плазмы (ОЛП) в замагниченную Фоновую Плазму (ФП), на крупномасштабном высоко-вакуумном стенде КИ-1 (камера  $\varnothing 120$  см, длиной  $L = 5$  м), снабженном  $\text{CO}_2$ -Лазером (энергия до кДж, длина волны 10 мкм), импульсным источником Фона (с концентрацией до  $n_e \sim 10^{14}$  см $^{-3}$  и  $\varnothing$  до  $\sim 100$  см, при  $L_x$  до  $2 \div 3$  м в центре камеры). Предварительные результаты расчетов (из более, чем  $30 \div 40$  вариантов) показывают, что это возможно только при достижении энергии ОЛП до  $E_0 \approx 40 \div 50$  Дж (в сравнение с имеющейся  $E_0 \approx 25 \div 30$  Дж, при скорости разлета фронта  $V_0 = 100$  км/с, на пороге плазмообразования). При этом, будет возможно формирование квази-сферических БУВ, с различием в степени сжатия Фона в максимуме БУВ: как 1,7 (под углом  $\theta = 90^\circ$ , к магнитному полю  $B_0$ ) и близкое к нему 1,3 (при  $\theta = 45^\circ$ ), а также, заметное различие в числах Альфвена-Маха фронта БУВ: как  $M_{Af}$  до  $\approx 7$  (для  $90^\circ$ ) и  $M_{Af} \approx 2 \div 3$  (для  $45^\circ$ ). В запланированных модельных опытах с квази-сферическими БУВ, найденный режим их генерации, сможет обеспечить существенно более адекватные условия для исследования процессов бесстолкновительного взаимодействия ОЛП с Фоном, за счет вихревых электрических  $E_\phi$ -полей (генерируемых при вытеснении  $B_0$ -поля), по модели Магнитного Ламинарного Механизма (МЛМ).

**Ключевые слова:** лазерная и фоновая плазма, магнитное поле, бесстолкновительное взаимодействие, сферические Ударные Волны, моделирование космических волн, стенд КИ-1, импульсные  $\text{CO}_2$ -лазеры.

Yu.P. Zakharov

Institute of Laser Physics (ILP) SB RAS, Russia, Novosibirsk  
e-mail: ki1z@mail.ru

### Setting up experiments with laser plasma clouds to simulate the generation of quasi-spherical collisionless shock waves in cosmic plasma, based on calculations by the particle (ion) method using a hybrid model

The given paper is devoted to the calculations (by Hybrid model of Vshivkov and Dudnikova) for solving the problem of laboratory simulative experiment on the generation of quasi-spherical Collisionless Shock in magnetized Background Plasma (BP), by injection into BP a spherical Laser-Produced Cloud (LPC), at the large-scale KI-1 facility of ILP, with the  $\text{CO}_2$ -laser (1 kJ energy, at length 10  $\mu\text{m}$ ) vacuum chamber ( $\varnothing 120$  cm and length  $L = 5$  m), supplied by BP-source for producing background with the density up to  $n_e \sim 10^{14}$  cm $^{-3}$  in the region with  $\varnothing \sim 100$  cm and length  $L_x$  up to  $2 \div 3$  m in the middle of chamber. Preliminary data of simulation for the collisionless MLM-interaction between LPC and BP, show that such Shock could generate only if the LPC-energy  $E_0$  should be risen up from its today level (25 J) to the new need one –  $40 \div 50$  J. For this required level of  $E_0$ , the BP-density  $n_e$ -compressions in Shock are 1,7 (at angle  $90^\circ$  relative to magnetic field  $B_0$ ) and 1,3 (at angle  $45^\circ$ ), while the relevant front velocity (Alfven-Mach ones) of shocks for these directions would be more different, as  $M_{Af} \approx 7$  and  $M_{Af} \approx 2 \div 3$ . Therefore, in such conditions we could study more in details, the role of curl electric  $E_\phi$ -field (generated

due to magnetic field  $B_0$  exclusion) for the Magnetic Laminar Model (MLM) of the collisionless interaction between LPC and BP.

**Key words:** Laser-produced and background plasmas, magnetic field, collisionless interaction, spherical shocks, simulation of plasma waves in space, KI-1 facility, pulsed  $\text{CO}_2$ -lasers.

