



# Плазменно-пылевая экзосфера Луны: Основные проблемы и методы исследований

*Кузнецов И.А., Захаров А.В., Дольников Г.Г., Ляш А.Н., Карташева А.А., Шеховцова А.,  
Бычкова А., Шашкова И.А.*

*Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия; [kia@iki.rssi.ru](mailto:kia@iki.rssi.ru)*

**Семинар отдела 53**  
ИКИ РАН, 29.04.2020 г.

# Содержание

- Динамика плазменно-пылевой экзосферы вблизи поверхности Луны
- История обнаружения, свидетельства
- Гранулометрия реголита
- Опасность лунного реголита и поднимающейся пыли
- Лабораторное и численное моделирование лунной пылевой динамики и численное моделирование

# Воздействие на лунную среду

## 1. Механические

- Микрометеоритная бомбардировка
- Воздействие на поверхность Луны со стороны КА

## 2. Электромагнитные

- Солнечный ветер
- УФ-излучение
- Вторичные электроны, фотоэлектроны
- Электрический потенциал поверхности
- Хвост земной магнитосферы
- Локальные лунные магнитные аномалии

# Механические воздействия

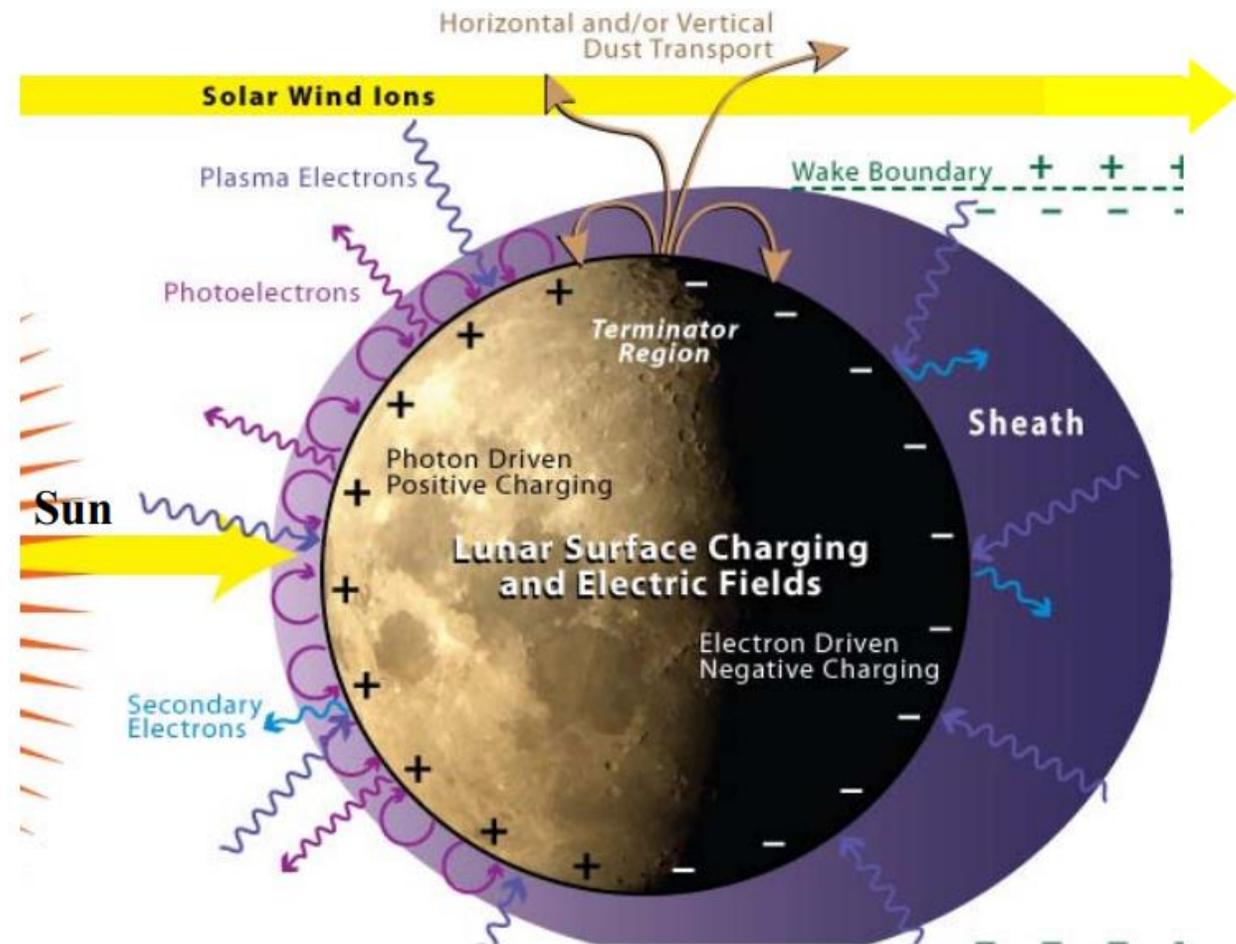
- Частицы астероидного и кометного происхождения, поток изотропный,  $5.2 \times 10^{-16} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  [Bruno et al., 2006] – около  $10^6$  кг/год. Поток частиц оценивается как  $100 \text{ m}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  [Попель и др., 2016].
- Размер большинства частиц 10 нм ... 1 мм.
- Скорость соударения с поверхностью Луны 10 ... 72 км/с.
- При ударе выбрасывается число частиц, многократно превышающее массу импактора.
- Большинство возвращается на поверхность, но при достижении скорости 1,6 км/с частицы выходят на орбиту Луны, а при 2,4 км/с покидают лунную зону влияния.

Также механические  
воздействия



## Электромагнитное воздействие

- Локальные заряженные пылевые частицы, их левитация
- Падение микрометеоритов
- Электрическое поле
- Поток солнечного ветра
- Солнечный электромагнитный спектр



Воздействие на лунные реголит и плазменно-пылевую экзосферу  
[Halekas et al., 2015]

# Солнечный ветер

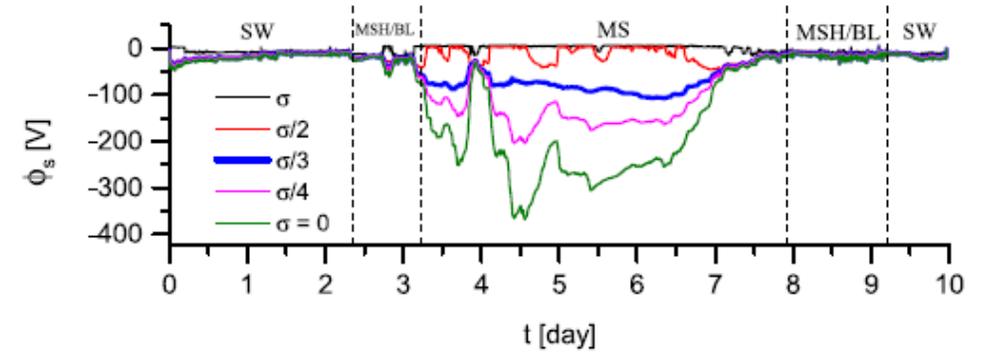
Table 2 - Typical solar wind parameters at the orbit of the Earth [Hundhausen, 1995].

Quantity	Value	Note
Proton density	6.6 cm <sup>-3</sup>	
Electron density	7.1 cm <sup>-3</sup>	
Bulk speed	450 km/s	i.e. 1 keV proton energy
Proton temperature	10 eV	i.e. 45 km/s thermal speed
Electron temperature	12 eV	i.e. 2100 km/s thermal speed

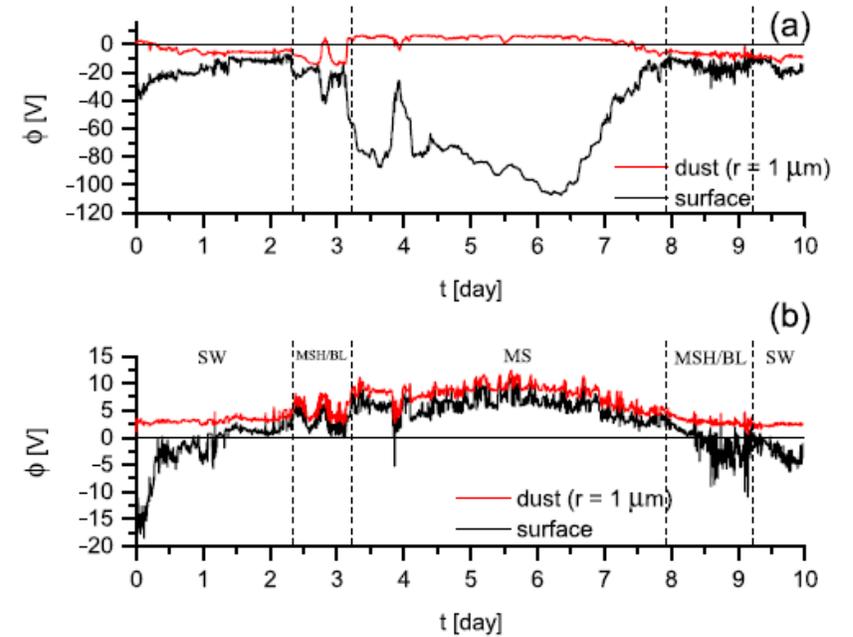
- Скорость частиц значительно варьируется и зависит от солнечной активности
- Основная масса ионов поглощается реголитом [Bhardwaj et al., 2015]
- 10...20 % ионов захватывают электроны и рассеиваются в виде нейтралов. [McComas et al., 2009; Wieser et al., 2009; Lue et al., 2018]
- 0,1...1 % отражается от поверхности, сохраняя положительный заряд (H<sup>+</sup>) [Saito et al., 2008]
- Значительная часть электронов поглощается, часть – рекомбинирует с ионами, часть – отражается, создавая поток отраженных электронов

# Земная магнитосфера

- приблизительно 30% лунных суток Луна оказывается под воздействием магнитосферной плазмы.
- Луна попадает в плазму хвоста магнитосферы и может оказаться либо в одной из долей хвоста (tail lobes), либо в низкоширотном пограничном слое или плазменном слое (plasma sheet) [Tsurutani et al., 1984b].
- В северном и южном долях хвоста плотность плазмы очень мала  $10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$  [Peterson et al., 1984].
- В плазменном слое магнитосферного хвоста, который делит северный и южный доли, плотность плазмы составляет  $0,05-0,2 \text{ cm}^{-3}$ , но характеризуется высокой температурой ионов (1...5 кэВ) и сильно изменчивой скоростью (10...1000 км/с) [Frank et al., 1985].



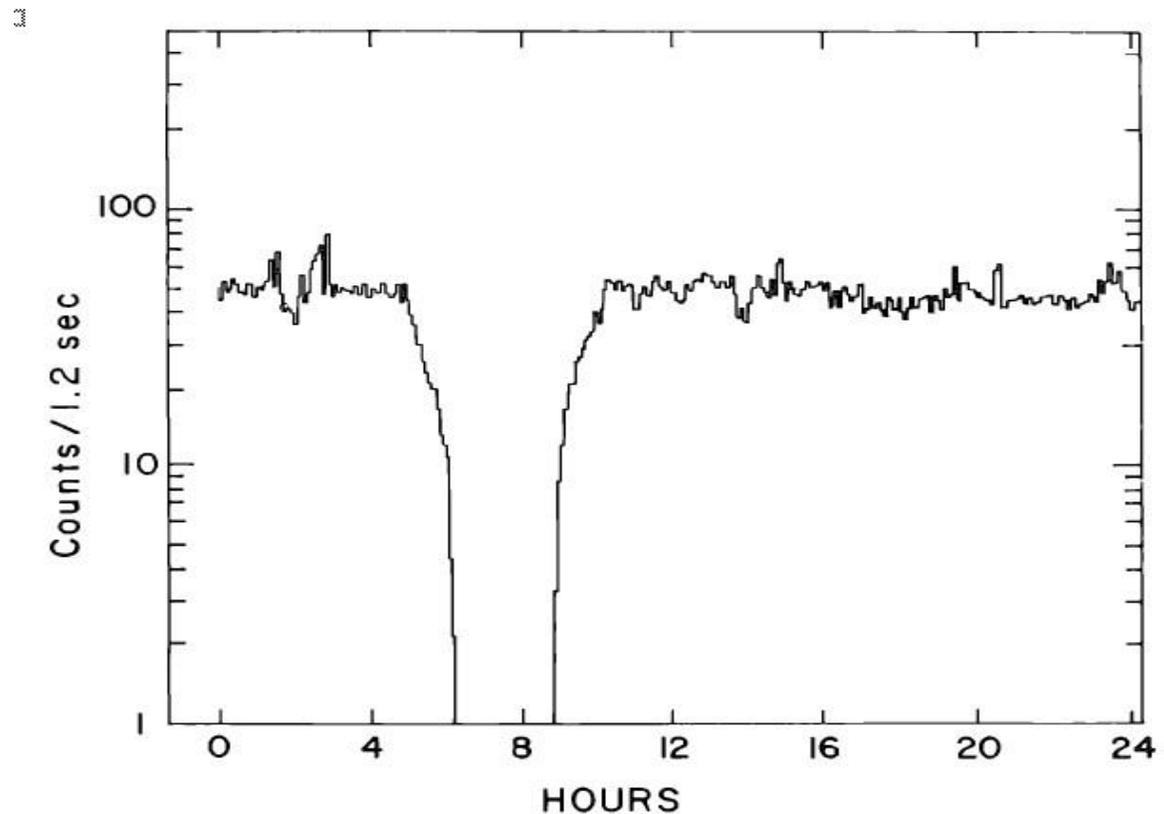
**Figure 4.** Temporal evolution of the lunar surface potential  $\phi_s$  during the magnetotail crossing for  $\chi = 90^\circ$  for different reductions of the total SEE yield,  $\sigma$ .



