



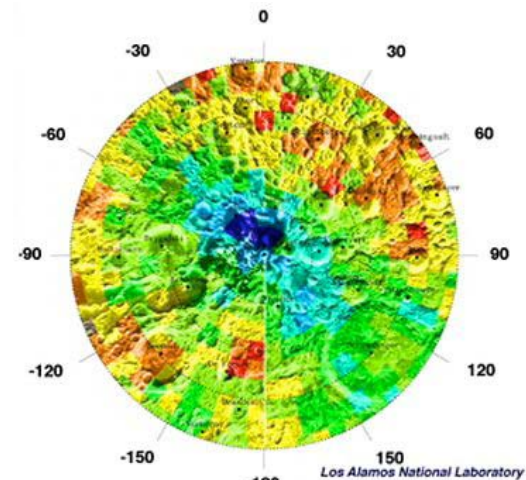
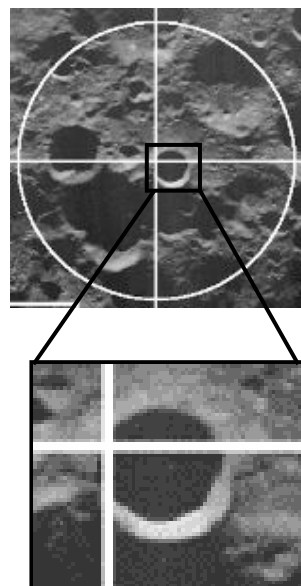
# Уравнение состояния лунного грунта и моделирование эксперимента LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite)

И.В.Ломоносов, В.В.Ким, А.В.Матвейчев, А.В.Острик, В.Г.Султанов, А.В.Шутов  
ИПХФ РАН

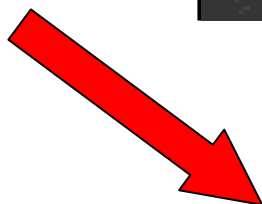
- 
- **LCROSS эксперимент: мотивация, цели, исполнение**
  - **Исследования Луны**
  - **Результаты исследований Луны**
  - **Свойства лунного грунта и породообразующих оксидов при высоких давлениях +**
  - **УРС лунного грунта**
  - **Постановка расчетной задачи**
  - **Результаты расчетов, обсуждение**
  - **Выводы**

# LCROSS

## (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite)



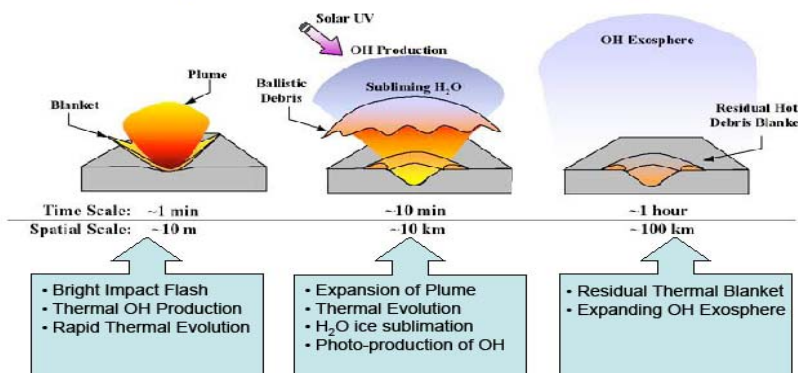
распределение водорода



модуль  
диагностики

ударник  
M=2000 кг  
W=2.5 км/с  
 $\theta=75^\circ$

### Impact Observation Strategy



The combination of ground-based, orbital and in-situ platforms span the necessary temporal and spatial scales: from sec/meters to hours/km

The LCROSS mission has multiple layers of observing

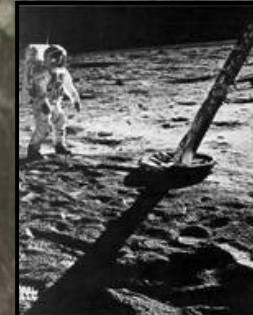
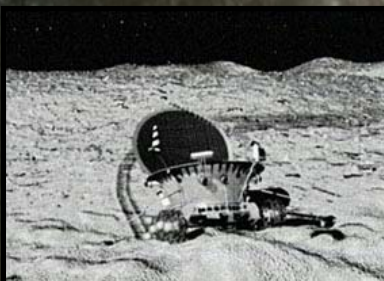
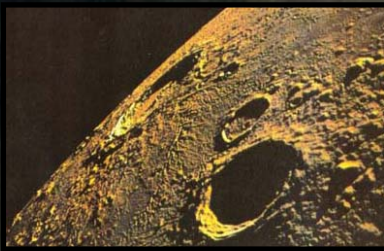
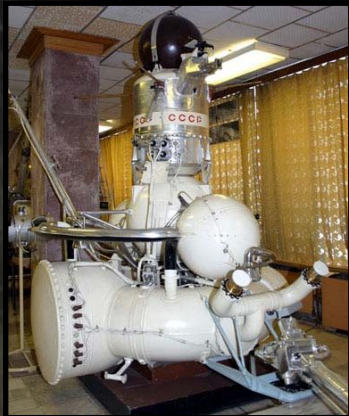
# Исследования Луны