Ю.П. Захаров

Ғылым академиясының лазерлік физика институты (Илф), Ресей, Новосибирск қ.  
e-mail: ki1z@mail.ru

**Гибридті модель бойынша бөлшектер (иондар) әдісімен есептеулер негізінде ғарыштық плазмадағы квази-сфералық соқтығыспайтын соққы толқындарын генерациялау процестерін модельдеу үшін лазерлік плазма бұлттарымен эксперименттер жасау**

Бұл мақалада магниттелген фондық плазмаға лазерлік плазманың (ALP) сфералық бұлттарын иньекциялау кезінде алғаш рет квази-сфералық соқтығыспайтын соққы толқындарын (BUV) генерациялау бойынша КИ-1 ИЛФ-те жоспарланған модельдік эксперименттердің қажетті параметрлерін анықтау үшін гибридті модель (Бичов және Анудникова) бойынша бөлшектер (иондар) әдісімен есептеу нәтижелері келтірілген (КИ-1 ірі-масштабты жоғары вакуумды стендіде ( $\varnothing 120$  см, ұзындығы  $L = 5$  м),  $\text{CO}_2$ -лазермен (қДж-ға дейінгі энергия, 10 мкм толқын ұзындығы), импульстік Фон көзімен ( $N^* \sim 10^{14}$  см $^{-3}$ -ке дейінгі концентрациямен және  $\sim 100$  см,  $l^*$  кезінде камераның ортасында  $2 \div 3$  м дейін). Есептеулердің алдын-ала нәтижелері (30-дан астам) СТН 40 варианттар) бұл ALP энергиясы  $E_0 \approx 40$  дейін жеткенде ғана мүмкін болатындығын көрсетеді 50 Дж (қолда бар  $E_0 \approx 25$  СТН 30 Дж, фронттың ұшу жылдамдығымен  $v_0 = 100$  км/с, плазманың пайда болу шегінде). Бұл жағдайда квази-сфералық БУВ қалыптастыру мүмкін болады, бұл максимумындағы фонның қысылу дәрежесінің айырмашылығы: 1,7 ретінде (бұрышта) масса=900, магнит өрісіне қарай  $B_0$ ) және оған жақын 1,3 (кезінде масса=450), сондай-ақ БУВ майданының Альфвен-Мах сандарындағы елеулі айырмашылық: МАФ-тен  $\approx 7$ -ге дейін (900 үшін) және МАФ  $\approx 2$ -ге дейін 3 (450 үшін). Квази-сфералық БУВ-мен жоспарланған модельдік тәжірибелерде оларды генерациялаудың табылған режимі магниттік ламинарлық механизм моделі (МЛМ) бойынша құйынды электр өнімділік өрістерінің ( $B_0$ -өрістіесыстыру кезінде пайда болатын) есебінен Альпі-нің фонмен соқтығыспайтын өзара іс-қимыл процестерін зерттеу үшін едәуір барабар жағдайларды қамтамасыз ете алады).

**Түйін сөздер:** лазерлік және фондық плазма, магнит өрісі, соқтығыспайтын өзара әрекеттесу, сфералық соққы толқындары, ғарыштық толқындарды модельдеу, КИ -1 стенді, импульстік  $\text{CO}_2$  лазерлері.

## Введение

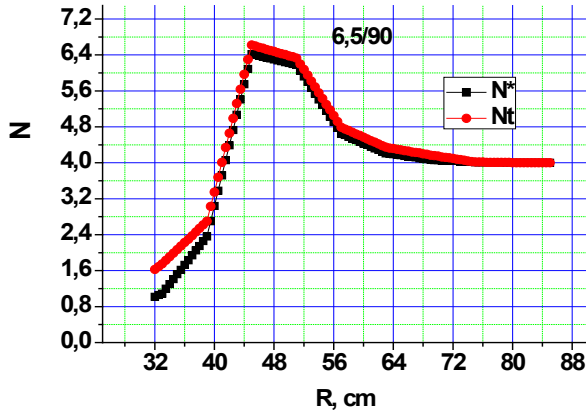
На лазерном модельном стенде КИ-1 (Космические Исследования – 1), с 80<sup>x</sup> годов успешно реализуется [1-2] программа экспериментов с квази-сферическими Облаками Лазерной Плазмы (ОЛП), по моделированию процессов бесстолкновительного взаимодействия (на масштабе  $R_* \ll L_{\text{coll}}$ ) между потоками космической плазмы в магнитном поле  $B_0$ . В первую очередь, для проверки модели [3] Магнитного Ламинарного Механизма (МЛМ) взаимодействия, разработанной во ВНИИЭФ (Саров). На основе этих опытов, в дальнейшем впервые были реализованы условия (эффективная энергия ОЛП [4] до  $E_c \sim 1$  кДж) и впервые проведены эксперименты [4-7] по формированию Бесстолкновительных Ударных Волн (БУВ) на масштабе  $R \sim 1$  м. В настоящее время на КИ-1, за счет применения симметричной (4 луча [8] с вершин тетраэдра) схемы облучения шарика-