**Figure 6.** Temporal variations of the lunar surface potential,  $\phi_s$ , and glass grain (radius  $r = 1 \mu\text{m}$ ) potential,  $\phi_d$ , above the surface through the magnetosphere pass (with reduced of the SEE yield for the surface,  $\sigma/3$ ) for two solar zenith angles, (a)  $\chi = 90^\circ$  and (b)  $\chi = 85^\circ$ .

# Солнечное излучение

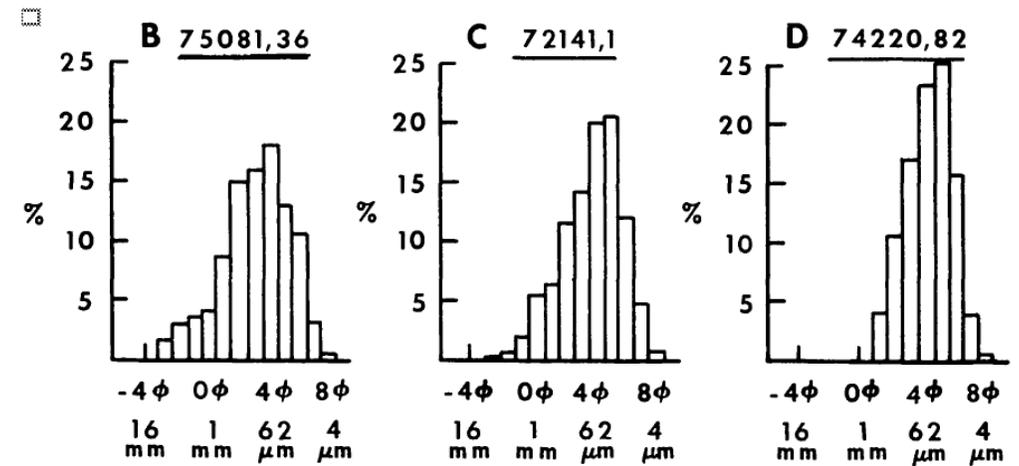
- Фотоэмиссия – основной вклад в формирование электрического заряда реголита.
- Для освещенной стороны Луны в условиях солнечного ветра плотность фототока на порядок выше токов электронов и ионов солнечного, а также вторичного излучения электронов лунной поверхностью [2014\_Stubbs]
- Энергия фотоэлектронов, выбитых солнечным УФ излучением, находится в диапазоне от 4 до 1 эВ [Wills et al., 1973]
- Эффективность фотоэмиссии образцов лунного реголита составляет  $2,8 \cdot 10^9 \text{ э см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  (фототок  $\sim 4.5 \text{ мкА м}^{-2}$ ) [Willis et al., 1973 (Grard); Feuerbacher et al., 1973]



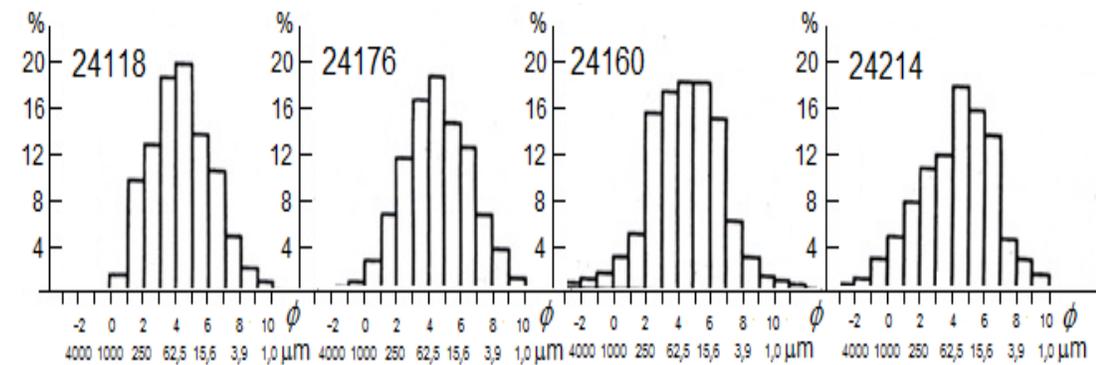
Скорость счета прибора CPLEE на поверхности Луны. При пересечении центральной части геомагнитного хвоста на Луне произошло затмение Солнца. На графике этот интервал между 5 и 9 часами [Reasoner and Burke, 1972].

# Реголит и лунная пыль

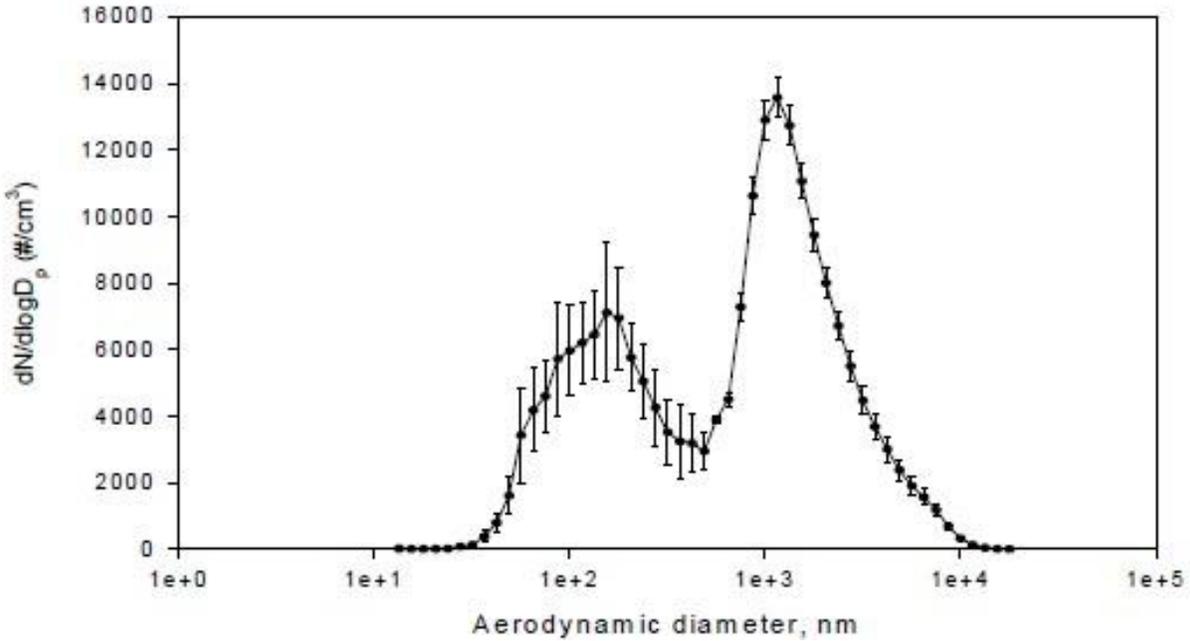
- Толщина реголита – 4...5 м в области лунных морей и 10...15 м в гористых районах [McKay et al., 1991; Fa et al., 2019]
- Более четверти (по массе) лунных частиц реголита представляют собой связанные стеклом агрегаты из более мелких частиц почвы (glass-bounded aggregates) [McKay et al., 1991] и брекчии.
- Частицы с размером <1 мм составляют более 95% массы реголита [Carrier, 1973] Средний размер частиц находится в диапазоне от 40 до 100 мкм. Такие частицы составляют порядка половины веса лунного реголита [Graf J.C. 1993, коммулятивное распределение]



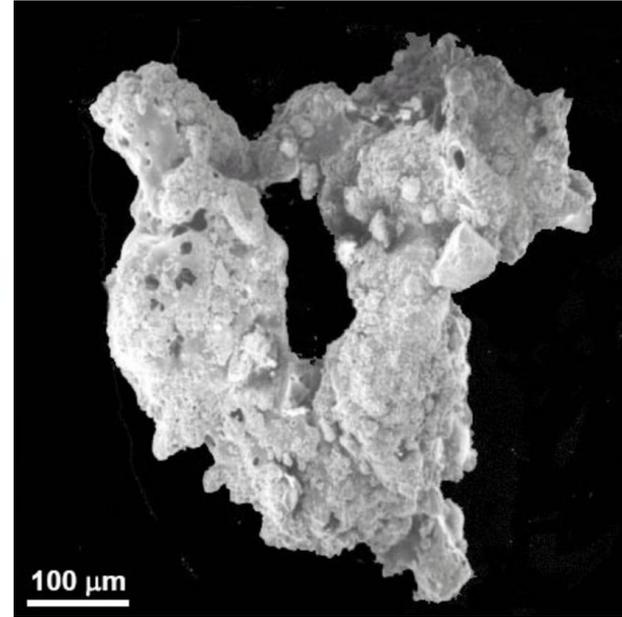
Аполлон-17 [McKay et al., 1974]



Луна-24 [Родэ, Иванов, 1984]



10084



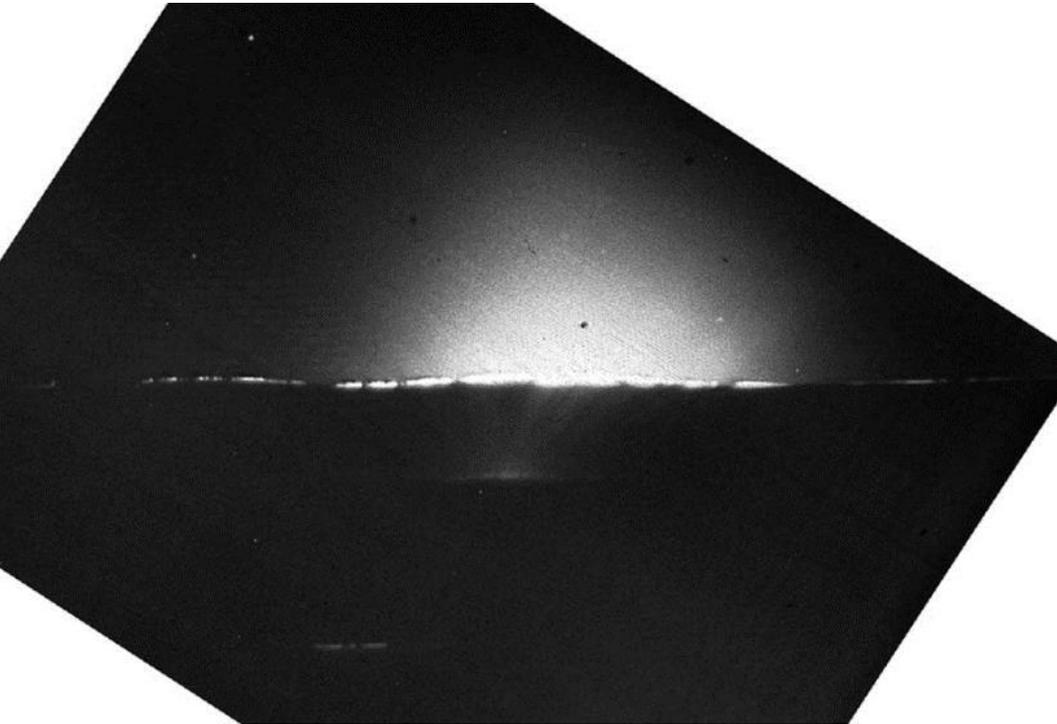
Распределение микронных и субмикронных частиц образца реголита 10084, доставленного экспедицией Apollo. Измерения проводились аэрозольным методом с помощью приборов *Scanning Mobility Particle Sizer* для частиц в диапазоне 2.5 to 500 nm и *Aerodynamic Particle Sizer* для частиц в диапазоне 500 nm to 20 μm [Greeberg et al., 2007].

Фотография частицы лунного агглютината. Пористое стекло с вкраплениями частиц реголита и железа.