## СССР – Россия (1946 - ...)

- радиолокация 1946
- Луна-2, 1959 - вымпел
- Луна-3, 1959 – фото обратной стороны
- Луна-9, 1966 – посадка, телепередачи
- Луна-10, 1966 – спутник
- Луна-16, 1970 и Луна-20, 1972 – авт. возвращаемые станции
- Луноход-1, 1970 и Луноход-2, 1973 - роботы

## США (1959 - ...)

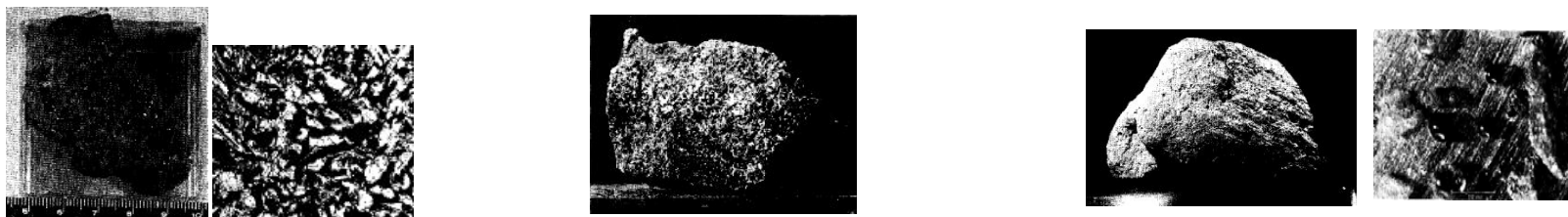
- Пионер-4, 1959 – фото
- Рэйнджеры 7-9, 1965-66 – жесткая посадка, телесъемка
- Сервейер, 1966-68 – посадка, съемка, отбор и анализ грунта
- Аполлон-8, 1968 – 10 оборотов и возвращение
- Аполлон-11, 1969 – люди на Луне (образцы, сейсмометр, спектрометр, магнетометр)
- + Аполлон-17, 1972 – завершение, всего 12 чел., 300 часов, 25 млрд.



# Результаты исследований Луны

- Карты Луны – <http://www.google.com/moon/>, NASA World Wind (<http://worldwind.arc.nasa.gov>)
- Рельеф Луны – вулканическая активность + метеориты
- Существуют области гравит. аномалий (масконы, до 1000 км,  $\Delta M \leq 10^{-4} M_{\odot}$ ) и тепловых ( $\Delta T = 15$  К)
- Типы лунного грунта (А.П.Виноградов) базальтовые породы, брекчии (уплотнения раздробленного вещества), спеки, стекла, полевошпатные породы, Fe
- Реголит: реголит – 1-10 м (Луноход), 40-45 м (Аполлон)
- Строение - удар метеорита (район кратера Фра Мауро,  $m = 600$  тонн,  $D_{\text{кратер}} = 100$  м, 1972):
  - кора – 60 км (базальт – до 25 км, 25-60 км – эцлогит)
  - мантия – до 960 км
  - $D_{\text{ядра}} = 1500$  км
- Состав лунного грунта:
  - $\text{SiO}_2$  – 40-45%, FeO – 20%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 12%, CaO – 10%
  - средняя плотность –  $1.2 \text{ г/см}^3$ , пористость – до 50%
  - всего – около 70 элементов
  - нет – Au, Ag, мало – Na, K, Pb, Bi