мишени  $\varnothing \sim 1$  см ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), была достигнута генерация близких к сферическим ОЛП, с кинетической энергией плазмы  $E_0 \approx 25$  Дж, при скорости фронта  $V_0 \approx 100$  км/с. В результате, появилась уникальная возможность по формированию и исследованию квази-сферических БУВ, характерных для взрывов Сверхновых [2].

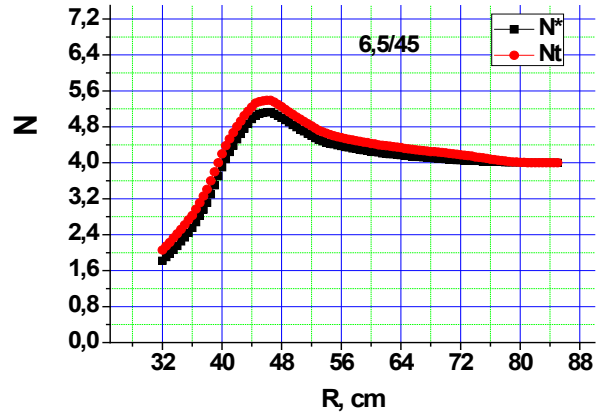
Модельные расчеты по Гибридной Модели. Для анализа возможной постановки таких экспериментов, была проведена серия расчетов по гибриднему 2D-коду Вшивкова-Дудниковой [9-11], который был проверен, путем сравнения с расчетами ВНИИЭФ [3], при близких значениях критериев подобия задачи: число Альфвена-Маха ( $Ma \approx 10$ , по  $V_0$ ) и т.н. МЛМ-параметр ( $\delta = R_*^2/R_L R_{L*} \approx 2 \div 3$ ). Здесь  $R_* = (3N_e/4\pi n_e)^{1/3}$  – радиус диамагнитной каверны облака в фоне, а  $n_e$ -ого концентрация,  $N_e$  – полное число электронов в облаке, а  $R_L$  и  $R_{L*}$  – Ларморовские радиусы ионов облака и фона (по скорости  $V_0$ ). Проведенные расчеты по БУВ-эффектам сжатия поля

(и фона- $n_s$ ), по этому коду [9-11], показали (по данным вдоль  $90^\circ$  и  $45^\circ$ ), относительно  $V_0$ , (Рисунок 1а,б), что при энергии ОЛП в  $40 \div 50$  Дж (при  $Ma \approx 6 \div 7$  и  $\delta \approx 0,3 \div 0,9$ ), возможна реализация режимов МЛМ-взаимодействия, с формированием близкой к сферической БУВ. При этом, учитываемые в расчетах ионы углерода ( $C^{+3}$  и  $C^{+4}$ , пере-

носящие основную часть энергии ОЛП), слабо тормозятся на масштабе каверны  $R_*$  и, распространяясь впереди возмущения фона, могут заметно исказить профиль самой БУВ (Рис. 1б), что может существенно усложнить анализ зондовых данных в ходе планируемых на КИ-1 новых экспериментов по БУВ.



а



б

Рисунок 1 – Плотность фона  $N^*$ , в ед.  $10^{13} \text{см}^{-3}$ :

а – Профили  $N^*$  БУВ в Фоне с числом  $Ma^* \approx$  до 7 в  $2^x$ -направлениях (здесь  $\theta = 90^\circ$  в момент  $t=6,5 \text{мкс}$  ( $N_t$  – полная концентрация, б – Данные расчетов по модели [9])

Профиль полной концентрации  $N_t$  (верхняя кривая – красные кружки, Фон+ОЛП), в тот же момент ( $\theta = 45^\circ$ ).

Особенности процессов энерго-обмена Облака Плазмы с Фоном при их взаимодействии за счет МЛМ.