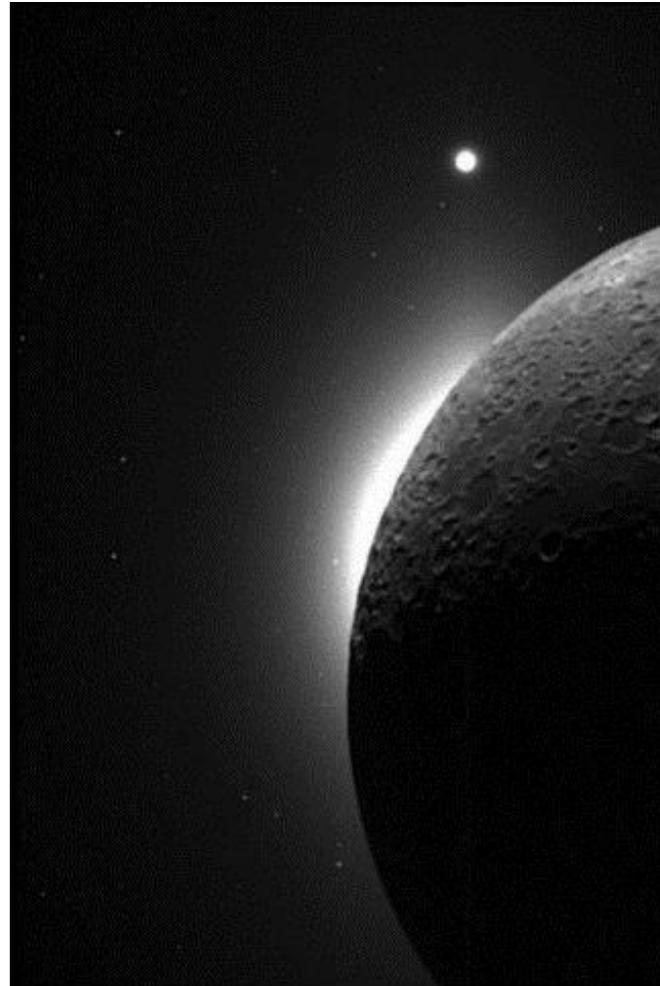
# Левитирующие пылевые частицы

- Силы: кулоновская, гравитация, адгезия
- При попытках учета сил адгезии, их приблизительные оценки показывают, что эти силы могут в тысячи или даже миллионы раз превышать силу тяжести  $F_g$  микронной и субмикронной пылинки с радиусом  $r_d$  [Li et al., 2006, Hartzell and Scheeres, 2011].
- Для относительно больших пылевых частиц ( $>10^3 \mu\text{m}$ ) силы адгезии ( $F_a \propto r_d$ ) становятся несущественными с сравнении с гравитационной силой ( $F_g \propto r_d^3$ ) [Hartzell and Scheeres, 2011].
- Чтобы  $F_e$  при среднем электростатическом поле  $E \sim 10 \text{ В/м}$  [Freeman et al., 1973; Freeman and Ibrahim, 1975] на освещенной стороне Луны, могла поднять пылинку диаметром, например 1 мкм, преодолев только силу гравитации, она должна иметь достаточно большой заряд  $q \approx 1500 e$  [Rosenfeld and Zakharov, 2020]

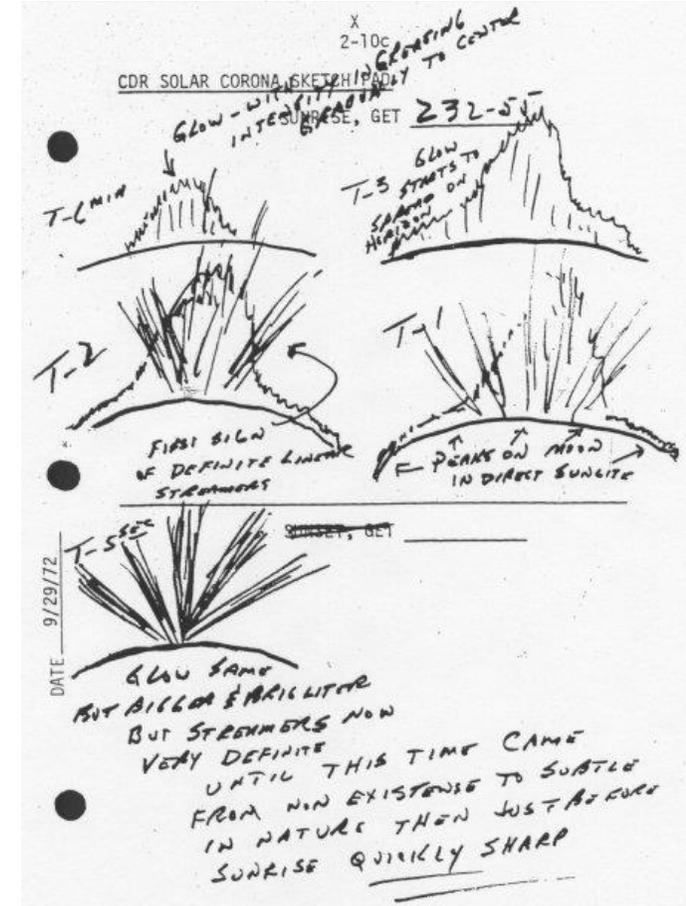
# История обнаружения, свидетельства



«Пылевой фонтан» и свечение пыли над горизонтом Луны, Surveyor-6 (Rennilson and Criswell, 1974).

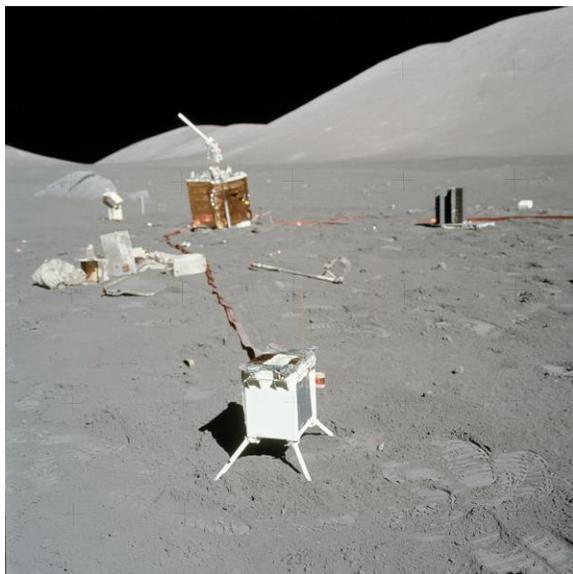


Свечение пыли над Луной, Clementine Lunar Orbiter (1991)

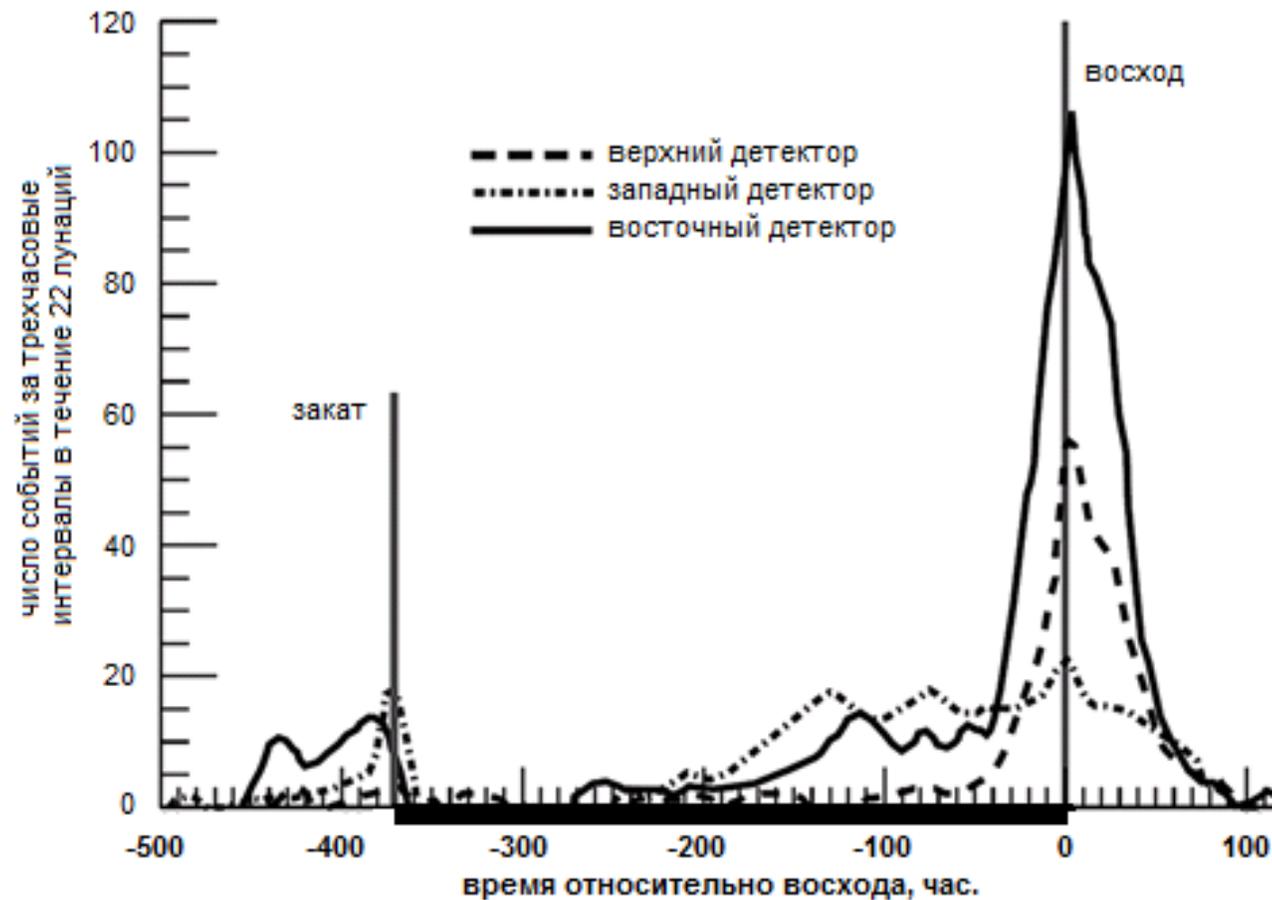


Наброски «пылевых фонтанов» Луны astronautами Аполлона-17 (McCoy and Criswell, 1974)

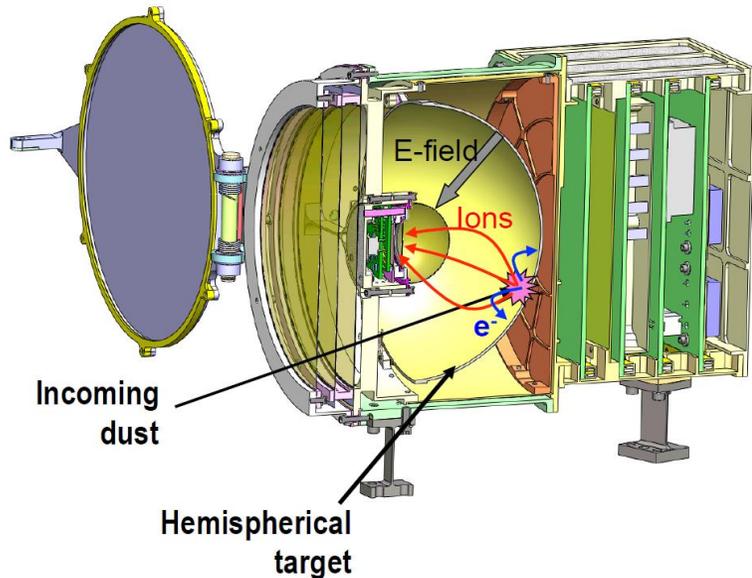
# Регистрация частиц: прибор LEAM (Apollo-17)



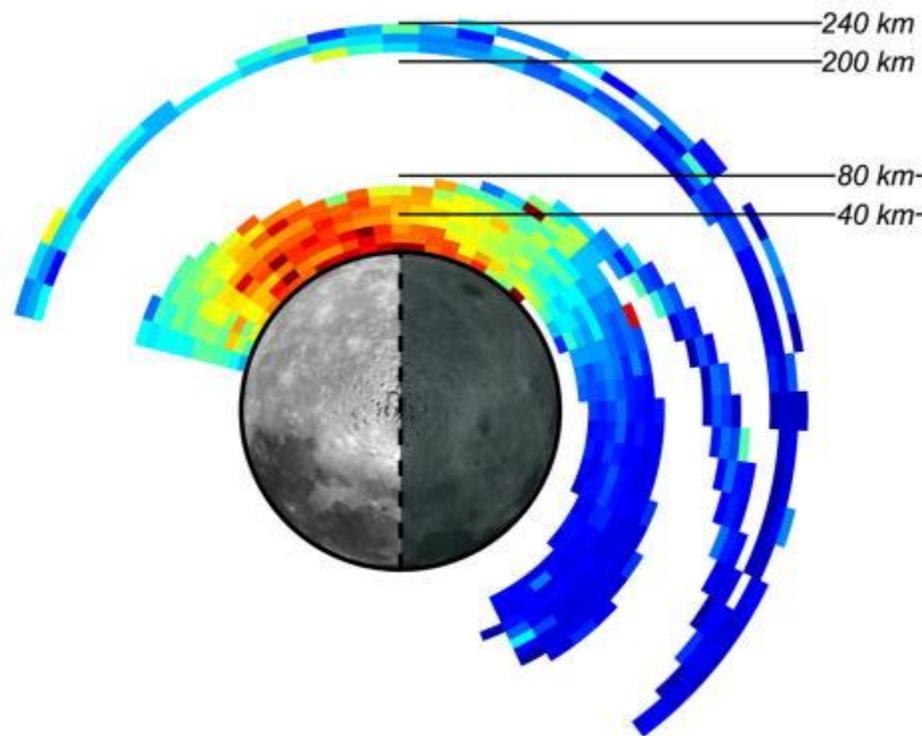
Число регистраций пылевых частиц в трёхчасовом интервале измерений над поверхностью Луны прибором LEAM. Данные проинтегрированы за 22 лунных суток [Berg et al., 1976]. Толстой линией по горизонтальной оси отмечено ночное время.



