



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

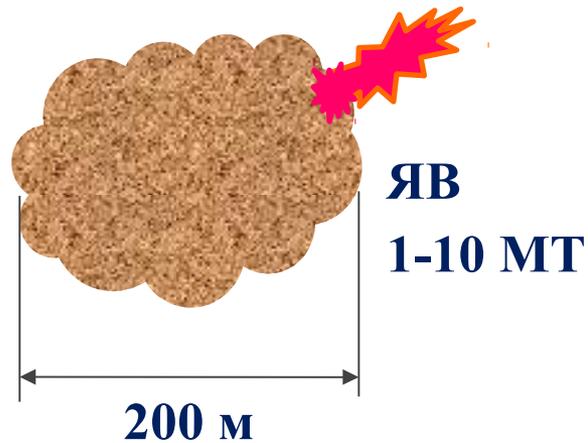
Р Ф Я Ц  
ВНИИЭФ

# Исследование на лазерной установке «Луч» критериев разрушения астероидоподобных тел разной формы, состава, микроструктуры и прочности при воздействии на них мощного импульсного излучения

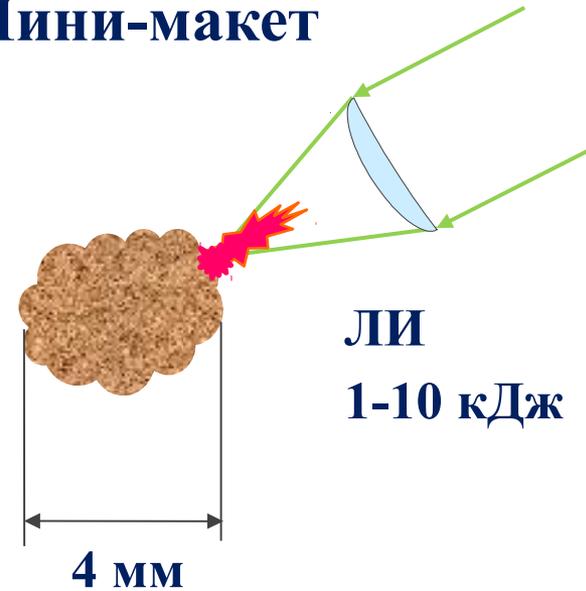
XIII Забабахинские научные чтения, Снежинск, 2017г.

*А.Ю. Аристова, В.А. Денисова,  
В.С. Дрожжин, А.А. Краюхин, В.В. Мисько,  
В.Г. Рогачёв, П.В. Стародубцев,  
С.Н. Стёпушкин, Ю.В. Скорочкин*

## Астероид



## Мини-макет



Крупные каменные астероиды (80-90% от общего числа) хрупки и имеют низкий порог разрушения – 0.05-0.1 кбар, что позволяет рассчитывать на эффективное дробление астероидов ЯВ.

Представляется естественным моделировать воздействие ядерного взрыва на астероид воздействием короткого импульса лазерного излучения на миниатюрный макет астероида.

# Картина протекающих процессов.

## Принцип подобия.



### Развитие процесса точечного удара

- Точечное короткое выделение энергии, перераспределение энергии между основной частью астероида (мишени) и отделяющейся фракции;
- формирование тепловой волны, потеря части энергии за счёт излучения;
- формирование сильной ударной волны;
- уменьшение амплитуды ударной волны, переход к звуковым волнам, их интерференции и формированию зон разрывающего и сдвигового напряжения;
- затухание звуковых волн, окончание процесса разрушения;
- разлёт осколков.

### Подобие мишеней и воздействия

#### Астероид и модель:

Одинаковый химический состав, плотность ( $\rho$ ), прочность ( $\sigma$ ), скорость звука в веществе ( $c$ ).

#### Структурное подобие:

Астероид (диаметр  $D=200$  м; осколки  $d=5$  м) ~ макет ( $D=4$  мм;  $d=100$  мкм)

#### Воздействие:

- точечное;
- мгновенное.

Следствием является равенство давлений  $P_{aster} = P_{las}$ , откуда по принципу подобия:

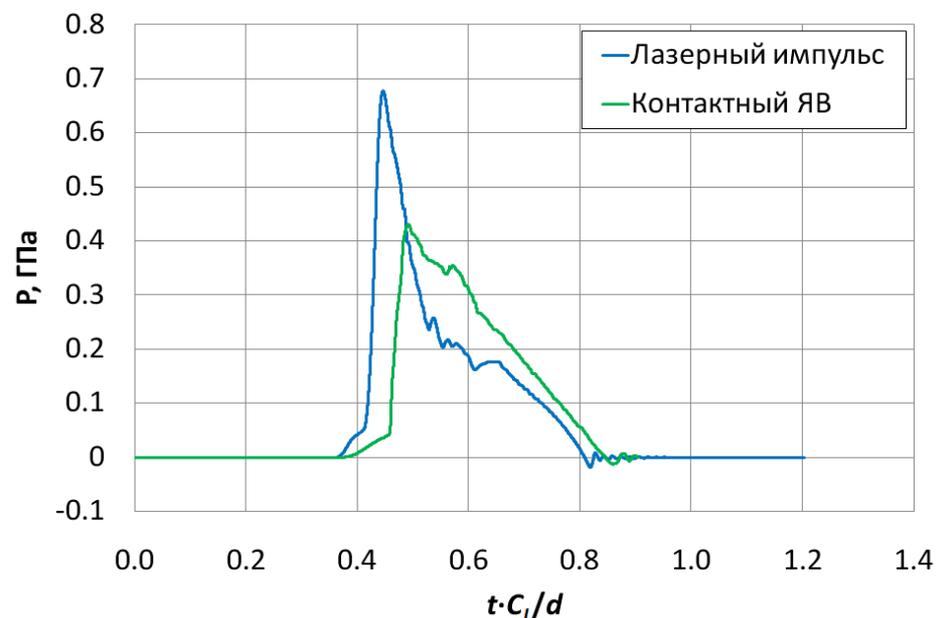
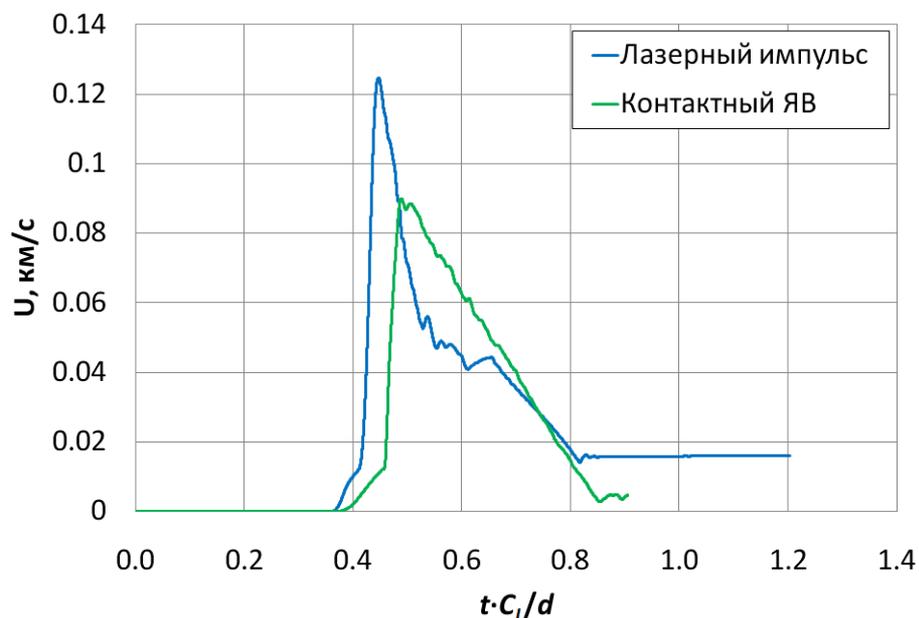
$E_{las}/M_{las} = k * E_{aster}/M_{aster}$ , где  $k$  – поправочный коэффициент, учитывающий разницу в процессах поглощения энергии.