Исходя из классической работы по МЛМ [3], для конечной энергии  $W_{*\infty}$ , набранной Фоном на масштабе каверны  $R_*$ , в виде:

$$W_{*\infty}/W_0 = 0,5(R_*^2/R_L R_L^*) * I \quad (1)$$

(с интегралом  $I=0,7$ ) и общего определения начальной энергии Облака, как:

$$W_0 = 0,3(M/Z) * N_c m_p V_0^2 \quad (2)$$

( $m_p$  – масса протона и  $M/Z$  – масса и заряд ионов Облака), энергию Фона  $W_{*\infty}$  (1) можно переписать, как:

$$W_{*\infty} = 0,35 * \{[(R_*^2/R_L R_L^*)] * W_0\} \equiv = 0,35 \{[(R_*^2/R_L R_L^*)] * [0,3(M/Z) * N_c m_p V_0^2]\} \quad (3)$$

Здесь  $R_L$  и  $R_L^*$  – «направленные» (по скорости  $V_0$ ) радиусы Лармора ионов Облака и Фона, равные  $R_L = V_0(MC/ZeB_0)$  и  $R_L^* = V_0(M_*C/Z_*eB_0)$ , в магнитном поле  $B_0$ . Тогда, после сокращения в (3) одинаковых членов (по  $V_0$  и  $M/Z$ , в числителе и знаменателе) оказывается, что энергия набранная Фоном за счет МЛМ, может не зависеть ни от скорости  $V_0$  Облака, ни от  $M/Z$  его ионов. Разумеется, что эти выводы необходимо будет проверить в дальнейших численных расчетах по Гибридной Модели.

Наконец, согласно (3), из-за перемножения членов  $R_*^2$  ( $\propto N_c^{2/3}$ ) и  $N_c$  (оба в числителе), оказывается, что очень важная для генерации БУВ полная энергия Фона (за счет МЛМ), имеет весьма сильную зависимость (Рисунок 3) от полного числа электронов  $N_c$  в Облаке, близкую к квадратичной. Также, согласно [3], сам МЛМ-параметр  $\delta = R_*^2/R_L R_L^*$  сильно влияет на угловую зависимость интенсивности МЛМ-взаимодействия, т.е. возможную степень сферичности БУВ.

## Заключение

Таким образом, результаты проведенных расчетов по Гибридной Модели [9-12] показывают, что при увеличении энергии сферического ОЛП до  $E_0 \approx 40 \div 50$  Дж, возможна

генерация квази-сферической БУВ в фоне, за счет  $E_\phi$ -полей МЛМ- взаимодействия на масштабе  $2R_* \approx 40$  см.

*Данная работа выполнена в рамках Проекта ГосЗадания ИЛФ СО РАН (на 2021-2025г.) №НИОКТР 121033100062-5*