# Свойства лунного грунта



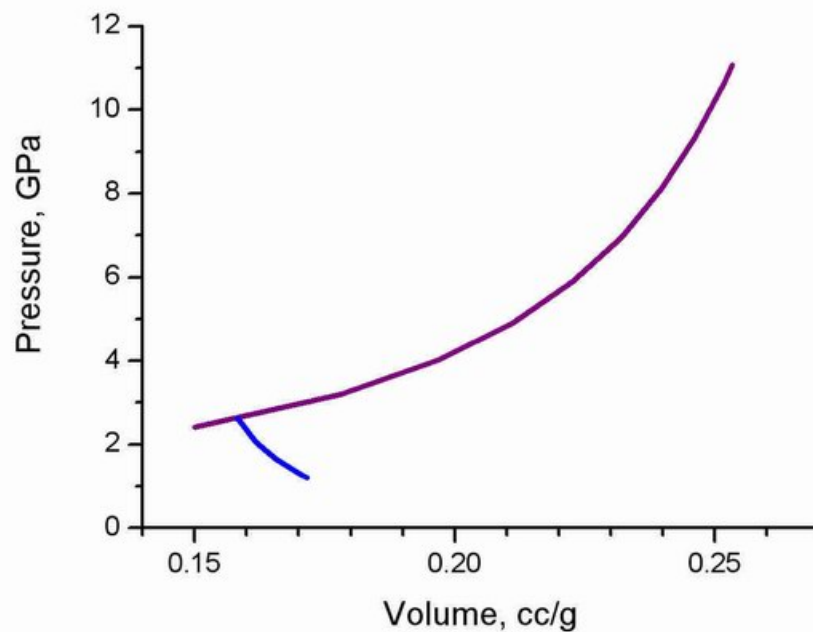
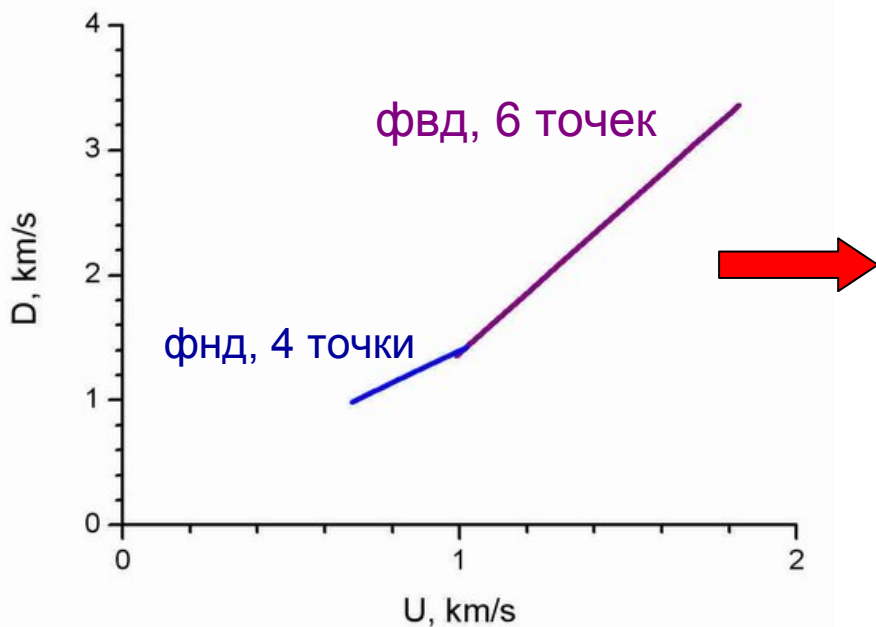
Oxide	Type A rocks (vesicular)			Type B rocks (crystalline)					Type C (breccia)		Type D
	10022	10072	10057	10020	10017	10058	10045	10050	10021	10051	10037
SiO <sub>2</sub>	43	45	36	38	40	43	42	38	43	40	43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.7	9	11	11	10	13	13	11	11	12	13
TiO <sub>2</sub>	11	10	12.5	12	11	9	8	9	8.6	10	7
FeO	21	17	20	18	19	17	18	20	19	16	16
MgO	6.5	8	9.5	8	8.5	6.5	7	10	7.4	9	8
CaO	9	9.5	10	10	10	10.5	10	10	11	11	12
Na <sub>2</sub> O	0.4	0.6	0.54	0.59	0.65	0.56	0.51	0.51	0.2	0.48	0.54
K <sub>2</sub> O	0.21	0.2	0.18	0.064	0.22	0.11	0.1	0.064	0.15	0.17	0.12
MnO	0.26	0.36	0.49	0.32	0.35	0.55	0.27	0.5	0.22	0.41	0.23
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.41	0.69	0.95	0.31	0.67	0.54	0.51	0.7	0.37	0.69	0.37
ZrO <sub>3</sub>	0.14	0.11	>0.27	0.13	0.19	0.03	0.095	0.095	0.2	0.04	0.05
NiO	0.04							0.007	0.03	0.04	0.03