- **Проведение сопоставительных расчетов воздействия ЯВ на астероид и воздействия импульса ЛИ на макет, получение критерия моделирования.**
- **Разработка технологии изготовления макетов микро-астероидов и измерение их параметров.**
- **Проведение экспериментов с целью определения зависимости параметров разрушения астероидов от свойств материала, формы модели и условий выделения энергии.**

# Подобие газодинамических процессов в натуральных и модельных условиях



## Зависимости массовой скорости и давления от приведенного времени в центре эллипсоида



Проведены следующие сравнительные расчёты:

- лазерное излучение с энергией  $q = 600$  Дж фокусируется на сужающейся части эллипсоидного имитатора астероида  $3 \times 6$  мм;
- контактный ЯВ с энергией  $q = 7.45$  Мт происходит на сужающейся части хондритного астероида с размерами  $150 \times 300$  м.

# Хондритные мишени

Параметры	Натур.	Макеты
Химический состав, %	SiO <sub>2</sub> – 40, MgO – 26, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 18, FeS - 6	
Форма	Шар, эллипс, с каверной	
d, мкм	~1000	1-125
	3,2-4,0	2,0-2,6
c, м/с	3000-7000	3150
☐ на сжатие	90-500	65-1350
☐ на	10-60	≈9,5 кгс/см <sup>2</sup>

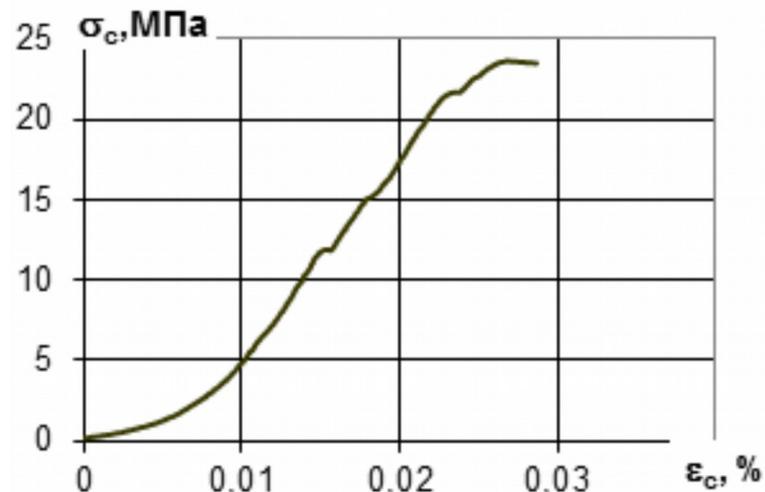
Натуральный



Искусственный



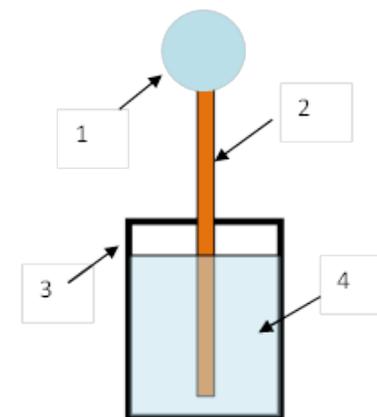
Диаграмма сжатия образца с дисперсностью SiO<sub>2</sub> d<125 мкм



## Состав железного образца

Участок анализа	Массовое содержание, %						
	C	Si	S	V	Cr	Mn	Fe
1(средний)	~2	0,8	0,2	0,3	0,4	0,5	95,8
2(матрица)	~5			0,6	0,6		90,6
3(матрица)		1,8					98,2
4(включение)		0,4	28,1			42,2	29,3

## Схема установки ледяных мишеней



1 – мишень (диаметр 1 см), 2 - медный стержень,  
3 - сосуд из фторопласта, 4 - вода.