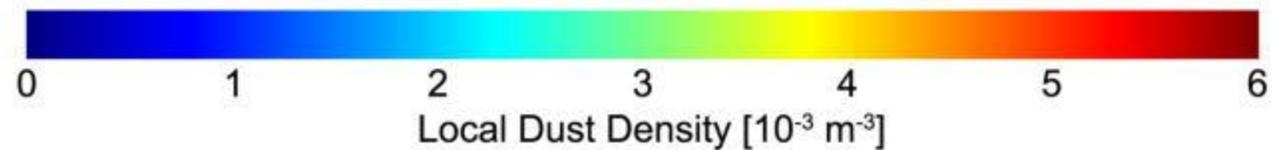
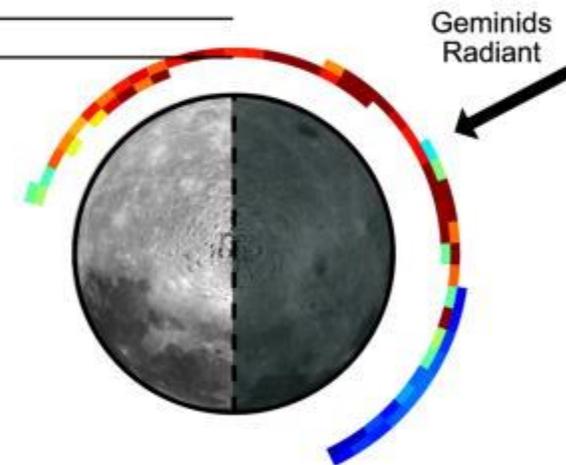
# Регистрация частиц: прибор LDEX (LADEE)



All LDEX Data



Geminids



# Опасность лунного реголита и пыли

- Частицы лунной пыли обладают способностью активно воздействовать на элементы и системы космических аппаратов
- Пылевые микро- и наночастицы
  - проникали в блоки приборов
  - костюмы астронавтов
  - вызывали изменение тепловых режимов аппаратуры (перегрев)
  - изменяли тепловые свойства поверхностей аппаратуры, забивая тепловые радиаторы
  - оседали на солнечных батареях и оптике
  - попадали в двигающиеся узлы механизмов, доставленных на Луну
- Известно, что лунная пыль затрудняла работу робототехнических систем, бурение грунта, и многие другие механизированные работы.

Table II.—Apollo dust problems (concluded)

Hazard	Mission	Specific	Mission Report Page	Debrief Page
	Apollo 15	Smelled like gunpowder when first came in from EVA		10-22
	Apollo 15	Particulate matter floated around spacecraft		13-8
	Apollo 16	Dust in the LM in between EVAs, and in the CM after docking, also in eyes		12-11, 13-3, 13-5, 27-36
	Apollo 17	Kept helmet on to keep inhalation irritation down, still short term irritation		13-1, 19-10, 27-47
Radiators Degraded	Apollo 12	Temperatures measured were approximately 68 °F higher than expected	3-16	
	Apollo 15	LRV batteries ran 68 to 78 °F high because dust accumulation on radiators	94	
	Apollo 16	Instrument performance degraded by overheating due to dust on radiators	4-10, 4-19	
	Apollo 16	Dust on Lunar Rover battery mirrors caused overheating	9-42	10-64
	Apollo 17	Instrument shut down when terminator passing to mitigate dust collection	15-29	
Instruments Fooled	Apollo 12	Velocity trackers lock up on moving dust, debris during descent	8-3	
	Apollo 15	Landing radar outputs were affected by moving dust and debris.	72	
	Apollo 17	No lock-up on moving dust or debris near the lunar surface.	8-2	
Seals Failed	Apollo 12	Higher than normal suit pressure decay due to dust in fittings	8-21, 9-21	10-54
	Apollo 12	Environmental sample and gas sample seals failed because of dust	9-14, 9-19	
	Apollo 14	Measurable leaking of suits	10-65	
Dust Abraded	Apollo 12	Outer material worn through the outer suit layer in several spots.	9-21	10-54
	Apollo 16	Gauge dials scratched so unreadable	9-37	21-4
	Apollo 17	Sunshade on faceplate too scratched to see well	9-5	27-45
	Apollo 17	Cover gloves heavily abraded	9-5	

[«The Effects of Lunar Dust on EVA Systems During the Apollo Missions», James R. Gaier, 2005]

# Эксперименты

- **Микрометеоритная бомбардировка**
  - Построение систем калибровки научной аппаратуры
  - Влияние на материалы, риск загрязнения и повреждения
  - Отработка методов регистрации пылевых частиц
- **Левитация частиц в электрическом поле**
  - Исследование и понимание динамики плазменно-пылевой экзосферы безатмосферных тел, включая динамику пылевой компоненты
  - Исследование влияния плазменно-пылевых структур на материалы и приборы
  - Изучение риска загрязнения пылевыми частицами
- **Оптическая регистрация траекторий частиц**
- **Потоки частиц в аэродинамической трубе**
  - Система калибровки приборов/Измерение потоков пылевых частиц

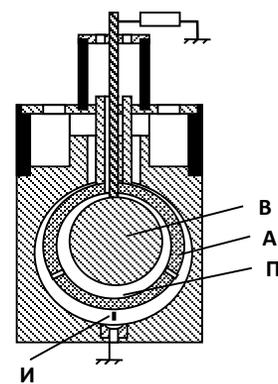
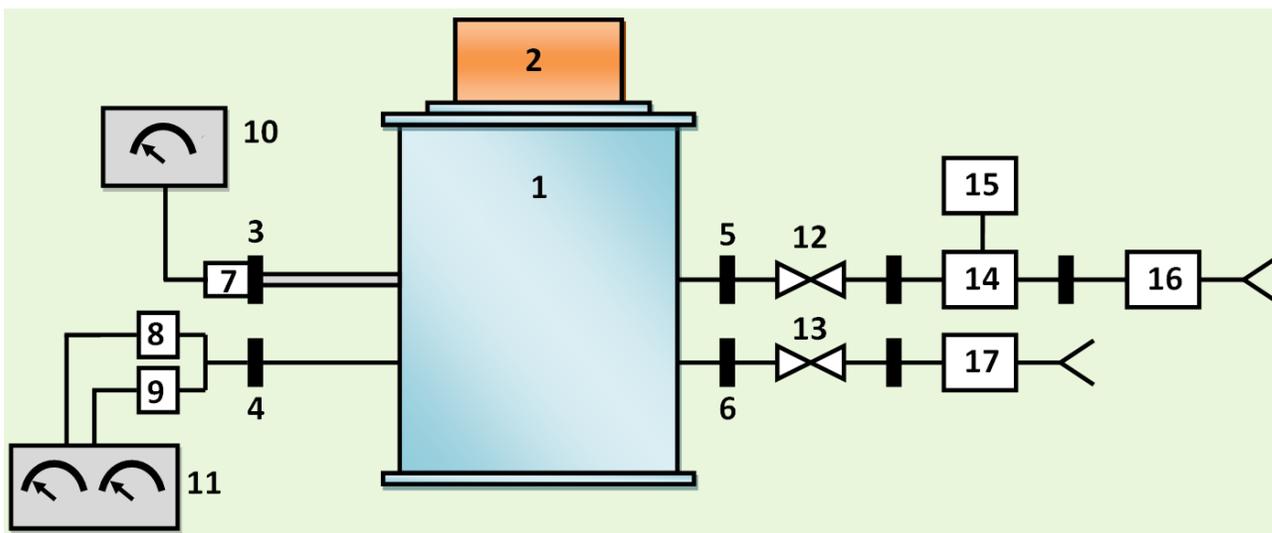
# Микрометеоритная бомбардировка

## Схема эксперимента:

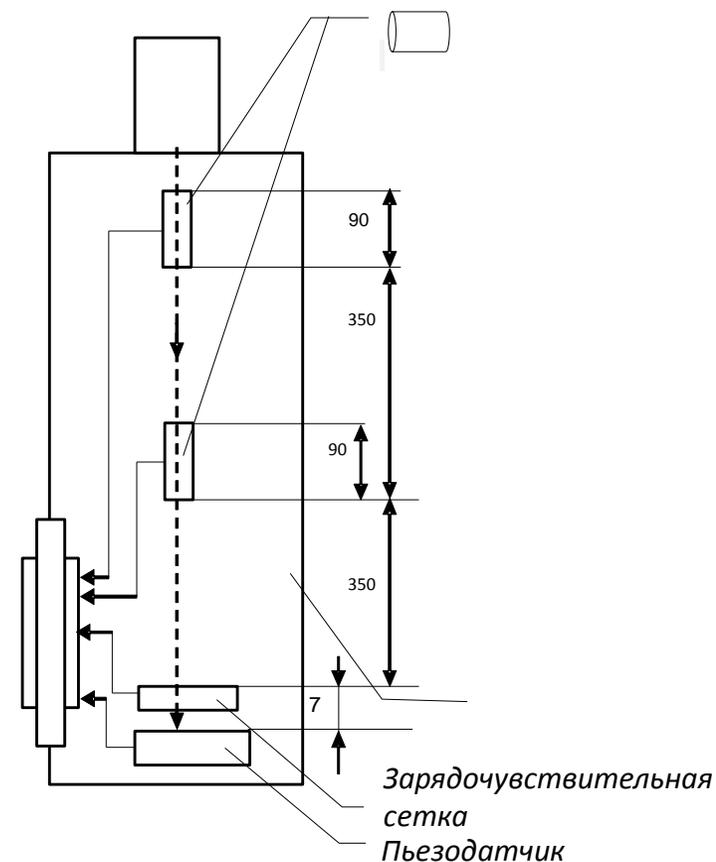
- 1 – Вакуумная камера MSH D400 H600KR;
- 2 – Инжектор заряженных пылевых частиц;
- 3-6 – вакуумная арматура;
- 7, 8 – ПМТ-2 (термопарный датчик давления);
- 9 – ПМИ-2 (ионизационный датчик давления);
- 10 – вакуумметр АВ 3401;
- 11 – вакуумметр ВИТ – 2;
- 12 – впускной клапан;
- 13 – выпускной клапан;
- 14, 15 – турбомолекулярный насос BALZERS THP050 с системой управления TCP121;
- 16 – форвакуумный насос PDV 500 GB;
- 17 - фильтр

## Схема инжектора:

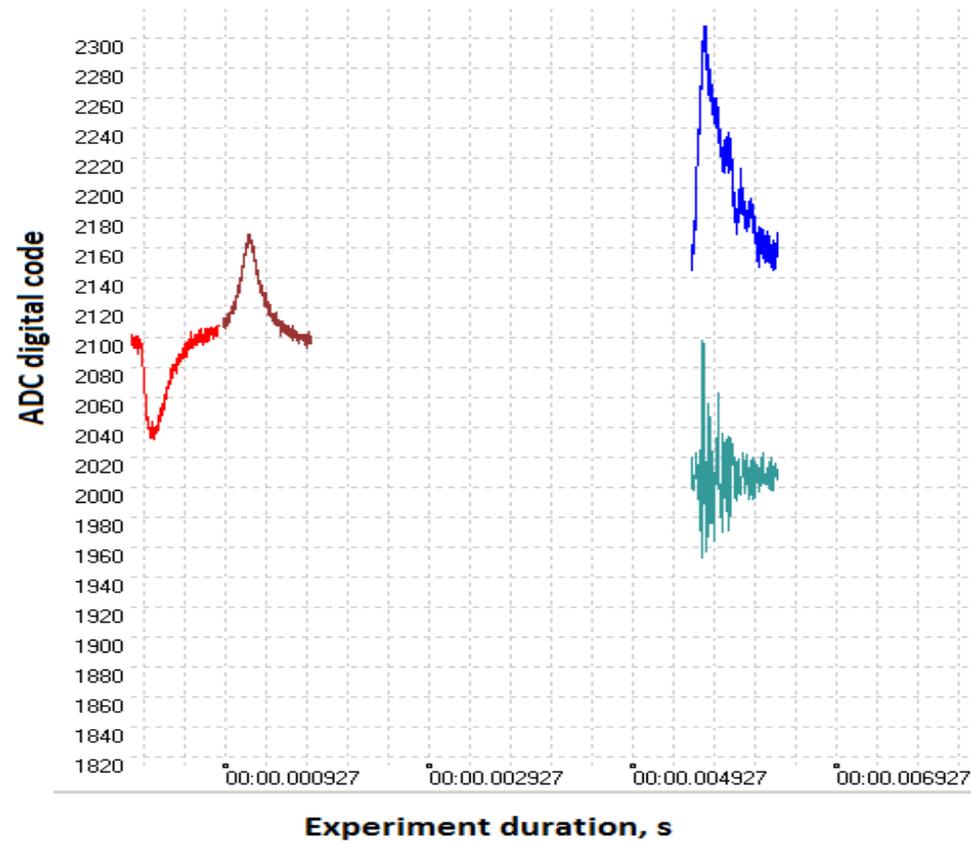
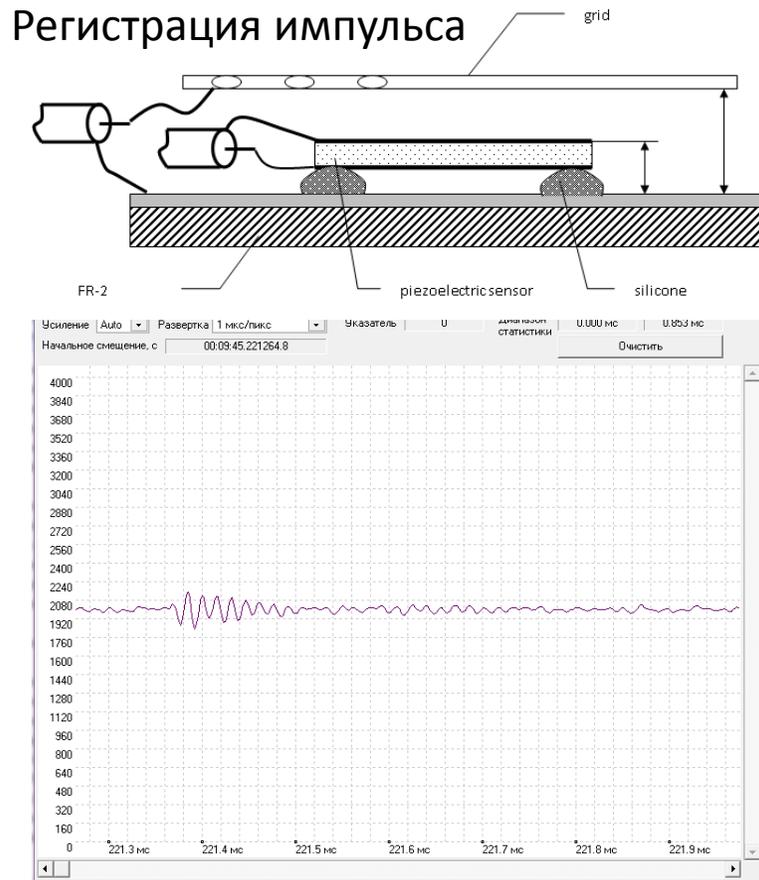
- П – емкость для инжектируемого вещества;
- И – инжекционное отверстие;
- А – внешняя сфера, 0 В;
- В – шар под напряжением