Источник: NASA SP-214: Apollo 11, Preliminary Science Report

# Лунный грунт при высоких P

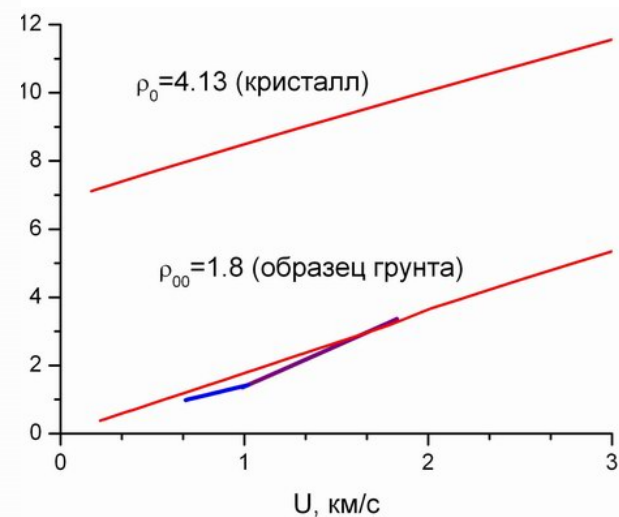
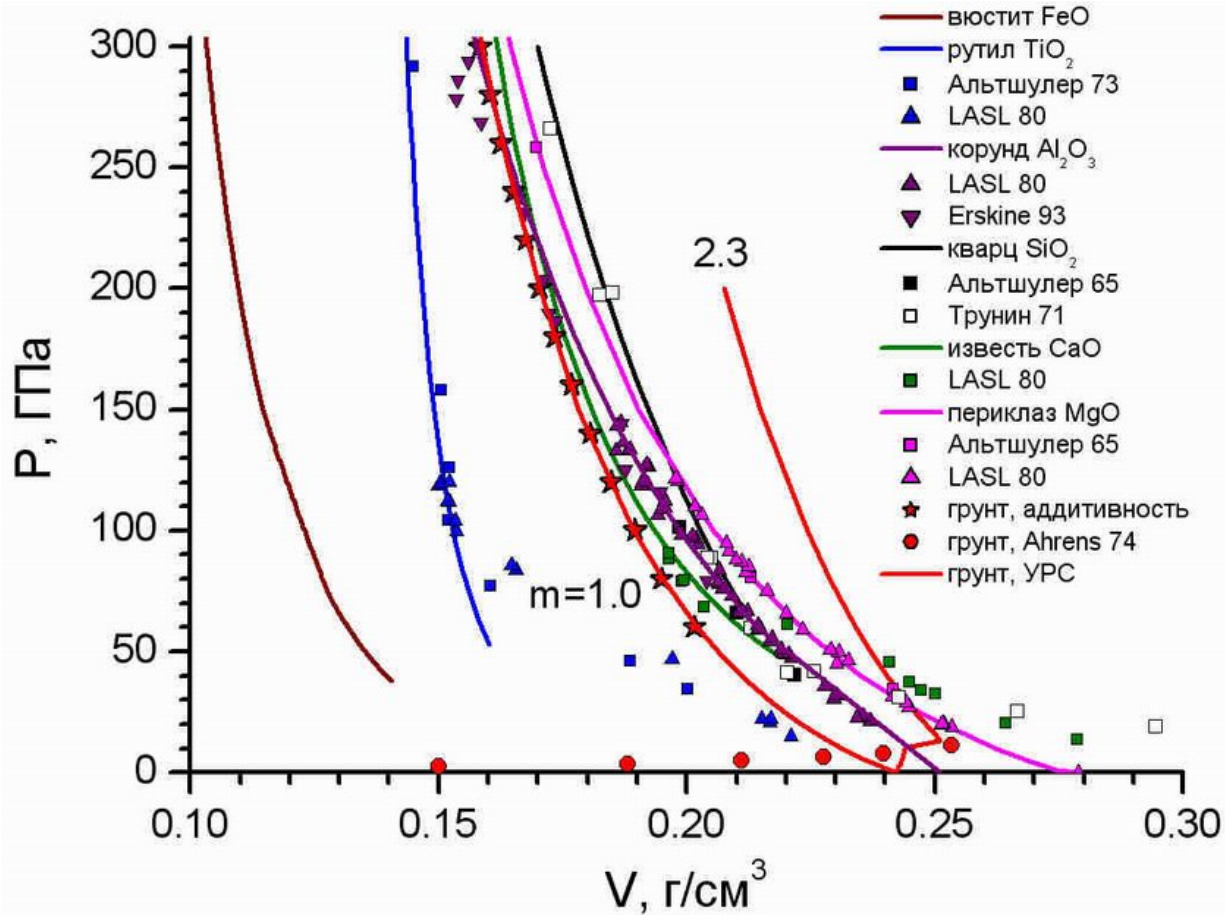
T.J.Ahrens: moon glass,  $\rho=1.8 \text{ г/см}^3$   $D=0.1+1.3U$  ( $0.68<U<1.02$ )  $D=-1.01+2.39U$  ( $0.99<U<1.83$ )

T.J.Ahrens, M.Cole, Shock compression and adiabatic release of lunar fines from Apollo 17, Proc. 5th Lunar Science Conf., Suppl. 5. Geochim. et Cosmochim. Acta, 3. pp.2333-2345, 1974.