Макет железного астероида  $d \approx 3$  мм



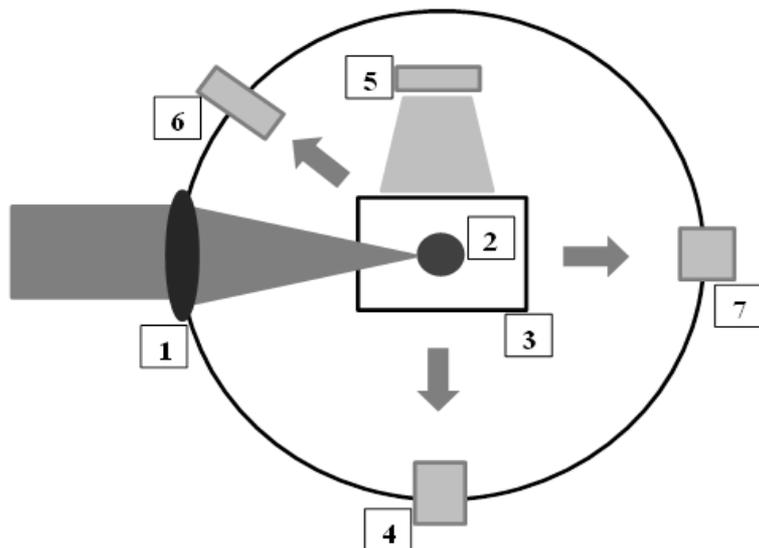
Макет ледяного астероида  $d \approx 12$  мм



# Постановка лазерного эксперимента



## Принципиальная схема эксперимента



- 1) объектив;
- 2) микро модель;
- 3) улавливатель осколков;
- 4) электро-оптический преобразователь;
- 5) лампа-вспышка;
- 6) камера обскура;
- 7) коллиматор PDV.

## Значения параметров ЛИ

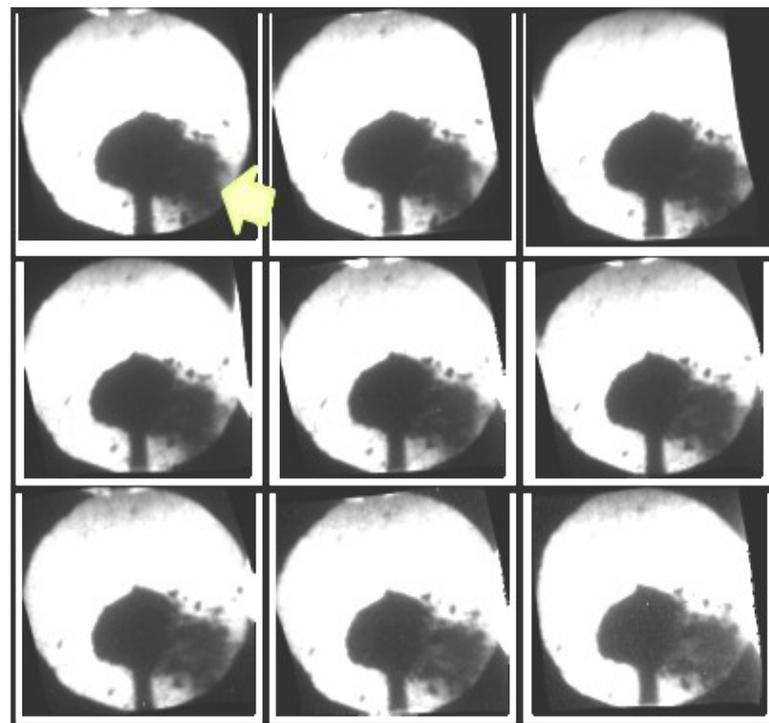
Параметр	Значение
на выходе усилительного канала в основной частоте, $E_{1\omega}$	<1200 Дж
преобразованное излучение, $E_{2\omega}$	<600 Дж
на мишени, $E_{M2\omega}$	<500 Дж
длительность импульса на $\lambda=0,527$ мкм, $\tau_{0,5}$	1,4-2,2 нс
по энергии, $K_E$	$>10^5$
по мощности, $K_P$	$>10^5$
пятно облучения, $\varnothing$	>100-120 мкм
средняя интенсивность в пятне, $I$	$<1,6 \cdot 10^{15}$ Вт/см <sup>2</sup>

Измеряемый параметр	Диагностика	Метод измерения
Параметры лазерного излучения	Стандартные диагностики	Ближняя и дальняя зоны, контраст, форма импульса, энергия, эквивалентная плоскость
Пятно облучения, размер, структура	Рентгеновская камера-обскура	Измерение свечения вторичного излучения из пятна облучения
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Динамика разлета продуктов разрушения мишени;</li> <li>- Диаграмма направленности разлета осколков;</li> <li>- Массово-габаритные характеристики осколков</li> <li>- Распределение осколков по скоростям и размерам</li> </ul>	Теневая регистрация с использованием 9-и кадровой «лупы времени» на базе ЭОП	Боковая подсветка мишени синхронизированным импульсным источником
	Измерение скорости движения осколков методикой PDV	Тыльная лазерная подсветка мишени с регистрацией распределения скоростей движения осколков
	Отбор проб, Теневая регистрация	Взвешивание мишени и ее осколков. Построение гистограммы распределения осколков по размерам

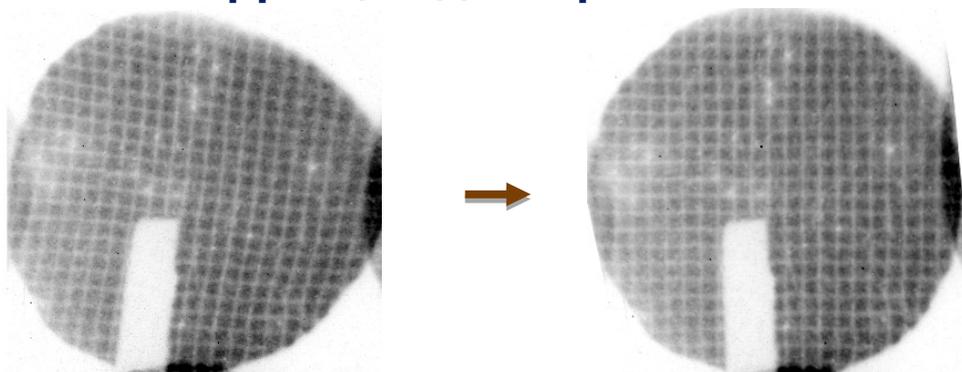
## Параметры «лупы времени»

Параметр	Значения
Диапазон измерений, мс	0,1-1
Время экспозиции 1 кадра, мкс	1-10
Время между кадрами, мкс	10-100
Динамический диапазон, мкс	$10^4$
Количество кадров, шт	9