## Литература

1. Антонов В.М., Башурин В.П., Захаров Ю.П. и др. Экспериментальное исследование бесстолкновительного взаимодействия сверхальфвеновских взаимопроникающих потоков плазмы // Журнал Прикладной Механики и Технической Физики.-1985.-№6.-С.3-10.
2. Zakharov Yu.P., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Snytnikov V.N. Laboratory simulation of collisionless coupling between Supernova Remnants and Magnetized Interstellar Medium. Proc. Joint Varenna-Abastumani Int. School & Workshop on Plasma Astrophysics (Sukhumi, USSR, ESA SP-251, 1986) p.37-40.
3. 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.
4. Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., et al. Large-Scale laboratory simulation of Space Collisionless Shock. In Proc. 6th Int. Symp. «Modern Problem of Laser Physics» (Novosibirsk, ILP, 2013, p.193-194).
5. 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., 1, №3, p. 163-165 (2014).
6. Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Антонов В.М., Мелехов А. В., Посух В.Г., и др. Генерация сгустков лазерной плазмы с высокой эффективностью концентрации энергии для лабораторного моделирования Бесстолкновительных Ударных Волн в замагниченной космической плазме. // Квантовая Электроника, Т. 46, №5, с. 399-405 (2016).
7. Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Vshivkov K.V., Melekhov A.V., Posukh V.G., Prokopov P.A., Terekhin V.A., Golubev A.I. Generation of Quasi-Perpendicular Collisionless Shocks by Laser-Produced Plasma to simulate the Effects of Super-Compression of the Earths Magnetosphere//J. Phys. Conf. Ser.,2017, #012078, 5 p.
8. Захаров Ю.П., Терехин В.А., Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г., Трушин П.А., Чибранов А.А., и др. Создание сферических облаков лазерной плазмы для моделирования трехмерных эффектов динамики искусственных плазменных выбросов в околоземном космическом пространстве, Квантовая Электроника, Т. 52, № 2, с. 155-159 (2022).
9. Вшивков В.А., Дудникова Г.И., Захаров Ю.П., Оришич А.М. Генерация плазменных возмущений при бесстолкновительном взаимодействии сверхальфвеновских потоков. Препринт № 20-87 ИТПМ СО АН СССР. Новосибирск. 1986. 47 с.
10. Dudnikova G.I., Zakharov Yu.P., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Vshivkov V.A. Laboratory and computer simulations of wave generation processes in non-stationary astrophysical phenomena. Proc. Joint Varenna-Abastumani Int. School & Workshop on Plasma Astrophysics (Telavi, USSR, ESA SP-311, 1990) p.191-194.
11. Vshivkov V.A., Dudnikova G.I. Kinetic-hydrodynamic models of the dynamics of interpenetrating plasma flows // Modeling in Mechanics. 1990. Vol.4 (21), N1. p. 93.
12. Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Терехин В.А., Шайхисламов И.Ф., Дудникова Г.И., Вшивков В.А., и др. Лабораторное и численное моделирование Лазерной Плазмой взрывной генерации Бесстолкновительных Ударных Волн (БУВ) в замагниченном Фонe на основе модели Магнитного Ламинарного Механизма (МЛМ). Тезисы Конф. «Физика Плазмы в Солнечной Системе» (ИКИ, М., 2019 г.), с. 281.
13. Захаров Ю.П., Терехин В.А., Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г. Постановка экспериментов с облаками лазерной плазмы для моделирования процессов генерации квази-сферических бесстолкновительных ударных волн в космической плазме. Там же (2023) с.415.
14. Захаров Ю.П. и др. Роль желобковой неустойчивости холловского типа при взаимодействии при взаимодействии лазерной и космической плазмы с магнитным полем. Физика Плазмы (2006), Т. 32, №3, с. 207.

Приложение

Обозначение, величина	Ед. Измер. Комментарии
<b>0.0005</b> <b>tau</b>	Врем. Шаг, мкс
<b>15</b> <b>nb</b>	Вар. Расч. и
<b>25</b> <b>im</b>	Пар-ры сетки,
<b>75</b> <b>km</b>	Число частиц Обл.
<b>120000</b> <b>jm</b>	Магн.Поле/100Гс
<b>0.5</b> <b>h0</b>	Конц.Фона/10 <sup>13</sup> см <sup>-3</sup>
<b>4.0</b> <b>n0</b>	Те Фона, эВ
<b>10.0000</b> <b>te0</b>	*
<b>0.0000</b> <b>tff</b>	*
<b>1.0000</b> <b>a3</b>	* Геометр. Расч.
<b>20.832</b> <b>rm</b>	* Сетки и Прочее
<b>31.25</b> <b>zm</b>	*
<b>15.0417</b> <b>z2</b>	Нач. Радиус, см
<b>17.0417</b> <b>z3</b>	Числ.электр.Обл., 10 <sup>18</sup>
<b>0.0097</b> <b>r0</b>	СкоростьФр. ×69км/с
<b>1.500</b> <b>a</b>	Доля Ионов С+3 и С+4 в Обл. (все с Н <sup>+</sup> =1)
<b>1.45</b> <b>vm</b>	Аном. Коэфф. – g Переноса (~ 0,1)
<b>0.25</b> <b>c</b>	
<b>0.25</b> <b>cc</b>	
<b>10.4167</b> <b>z1</b>	
<b>0.0000</b> <b>gk</b>	Заряд и Масса Ионов
<b>0.0000</b> <b>gx</b>	С+3 в Облаке
<b>3.0000</b> <b>c8</b>	Заряд и Масса
<b>12.0000</b> <b>cmas</b>	С+4
<b>4.0000</b> <b>c81</b>	Заряд и Масса
<b>12.0000</b> <b>cmas1</b>	Ионов Фона (Н <sup>+</sup> )
<b>1.0000</b> <b>cf</b>	Расч. Шаг, см
<b>1.0000</b> <b>cmasf</b>	Пар-р фронта Облака
<b>0.500</b> <b>dx</b>	
<b>0.2700</b> <b>alpha</b>	
<i>Alpha определяет фронт ОЛП [14]</i>	