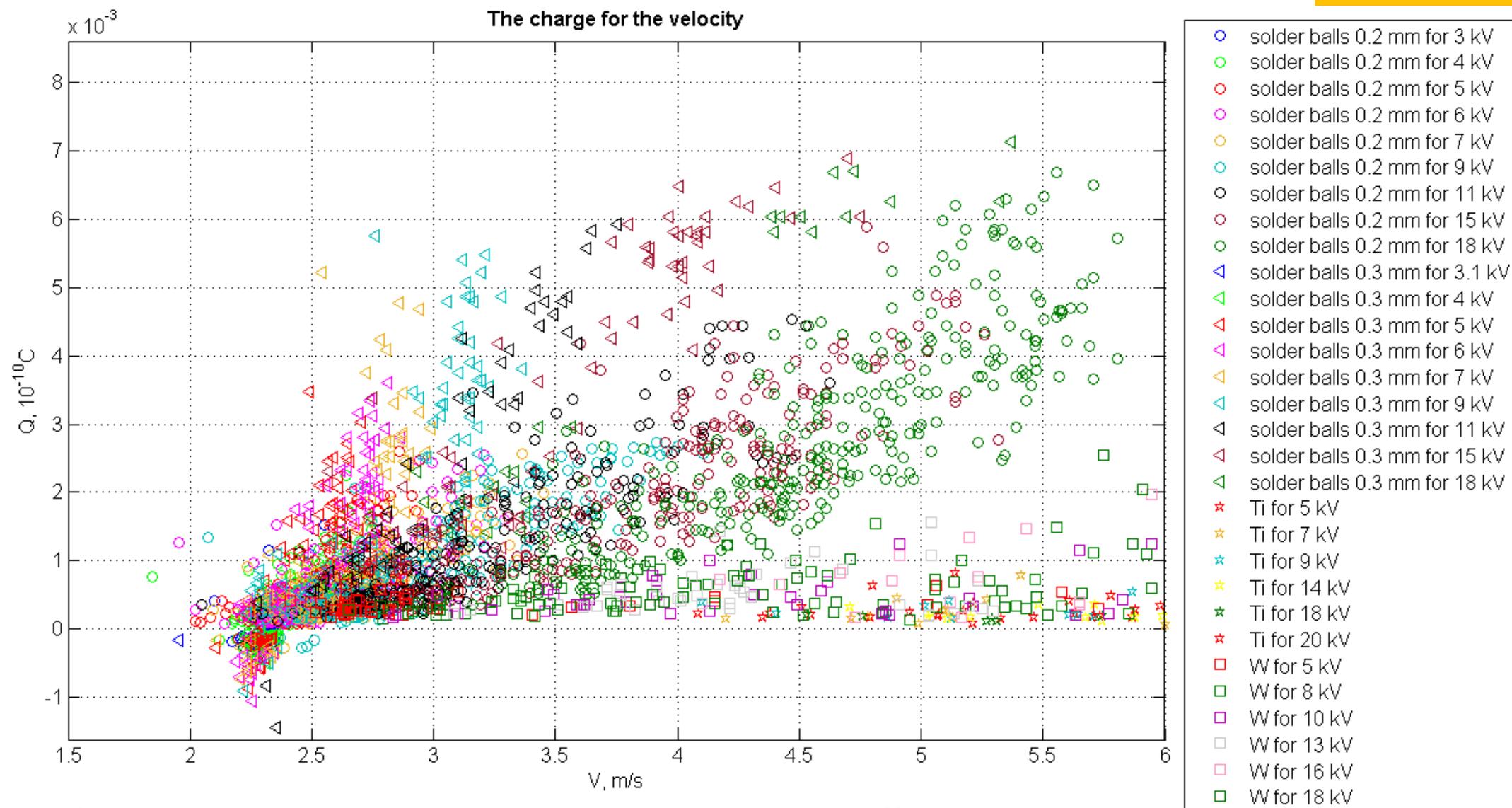
## Зарядочувствительный пролетный датчик



# Микрометеоритная бомбардировка

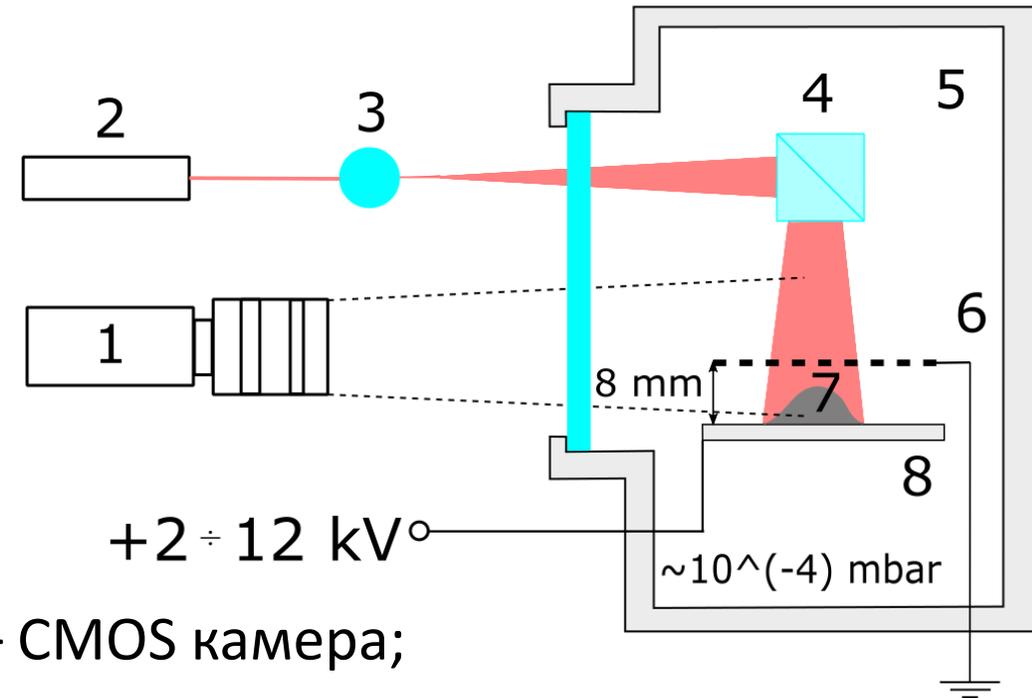
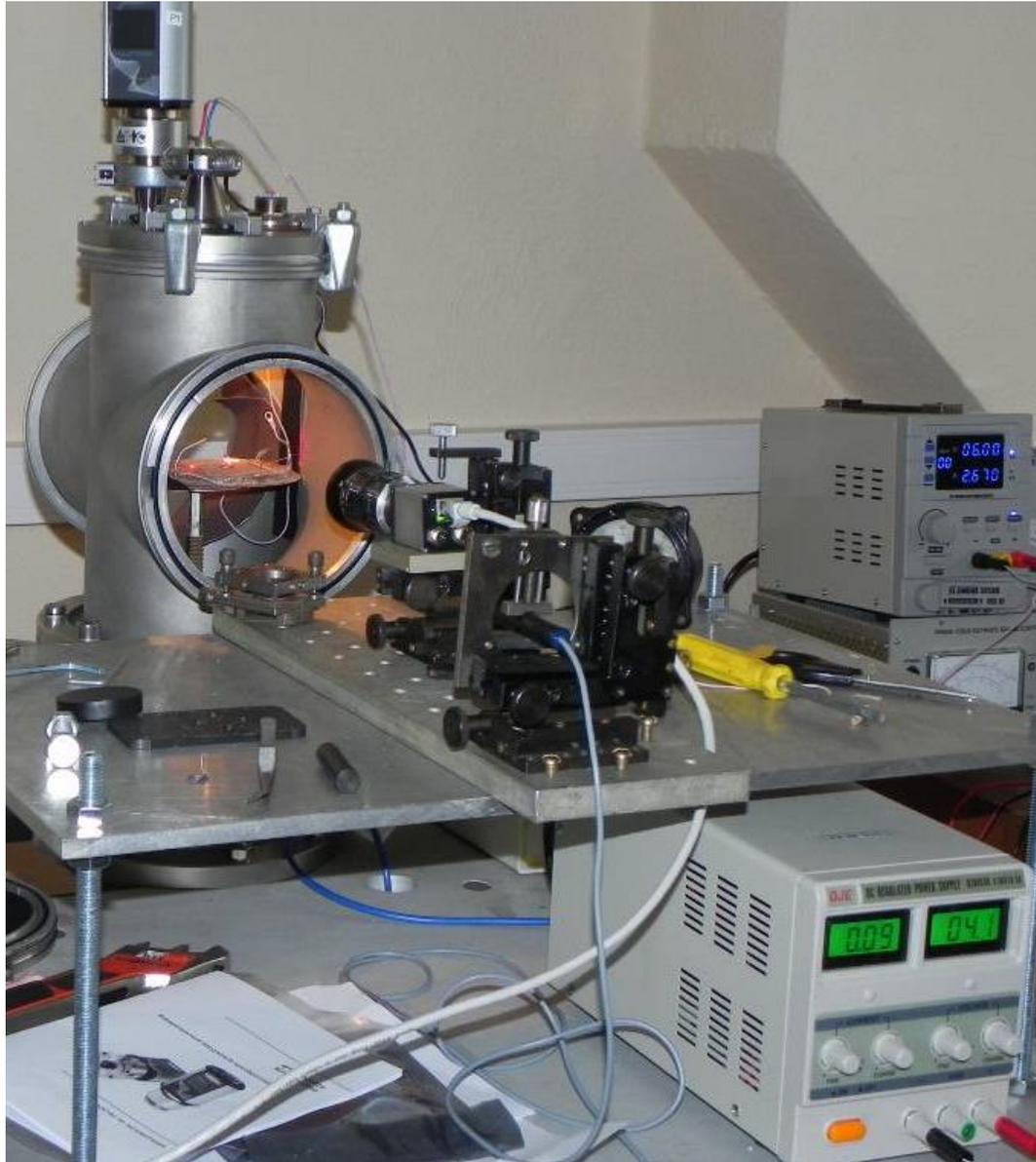


Давление, мм рт. ст.	Масса, кг	Размер частиц, мкм	Проводимость частиц	Скорость частиц, м/с	Импульс, Н·с	Заряд, e <sup>-</sup>
< 10 <sup>-3</sup>	>10 <sup>-12</sup>	1 – 400	Проводящие, < 10 <sup>-6</sup> Ом	2 – 100	10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-8</sup>	>1000