## Разлёт мишени



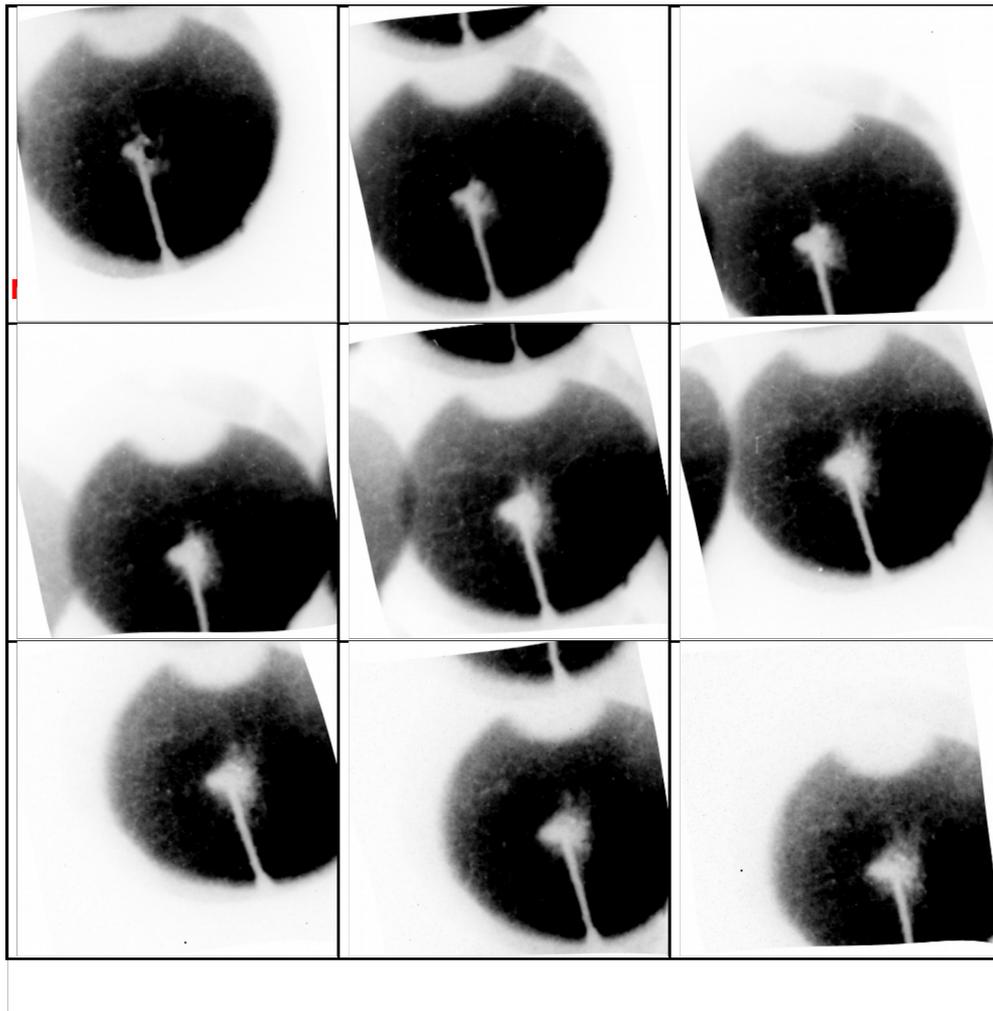
## Коррекция дисторсии ЭОП



# Динамика разлёта эллипсоидной мишени в эксперименте от 22.01.2016



Кадры ЭОП 80-80-1



Мишень до опыта



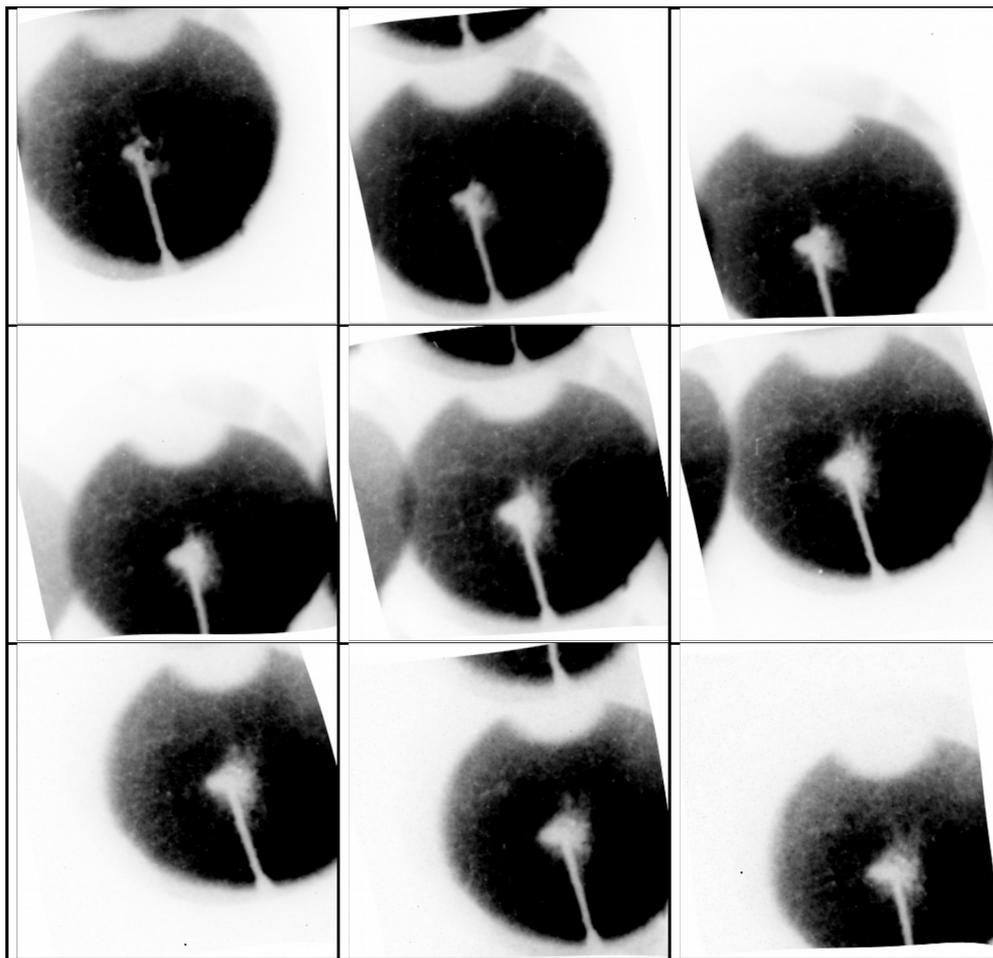
Осколки мишени после  
опыта ( $E/M \approx 1300$  Дж/г)