Оксид	Состав			Ударная адиабата (фвд)			Термодинамические данные (1 моль)					ФВД
	% M	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	% V	a, км/с	b	u, км/с	Tm, K	Tv, K	dHm	dHv	Cp	
SiO2	40	2.65	50	4	1.283	4.84-26.76	1883	3223	8.52	573.6	44	4.27*
TiO2	9	4.23	8	2.1	2.15	2.44-5.2	2128	3200	64.8		40	5.95
Al2O3	11	3.84	10	9.52	0.955	1.0-8.28	2318	3253	109	485.7	79	3.98
FeO	17	5.6	10	3.72	1.59	2.41-4.05	1800	2582	138	230.3	52	6(?)
MgO	10	3.58	10	5.73	1.36	2.6-5.6	3035	3873	77.4	544.3	37.8	3.62*
CaO	11	3.32	12	4.2	1.5	3.2-4.6	2976	3723	51.2	625.3	42.8	3.4

# УРС лунного грунта



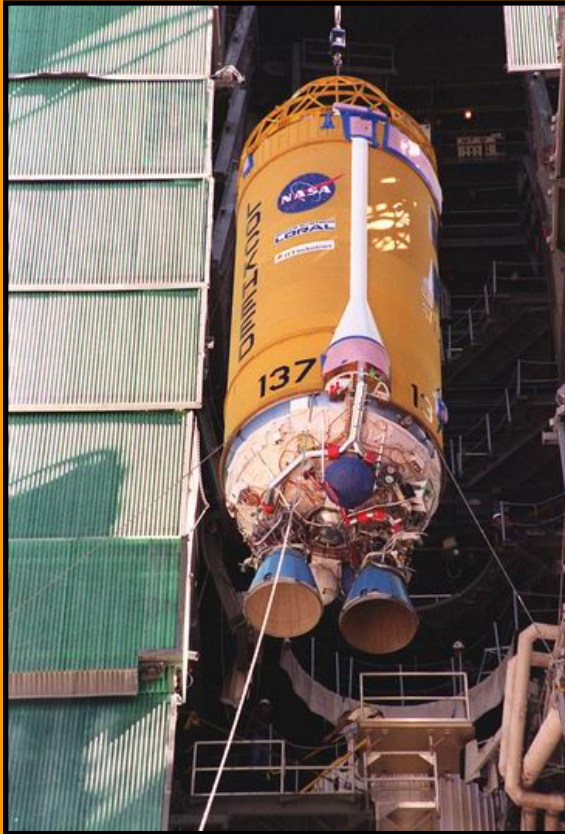
Аддитивность:

на ударной адиабате при  $P=\text{const}$   $V = \sum_{i=1}^N X_i^V V_i$ ; теплоемкость  $C_p = \sum_{i=1}^N X_i^V C_{p_i}$

УРС:  $\rho_0=4.13 \text{ г/см}^3$   $C_v=0.521 \text{ Дж/(гК)}$  Плавнение= $\text{SiO}_2$   $P_c=1.3 \text{ ГПа}$   $V_c=0.754 \text{ см}^3/\text{г}$   
 $\langle \rho_0 \rangle=4.4 \text{ г/см}^3$   $C_s=6.85 \text{ км/с}$   $T_v=3700 \text{ К}$   $T_c=14000 \text{ К}$

# Постановка расчетов

Численный алгоритм: параллельный метод  
конечно-размерных частиц в ячейке



## Atlas V-401

Mass (total): 22744 kg

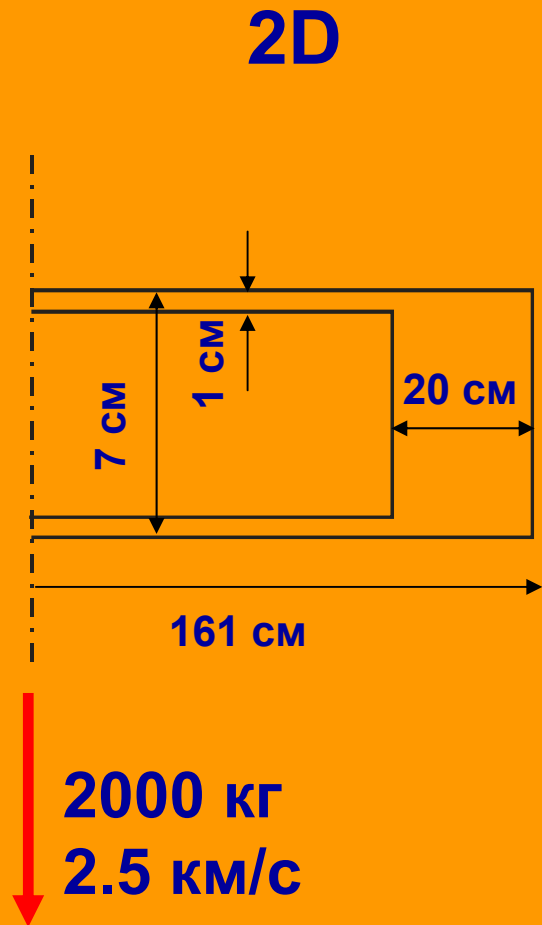
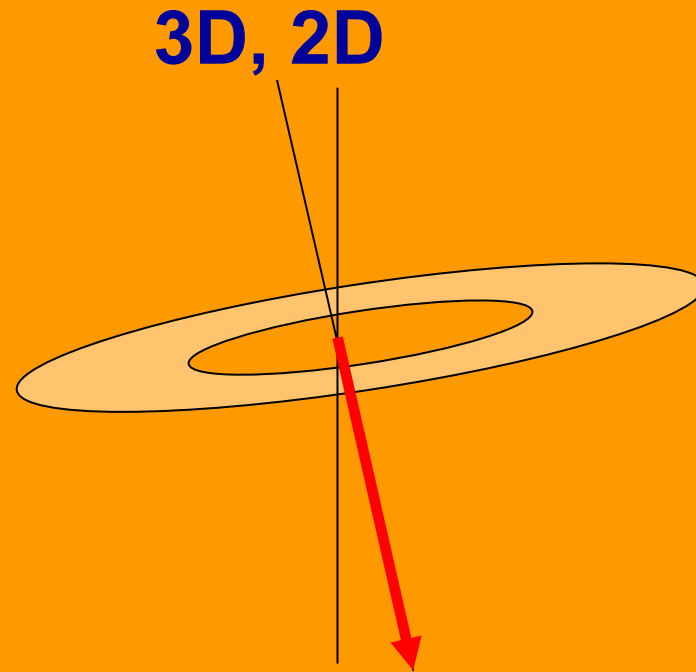
Mass (dry): 1914 kg