Рисунок 1 - Параметры расчета

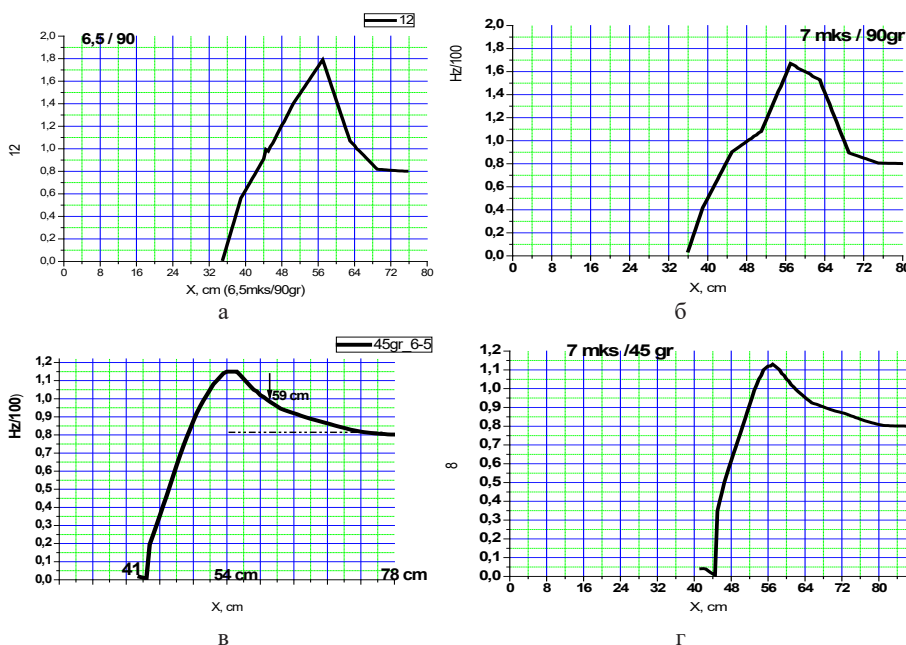
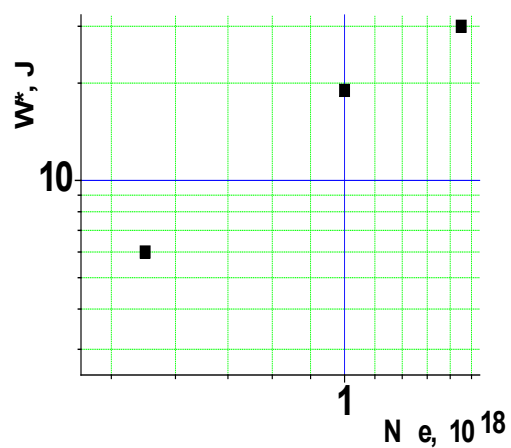


Рисунок 2 – Сводные данные по генерации сильных возмущений (поля  $H_z$  и  $B_0$ ) сферическим облаком в предельном режиме: по: а) созданию на мишени  $\varnothing \sim 12$  мм, облака с энергией  $W_0$  до 40 Дж (сравнимой с первыми опытами [1] на КИ-1 и б)  $H^+$ -фону с  $n_e = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При  $\langle M/Z \rangle \approx 2,5$  а.е.м. и скорости фронта облака  $V_0 = 100 \text{ км/с}$ , параметр МЛМ  $\delta = 1,7$  при числе Альфвена-Маха  $M_A = 4$ , так что в расчетах – возмущения типа БУВ (со скоростью фронта до  $\sim 100 \text{ км/с}$ ) генерируются даже под углом  $45^\circ$  к полю  $B_0$  (в, г), однако, на расстояниях  $R \sim 50 \text{ см}$ , сравнимых с радиусом Фоновой Плазмы (до 40 см поперек поля, в экспериментах [1, 4, 5, 7] на КИ-1).



**Рисунок 3** – Энергия Фона - $W_*$  (набранная за счет МЛМ) в зависимости от полного числа электронов в Облаке - $N_e$ . Здесь это число расположено около его значения  $1 \cdot 10^{18}$  (на данном графике в двойном логарифмическом масштабе), а энергия  $W_*$  – у ее значения 10 Дж (по ординате- $Y$ ). Расположение точек примерно соответствует ожидаемой зависимости (3) по МЛМ-модели, как  $W_* \propto N_e^{5/3}$ .