# Динамика разлёта эллипсоидной мишени в эксперименте от 22.01.2016



Кадры ЭОП 80-80-1



Мишень до опыта



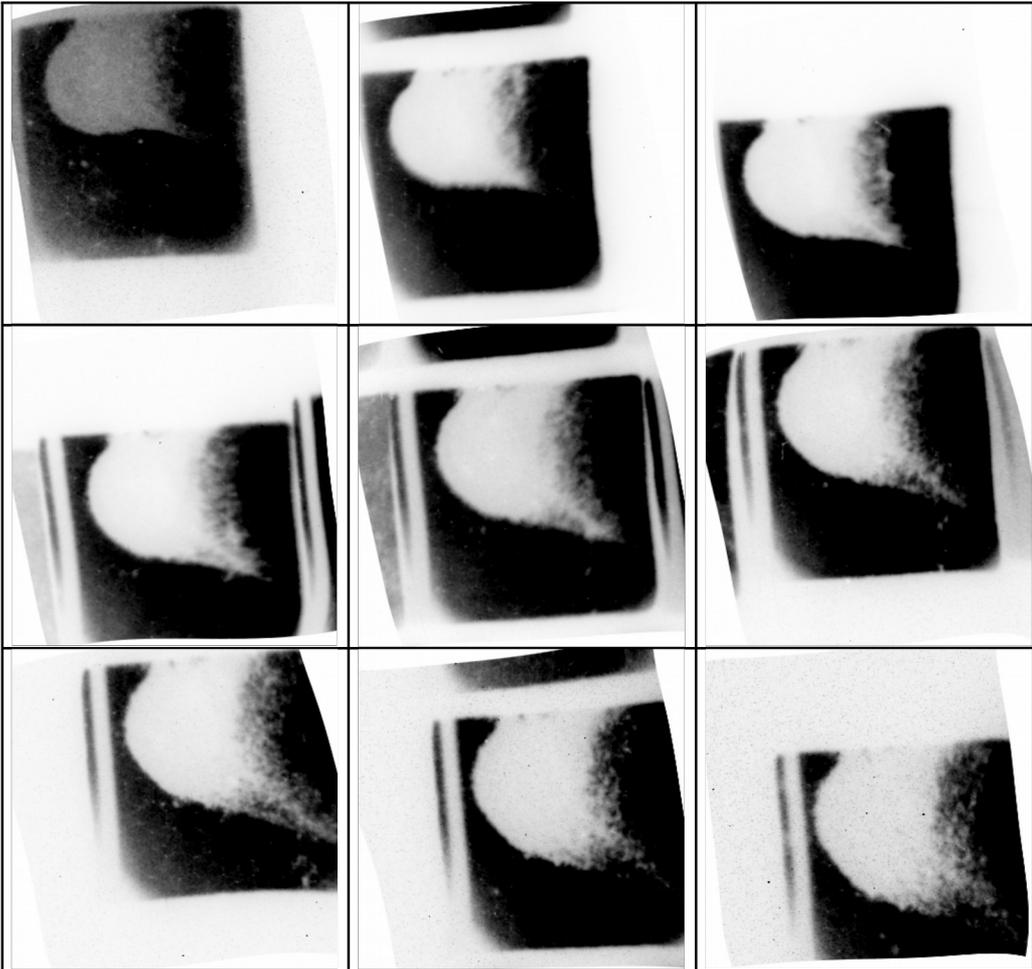
Осколки мишени после  
опыта ( $E/M \approx 1300$  Дж/г)



# Динамика разлёта ледяной мишени в эксперименте от 02.09.2016



Кадры ЭОП 550-70-1



Мишень до опыта

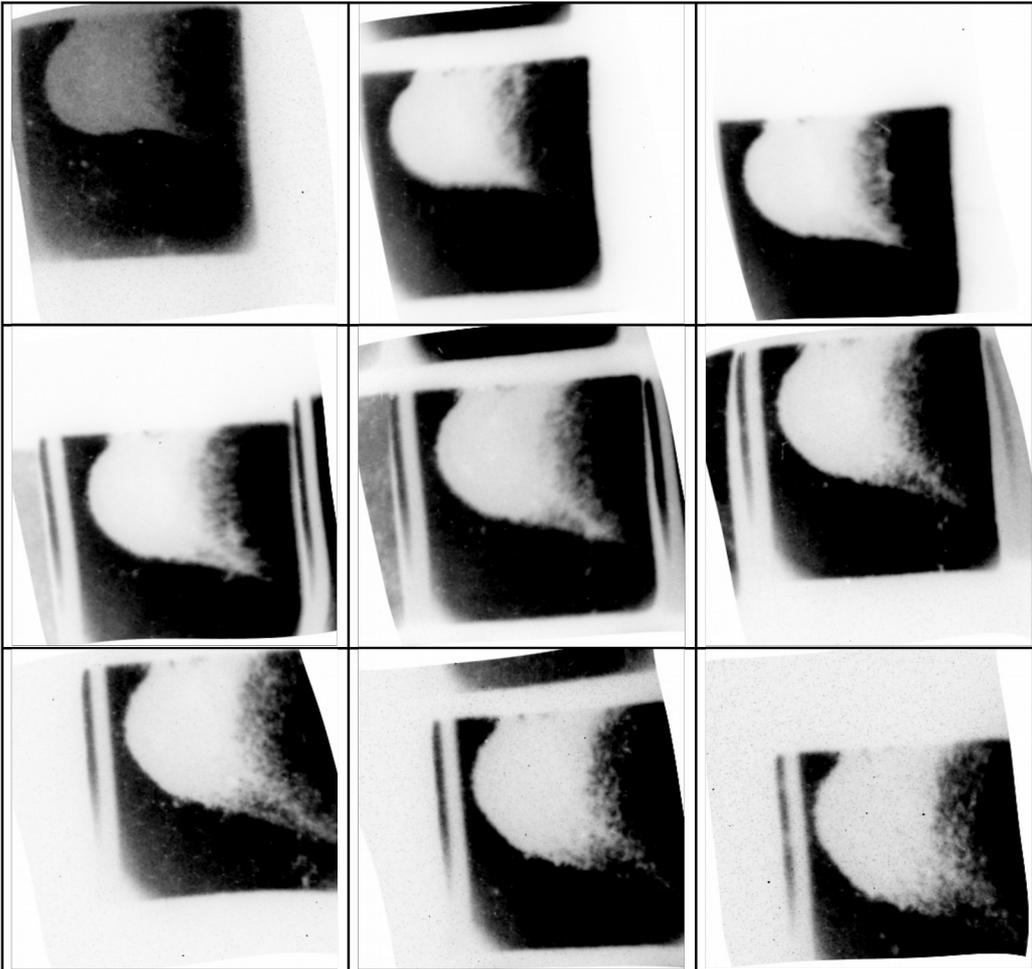


Диаметр  $D \approx 12$  мм  
Масса  $M \approx 0,8$  г  
Удельная энергия  
 $E/M \approx 250$  Дж/г