Mass (fuel): 20830 kg

Length: 11.70 m

(12.68 m nozzle deployed)

Diameter: 3.05 m



$\theta=15^\circ$   
3м–10см  
2000 кг  
2.5 км/с



# Тороидальный ударник

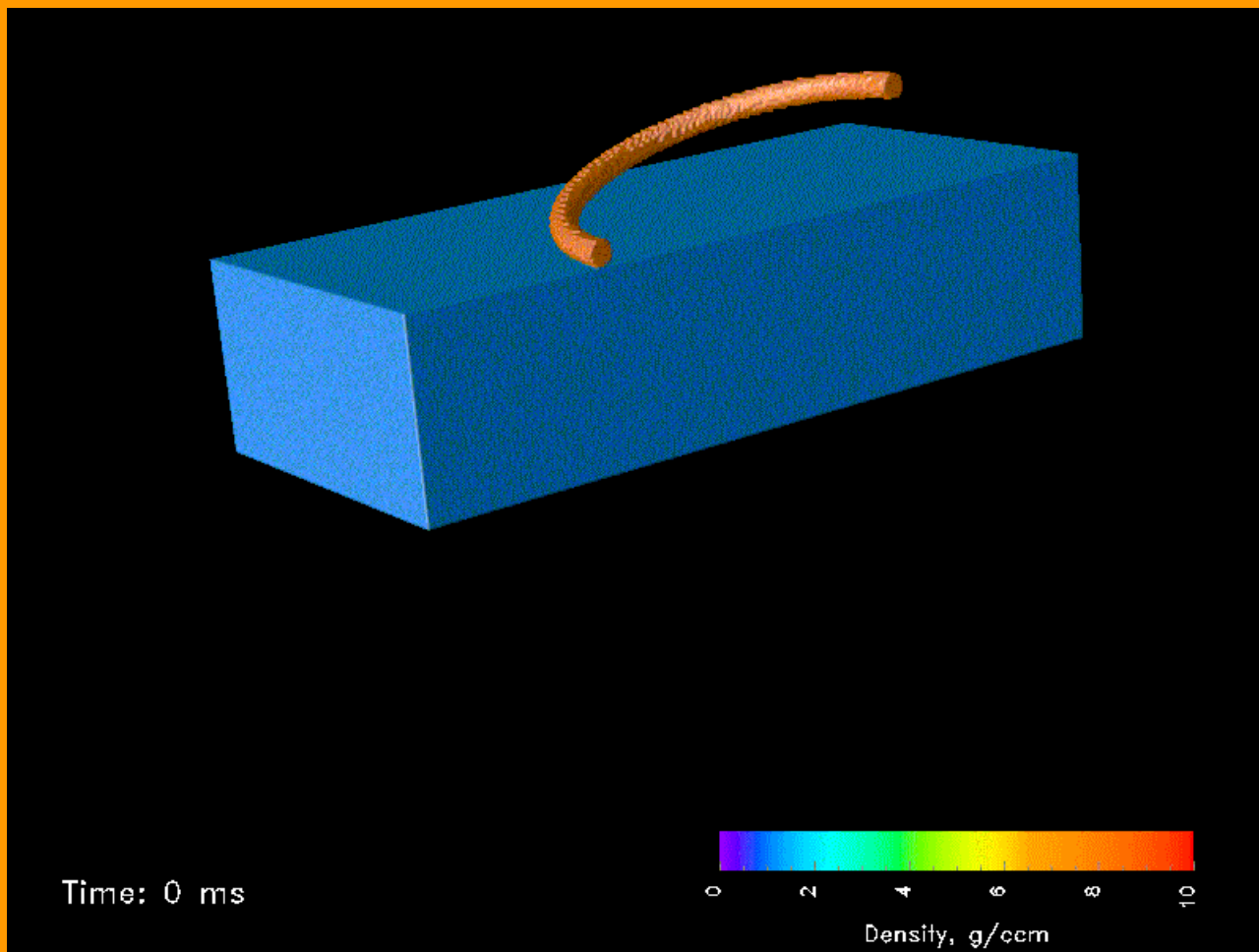
скорость внедрения 0.9 км/с,  
волны сжатия 1.3 км/с