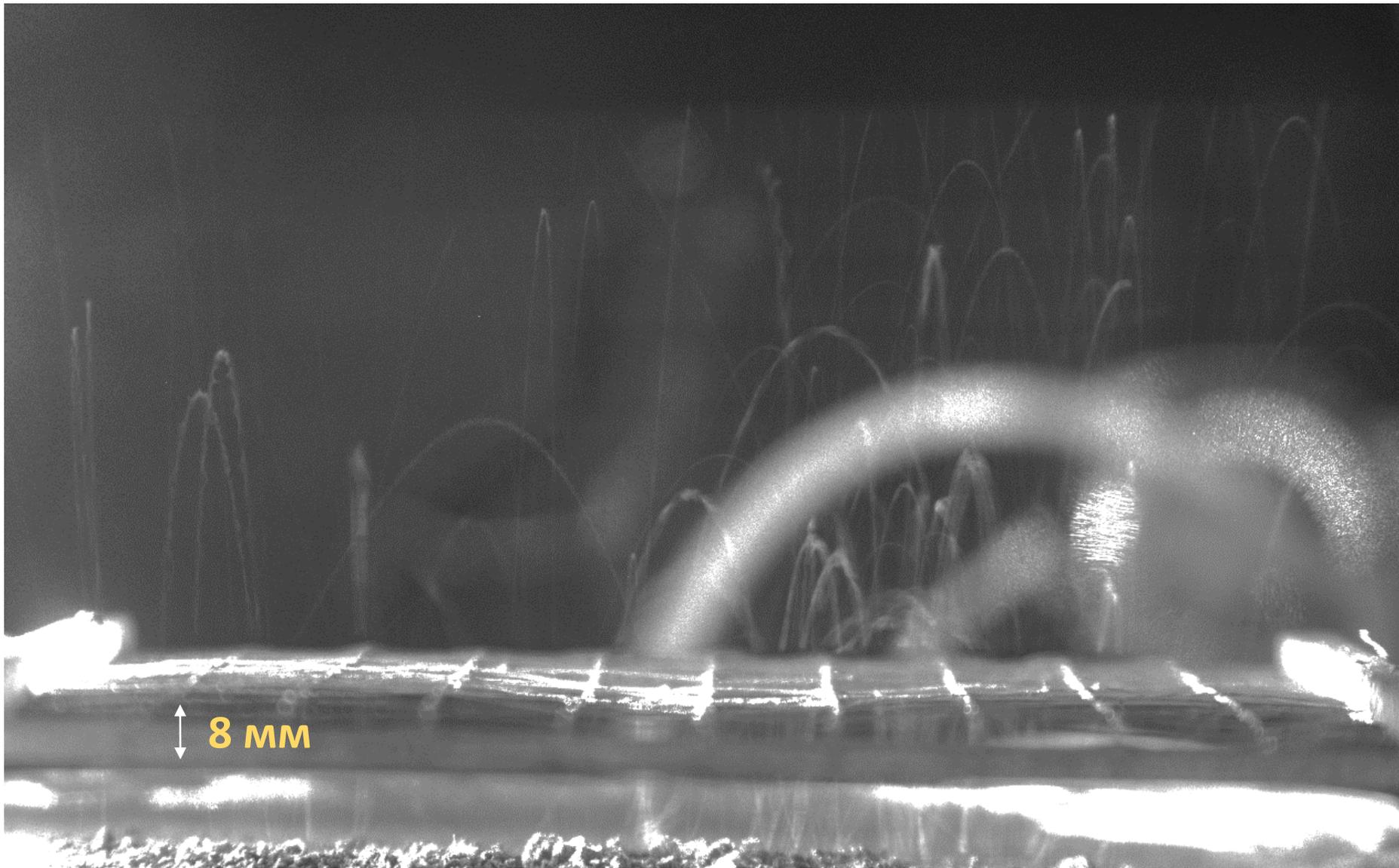


**Наблюдаемые значения зарядов и скоростей частиц в потоке, создаваемом инжектором вакуумной установки для различных значений напряжения инжектора**

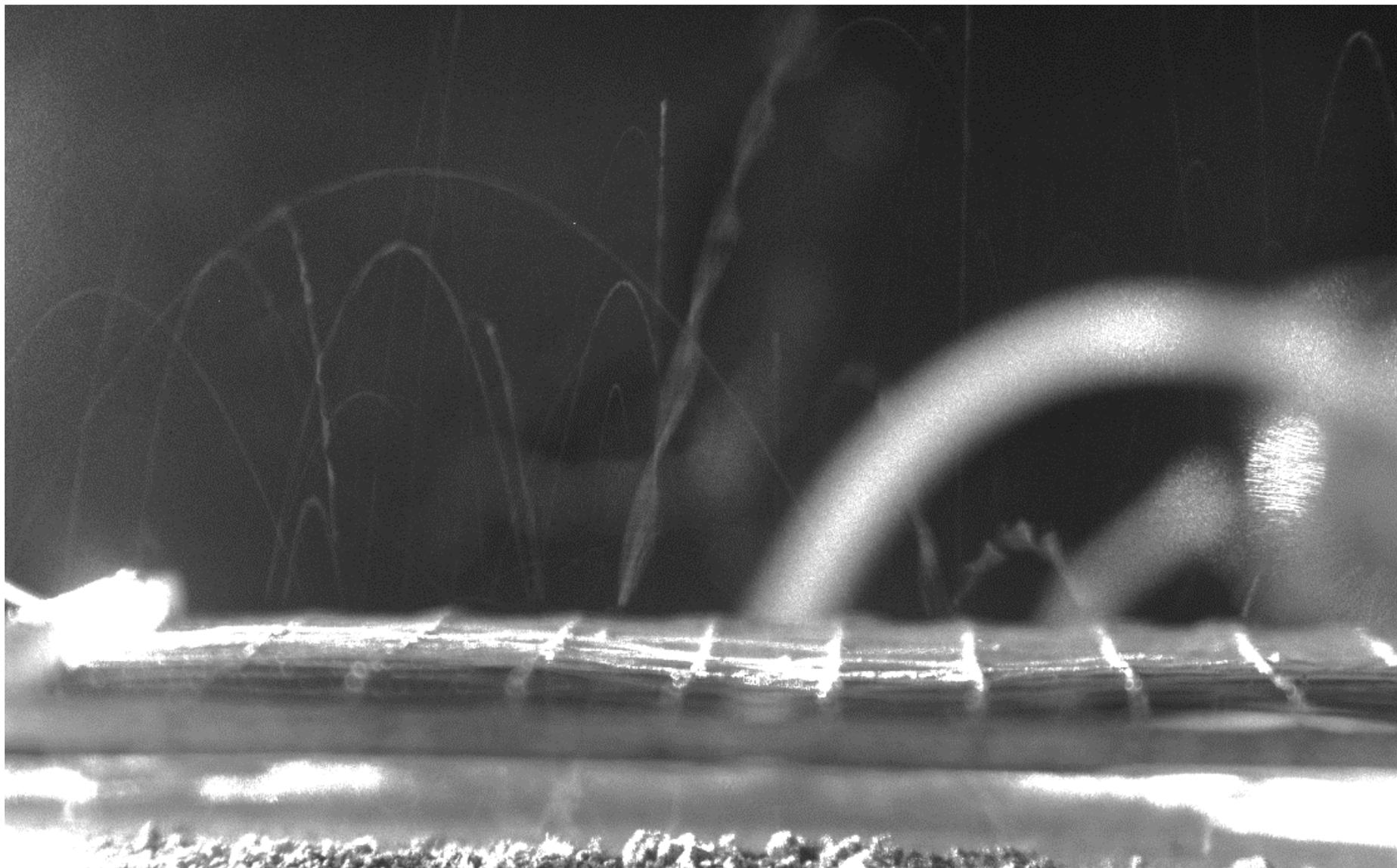
# Левитация частиц в электрическом поле



- 1 – CMOS камера;
- 2 – лазер;
- 3,4 – оптическая система для выведения лазерной плоскости и подсветки частиц;
- 5 – вакуумная камера;
- 6 – сетка;
- 7 – частицы пыли (1 мкм, Fe; 40÷100 мкм, SiO<sub>2</sub>);
- 8 – проводящая подложка