# Динамика разлёта ледяной мишени в эксперименте от 02.09.2016



Кадры ЭОП 550-70-1

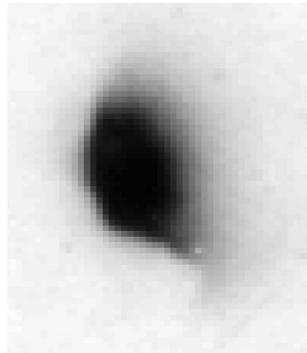


Мишень до опыта



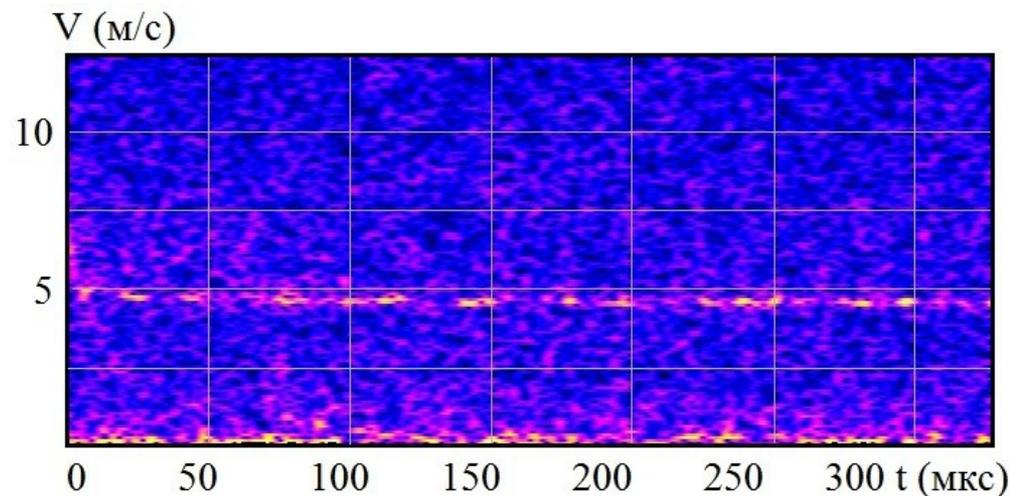
Диаметр  $D \approx 12$  мм  
Масса  $M \approx 0,8$  г  
Удельная энергия  
 $E/M \approx 250$  Дж/г

## Характерные обскурограмма и изоуровни пятна



Площадь пятна  $S_{0.5}=3,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$   
и эквивалентный диаметр  
круглого пятна  $d_{\text{экв.}}=214 \text{ мкм}$ .

## Регистрация лазерным оптогетеродинным методом PDV



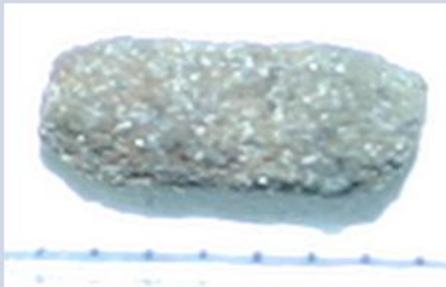
Зарегистрирован полет крупного осколка астероида, имеющего скорость  
**4,5-7 м/с.**

# Паспорт эксперимента от 27.01.2016 (исходные данные)



## Мишень

Тип «Хондрит 1»



Состав по массе:

SiO<sub>2</sub>-43,5%  
MgO-28,5%  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20,5%  
FeS-8,5%

Размер фрагментов:

Min. – 1 мкм  
Max. – 125 мкм  
Aver. – 80 мкм

Диаметр d, мм

2,5x6

Плотность ρ, г/см<sup>3</sup>

2,25

Масса m, г

0,0828

Место прицеливания

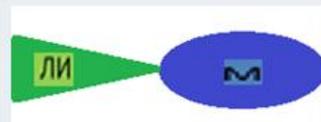
торец

Каверна, d/h, мм

отсутствует

Статическая прочность,  
S=221 кгс/см<sup>2</sup>

(испытания проводились на  
представительском образце,  
взятом из данной серии).



## Параметры лазерного излучения

Длина волны облучения - 2ω, нм

0,527

Энергия

E<sub>1ω</sub>, Дж

625

E<sub>2ω</sub>, Дж

262

E<sub>2ω на мишени</sub>, Дж

216

Временные  
характ.

1ω: τ<sub>0,5</sub>, нс

1,8

2ω: τ<sub>0,5</sub>, нс

1,8

Контраст 1ω: K<sub>p</sub>

1,5×10<sup>5</sup>

Фокуси-  
ровка

Фокусировка

Острая

Пятно расчетное Ø<sub>0,5l</sub>, мкм

100

Интенсив-  
ность

Расчетная, Вт/см<sup>2</sup>

1,5·10<sup>15</sup>

По данным обскуры, Вт/см<sup>2</sup>

3,3·10<sup>14</sup>

Средняя\*, Вт/см<sup>2</sup>

6,2·10<sup>14</sup>

Энергия

Коэффициент поглощения

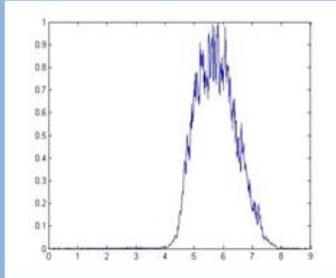
E<sub>поглощённая</sub>, Дж

\* Размер по полувысоте составляет 214 мкм, средний размер  
пятна рассчитан как (213+100)/2.