полное компактирование в  
слое 0.1 м,  $\rho=4 \text{ г/см}^3$ ,  $T=2000 \text{ К}$ ,  $P=1 \text{ ГПа}$

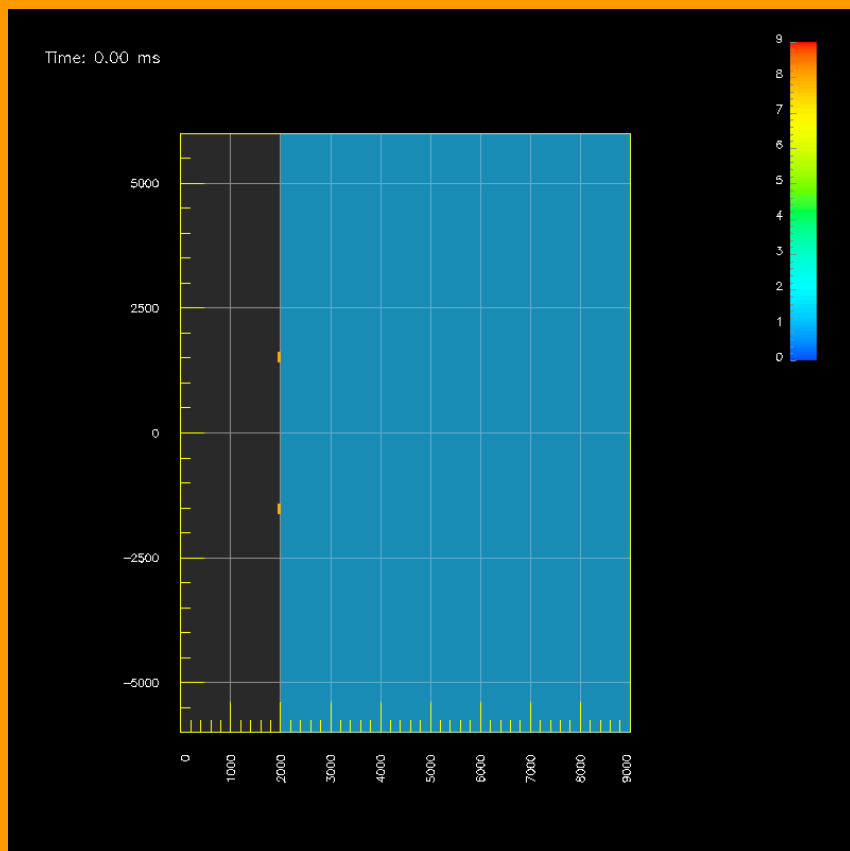
$t=1.2 \text{ мс}$ : волна сжатия  
достигает оси симметрии,  
 $T=2500 \text{ К}$ ,  $P=3 \text{ ГПа}$