**Изображение взлетевших частиц  $\text{SiO}_2$  (40 – 100 мкм), 5 кВ - > 625 кВ/м**



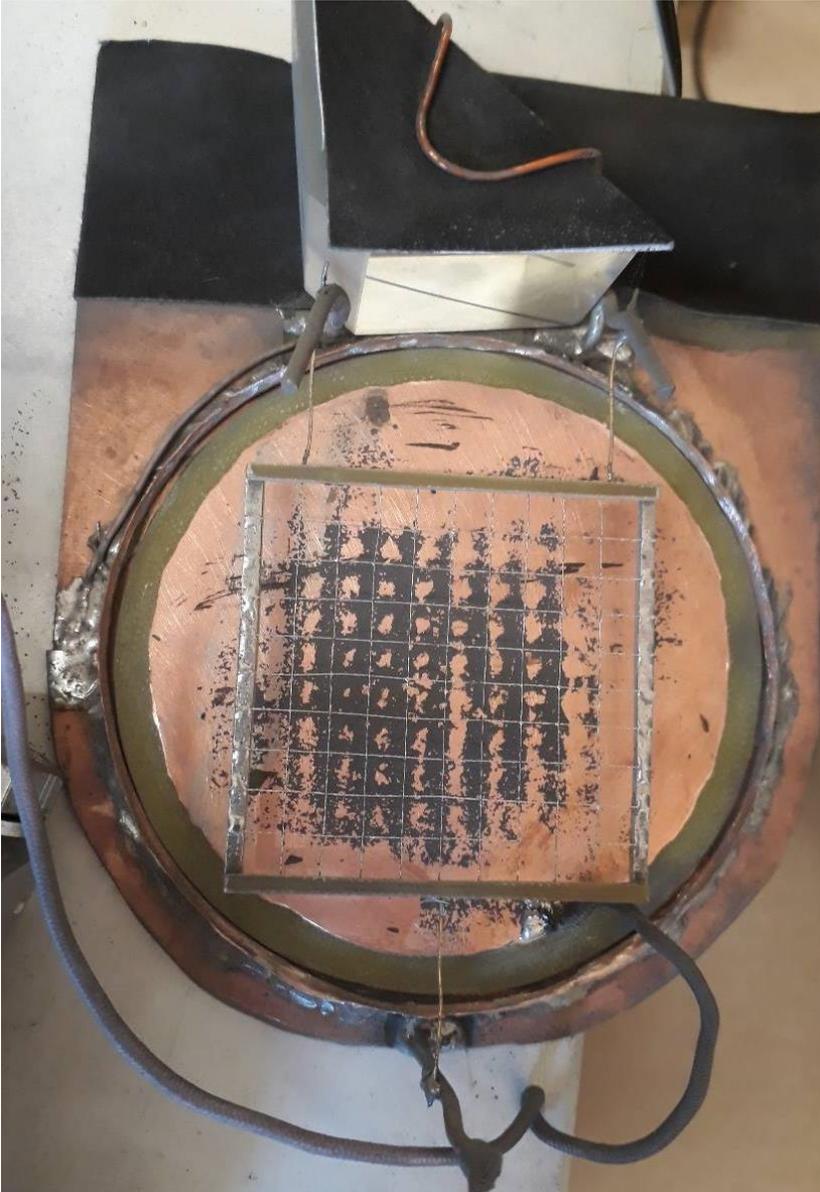
**6 кВ - > 750 кВ/м**

**Распределение материала в течение эксперимента (1 мкм, Fe), ~1 час**

до

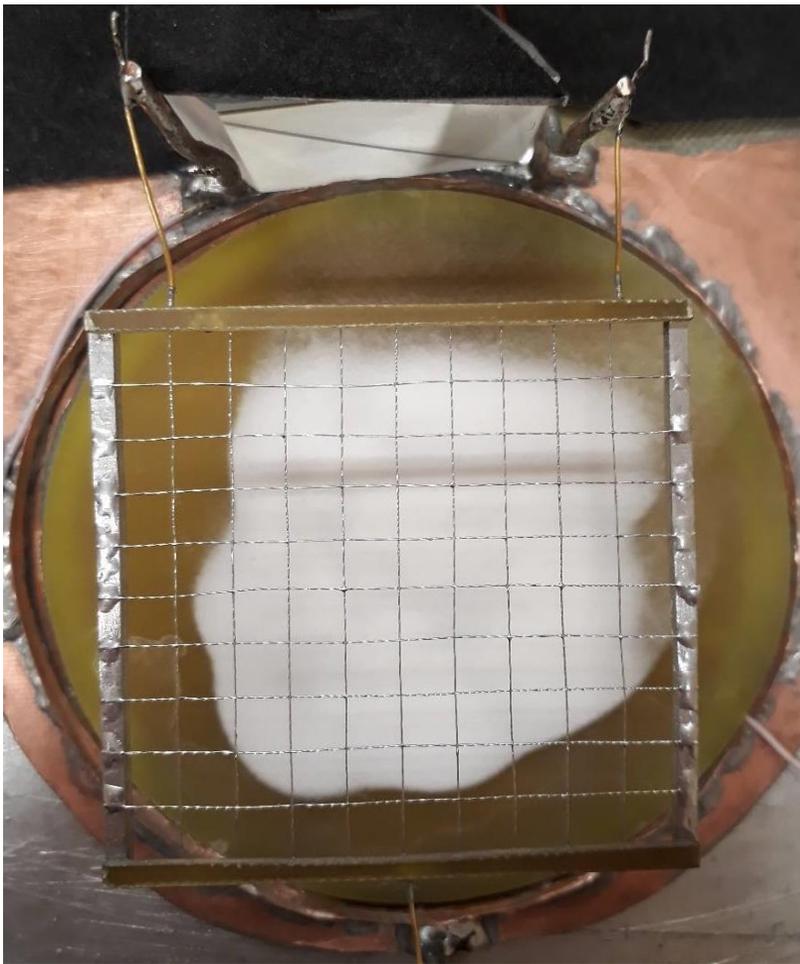


после

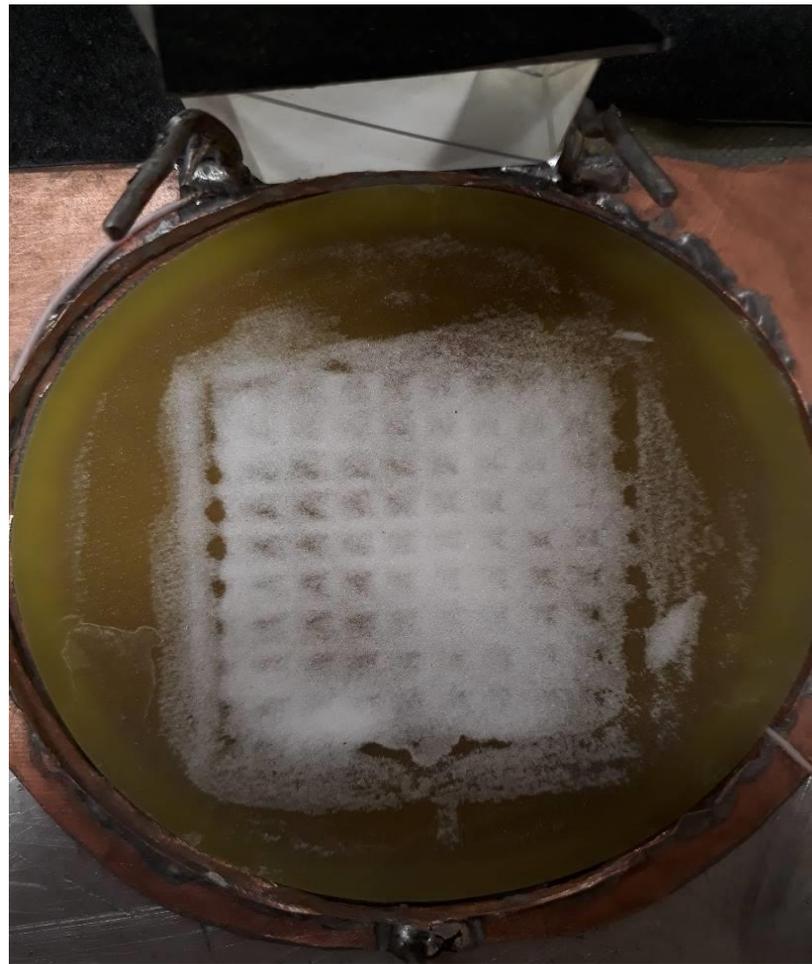


# Распределение частиц пыли на подложке до и после левитации, $40\div 100\ \mu\text{m}$ , $\text{SiO}_2$

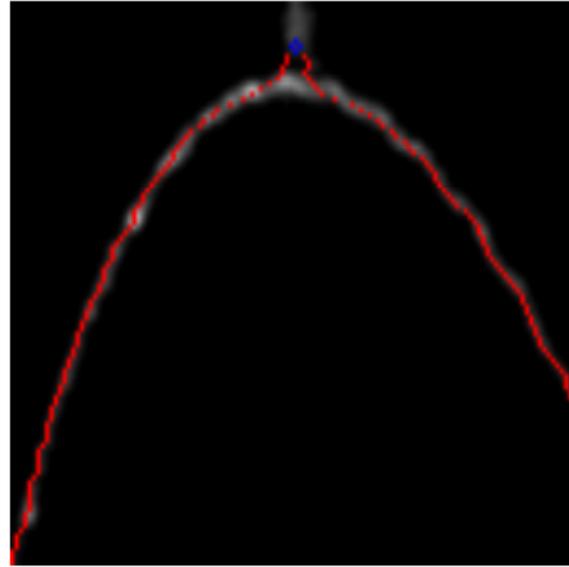
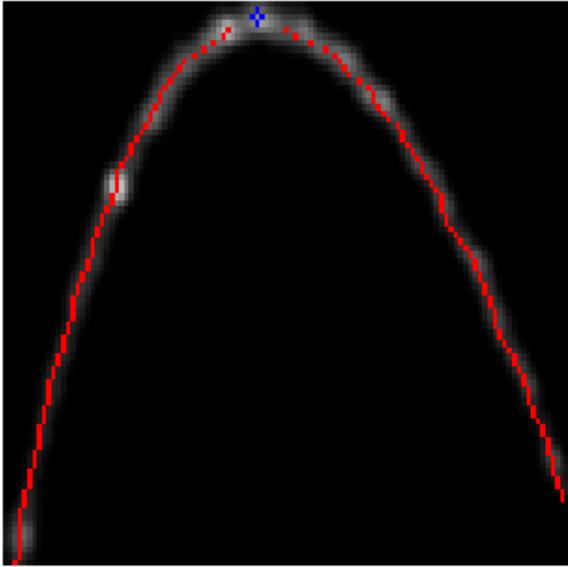
до



после



$40\div 100\ \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$



## Обработка:

Максимум корреляционной функции  
0.475

Рассчитанное смещение (265, 0) пкс

Длина трека 10.3548 мм

Параметры параболы  $a=0.6867$   $b=-$   
 $22.8277$   $c=187.5943$  невязка 1.79774

Скорость  $V_y$  0.6123 м/с

Скорость  $V_x$  0.0845 м/с

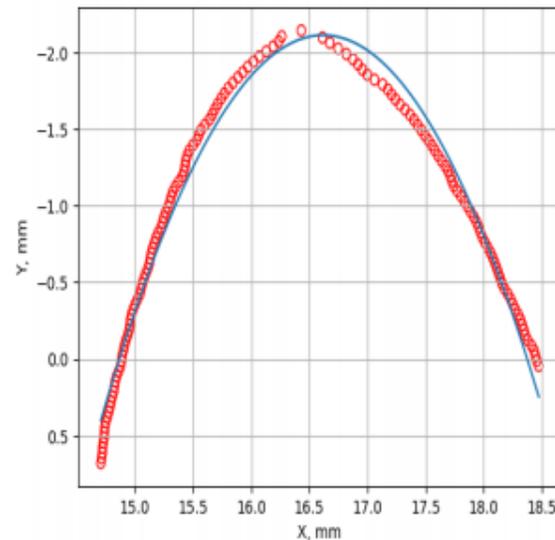
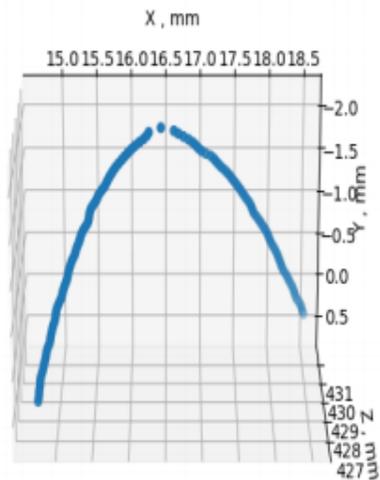
Скорость  $V$  0.6181 м/с

Угол взлета 82.14 градусов

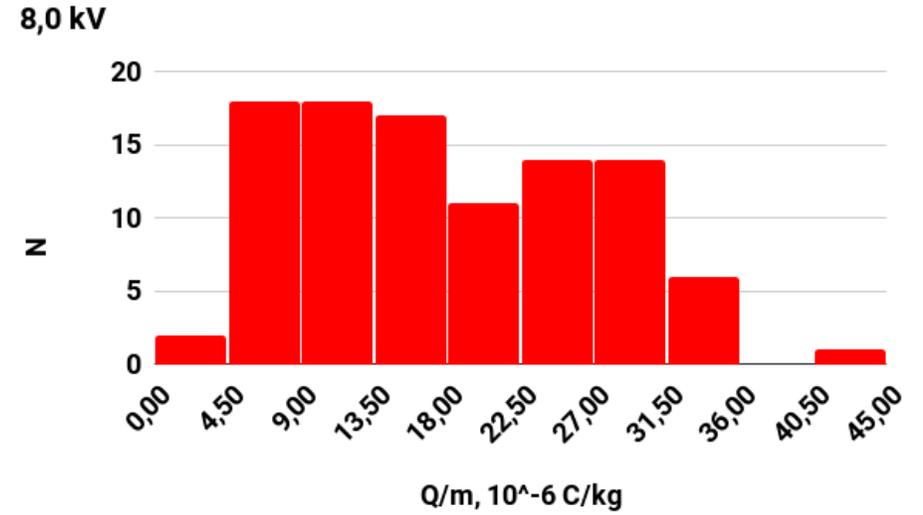
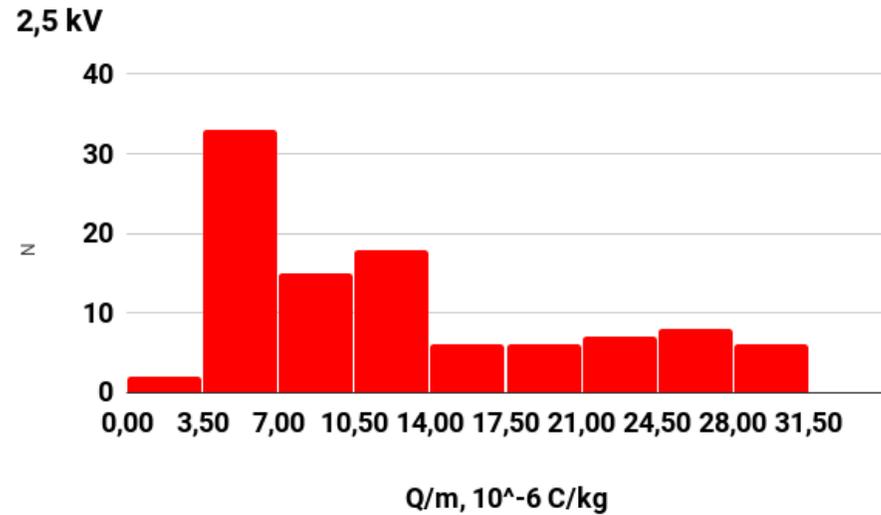
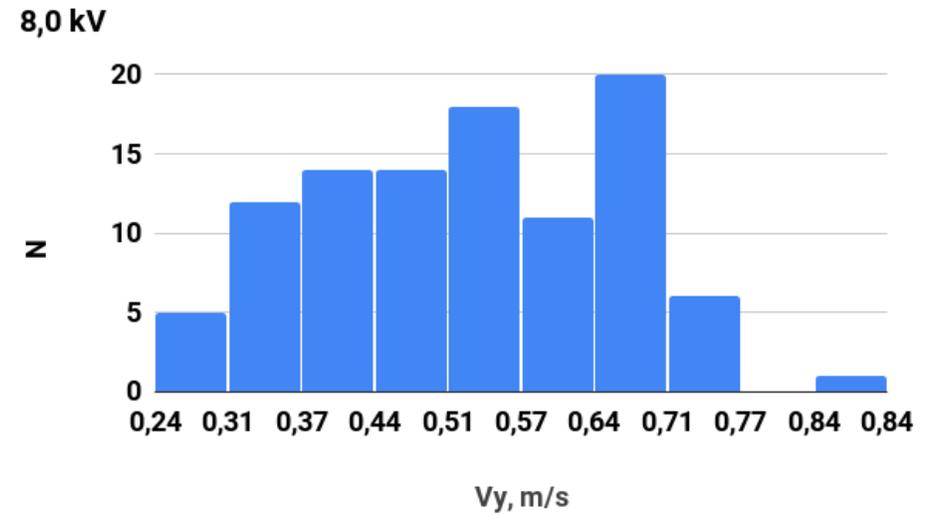
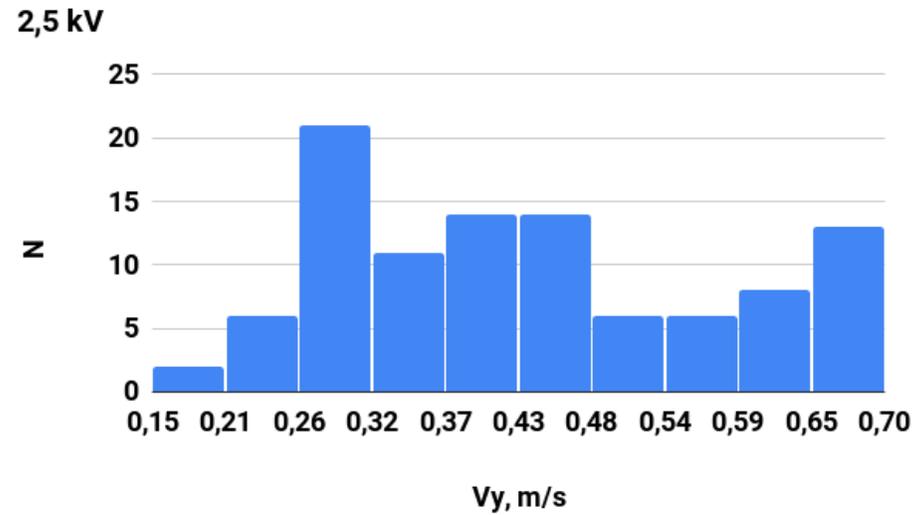
Радиус частицы  $5.000000E-05$  м