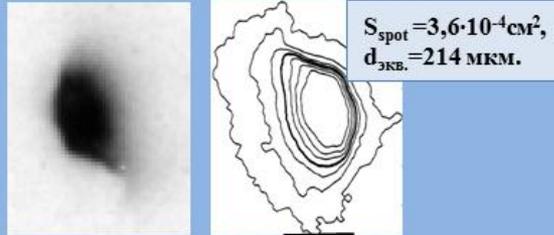
# Паспорт эксперимента от 27.01.2016 (результаты)



Форма импульса  $2\omega$



Обскурограмма



Осколки мишени



Баланс по массе

Энергия к массе,  
Дж/г

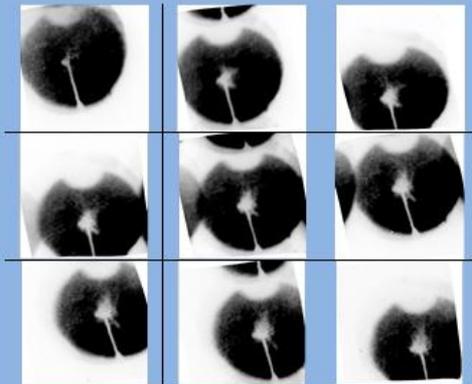
Поглощенная энергия к  
массе; Дж/г

Исходная, г.	Мелкие, г.	Крупный, г.	2600±260	
0,0828 (100%)	0,0125	0,033(40%)		

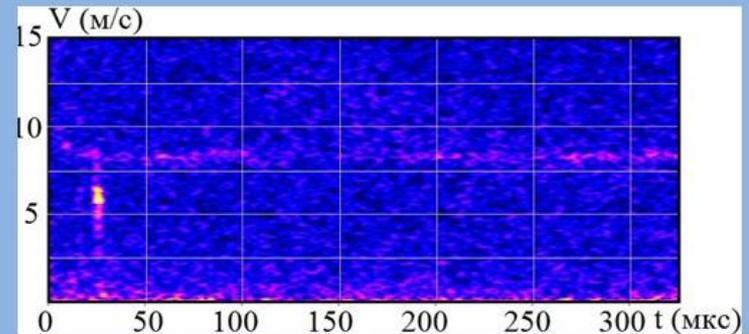
Данные измерения динамики разлета продуктов мишени с использованием ЭОП в режиме «лупа времени»

ТТХ съемки:

- начало съёмки – 80 мкс.
- между кадрами – 80 мкс.
- экспозиция – 1мкс.



Данные измерений методики PDV



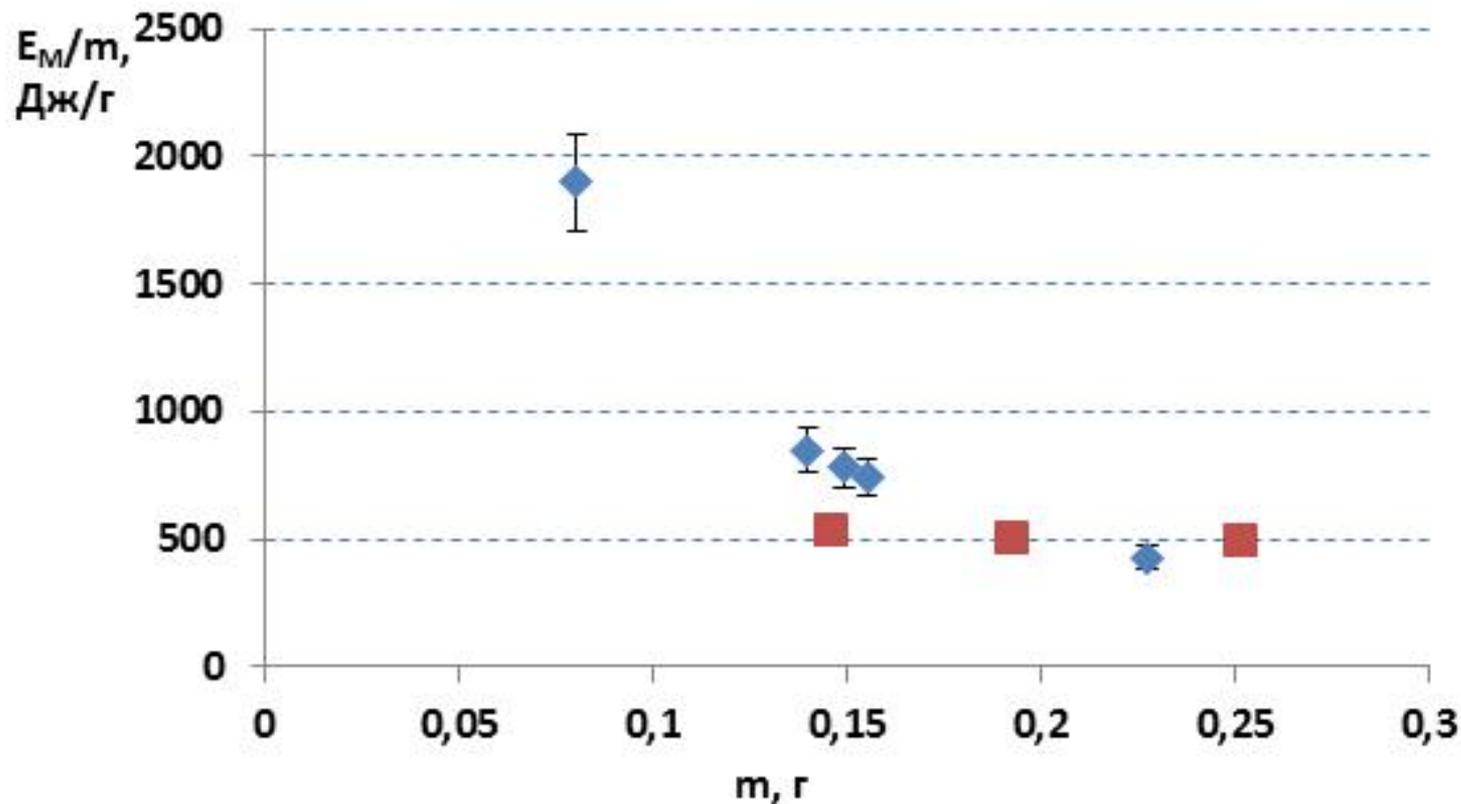
Стандартная регистрация полета целикового осколка. 8,5 м/с