$t=2 \text{ мс}$ : разрушение ударника

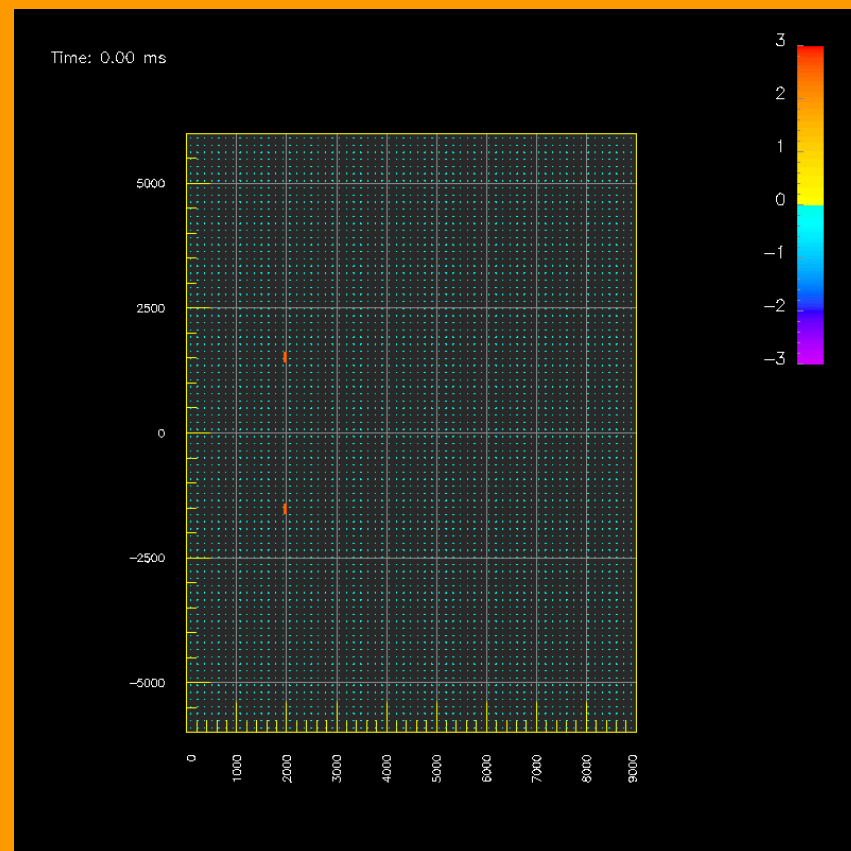
объем грунта в  
расходящейся волне сжатия  
 $\sim 65 \text{ м}^3$ ,  $\sim 80 \text{ тонн}$



# Цилиндрический ударник



**ПЛОТНОСТЬ**



**СКОРОСТЬ**

**$t=7$  мс:  $h=3$  м,  $d=3.05$  м, выброс=90 тонн  
ударник разрушается, скорость выброса из центра 300 м/с, по  
краям 50 м/с, высота выброса – до 40 км**



# Выводы

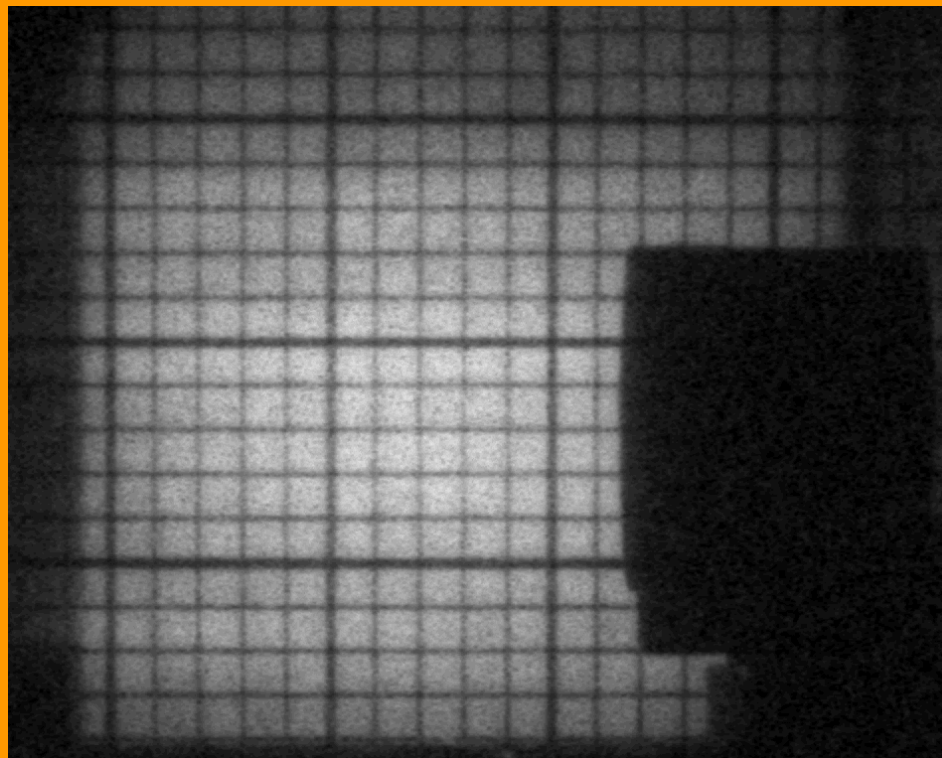
- ❑ Разработано УРС лунного грунта
- ❑ Проведено 3D и 2D моделирование наклонного и вертикального ударов тора и цилиндра о лунный грунт
- ❑ Кратер (на 6 мс):
  - 2.7 м глубина, 6 м диаметр
  - объем/масса выброса 75 м<sup>3</sup>/ 90 тонн
  - высота 40 км
- ❑ Скейлинг для шара d=1 м:

$$D_r = 7.03 \times 10^{-2} \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.39} d_p^{0.92} v_i^{0.52} g^{-0.26}$$

**D~17 м** (сайт NASA – 30-40 м, масса выброса 900 т)

# Эксперимент (Б. Жуков, ФТИ)

## эксперимент R5



рельсотрон, поликарбонат 2x2x2 мм, до 5 км/с