# Результаты облучения компактных мишеней (хондрит) с $d < 125$ мкм и $\rho = 225$ кгс/см<sup>2</sup>



$E_M/m$ , Дж/г	Крупные осколки			Масса мелких осколков, г
	Количество, шт.	Масса, г	Доля от исходной массы, %	
1900	Нет	-	-	0,0434
850	Нет	-	-	0,0417
740	Нет	-	-	0,0849
780	Нет	-	-	0,0806
540	2	0,0343/0,0248	24/17	0,0485
510	1	0,0918	48	0,0482
430	Нет	-	-	0,1462
500	1	0,0870	35	0,1127

# Результаты экспериментов с хондритными мишенями, $\sigma = 225 \text{ кгс/см}^2$



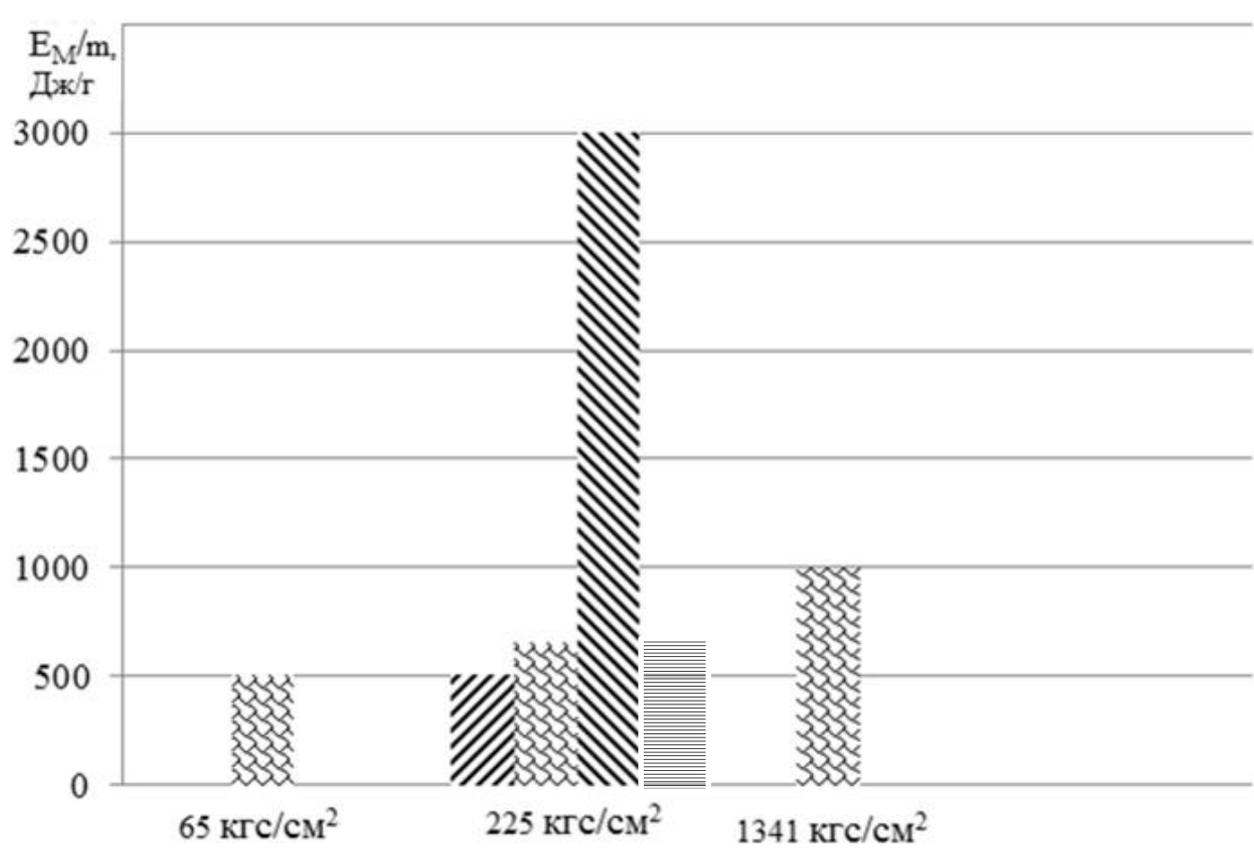
◆ - мишени полностью разрушены, ■ – мишени частично разрушены.  
Порог разрушения около 650 Дж/г.

# Результаты, полученные при варьировании типов мишеней и условий облучения



- Для хондритных мишеней эллипсоидальной формы с  $\rho = 225$  кгс/см<sup>2</sup> и соотношением осей 1 к 2 при фокусировке ЛИ на сужающейся части мишени на оси симметрии порог разрушения составил 3000 Дж/г.
- Для имитации «заглубленного» взрыва в мишенях предварительно делались каверны глубиной 500 мкм и диаметром 400 мкм; излучение фокусировалось на дно каверны. Выигрыш в удельной энергии  $\approx 25\%$ .
- В экспериментах с облучением мишеней несколькими последовательными либо одновременными импульсами выигрыша в энергии по сравнению с одиночным мощным импульсом суммарной энергии не наблюдалось.
- Для сферических мишеней из железного сплава порог разрушения составил 3000 – 4000 Дж/г
- Ледяные мишени разрушались при удельных энергиях в 15-40 Дж/г.

# Сравнительная гистограмма критериев разрушения хондритных мишеней



▨ - «сфера»; ▨ - «сфера» с каверной; ▨ - эллипсоидальный, облучение на сужающейся части, на оси симметрии; ▨ - эллипсоидальный, облучение на расширяющейся части, на плоскости симметрии.

- Получено обоснование способа моделирования гидродинамических процессов при ядерном взрыве на поверхности реального астероида импульсом лазерного излучения, сфокусированного на поверхности искусственной микромодели.
- Разработаны технологии изготовления хондритных микромоделей астероидов с заданными параметрами.
- Проведены исследования железных сплавов, имитирующих железно-никелевый астероид.
- Оработана схема создания имитатора ледяного астероида в вакуумной камере.
- Для разных микромоделей астероидов в лазерных экспериментах получены приближённые критерии разрушения в зависимости от микроструктуры, прочности, формы моделей и условий облучения.
- Результаты согласуются с результатами, полученными в ходе предварительных экспериментов на установке Искра-5 и Луч.

***СПАСИБО  
ЗА  
ВНИМАНИЕ***