Масса частицы  $2.8798E-10$  кг

Заряд частицы  $2.7757E-14$  Кл

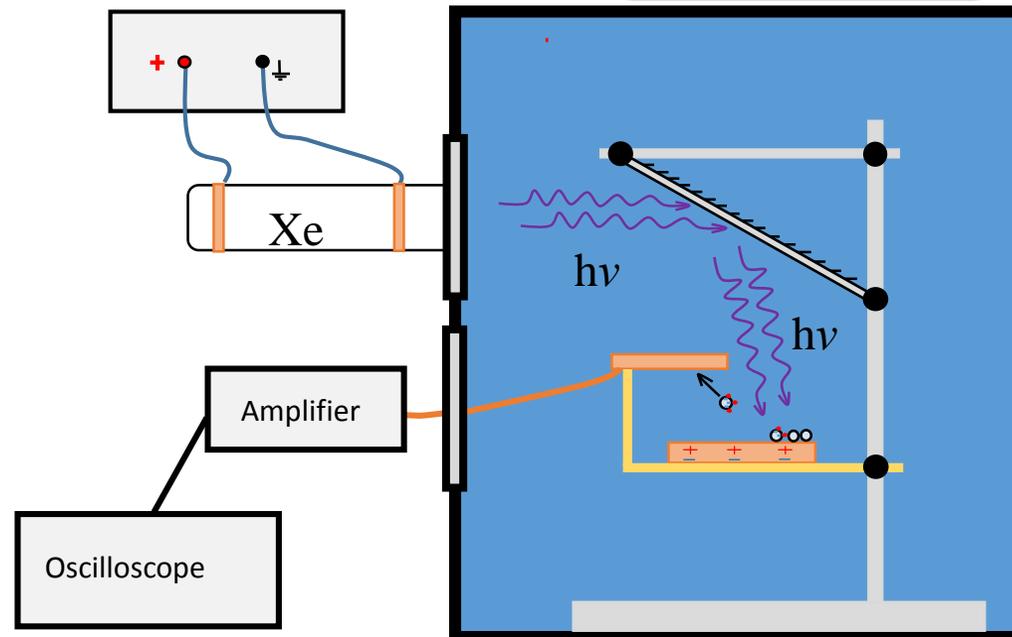
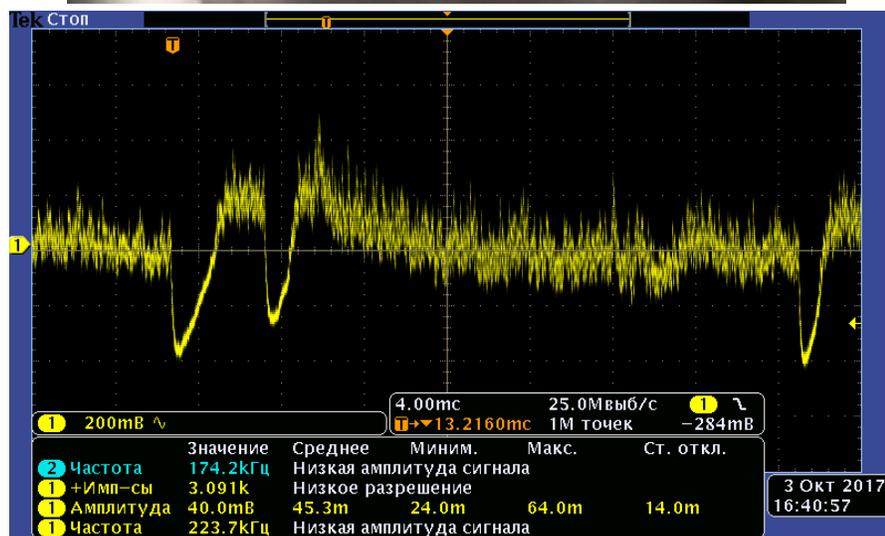
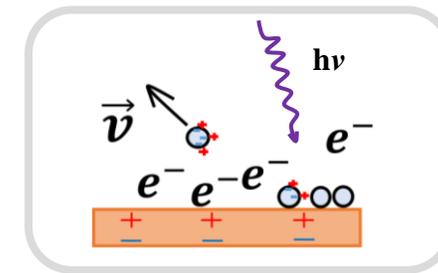
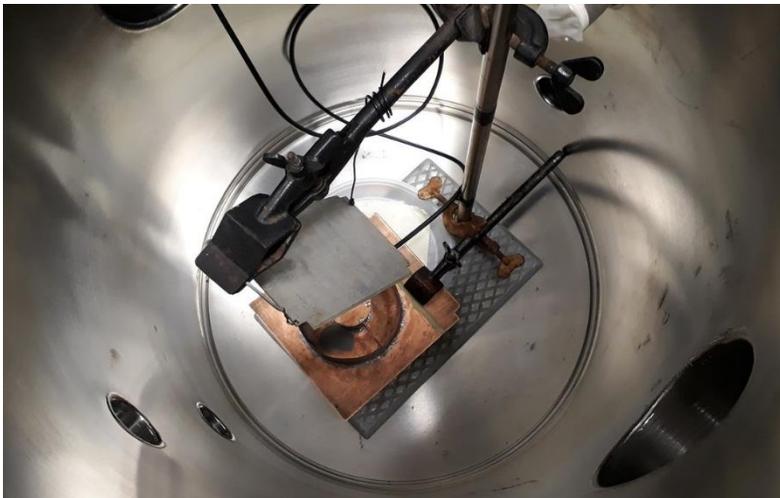
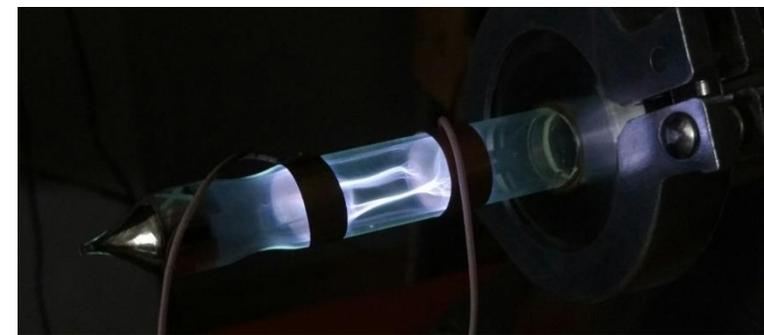


# Распределение зарядов и скоростей частиц (40÷100 мкм, SiO<sub>2</sub>)

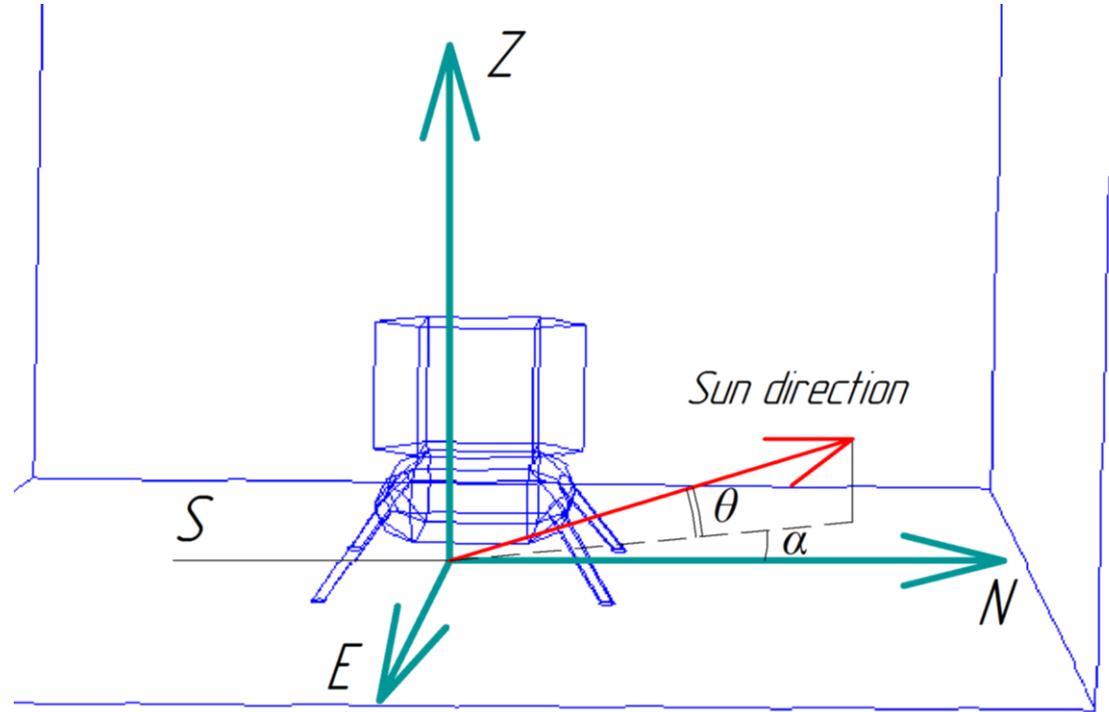
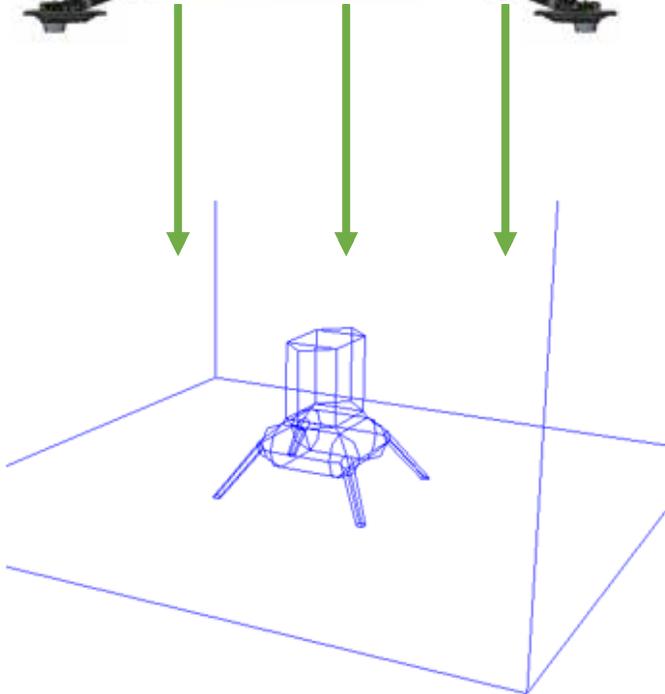
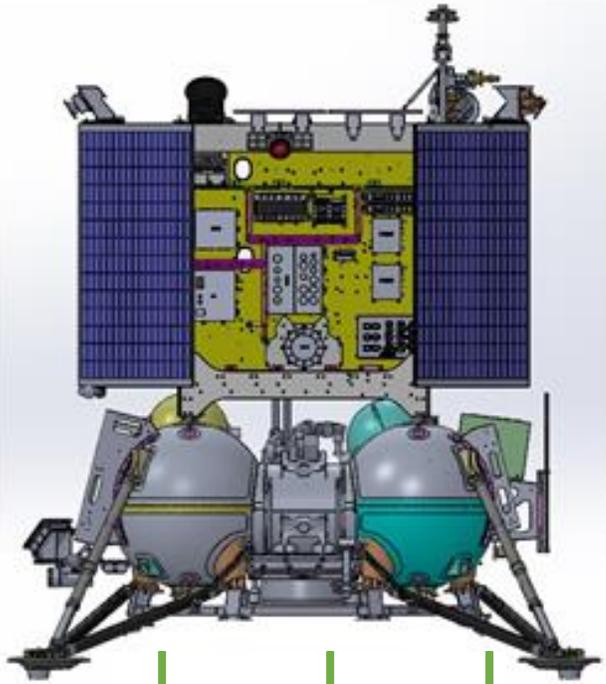


# Воздействие UV

Идея – воссоздать в лабораторных условиях взаимодействие частиц с УФ-излучением. Предполагается, что частицы будут приобретать заряд и преодолевать таким образом силы гравитации и адгезии.



# Численное моделирование в среде SPIS-Dust



Область численного моделирования – 10x10x60 м

Ситуация	$\alpha$	$\theta$
Полдень	0°	22°
Вечер	45°	11°
Закат	90°	1°

# УСЛОВИЯ

ПЛАЗМЕННАЯ ОБСТАНОВКА		
Ионная концентрация, $n_i$	$\text{cm}^{-3}$	10
Электронная концентрация, $n_e$	$\text{cm}^{-3}$	10
Скорость ионов СВ, $V_i$	$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	430
Скорость электронов СВ, $V_e$	$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	430
Температура ионов СВ, $T_i$	eV	10
Температура электронов СВ, $T_e$	eV	10
Фотоэлектронная температура, $T_{ph}$	eV	2

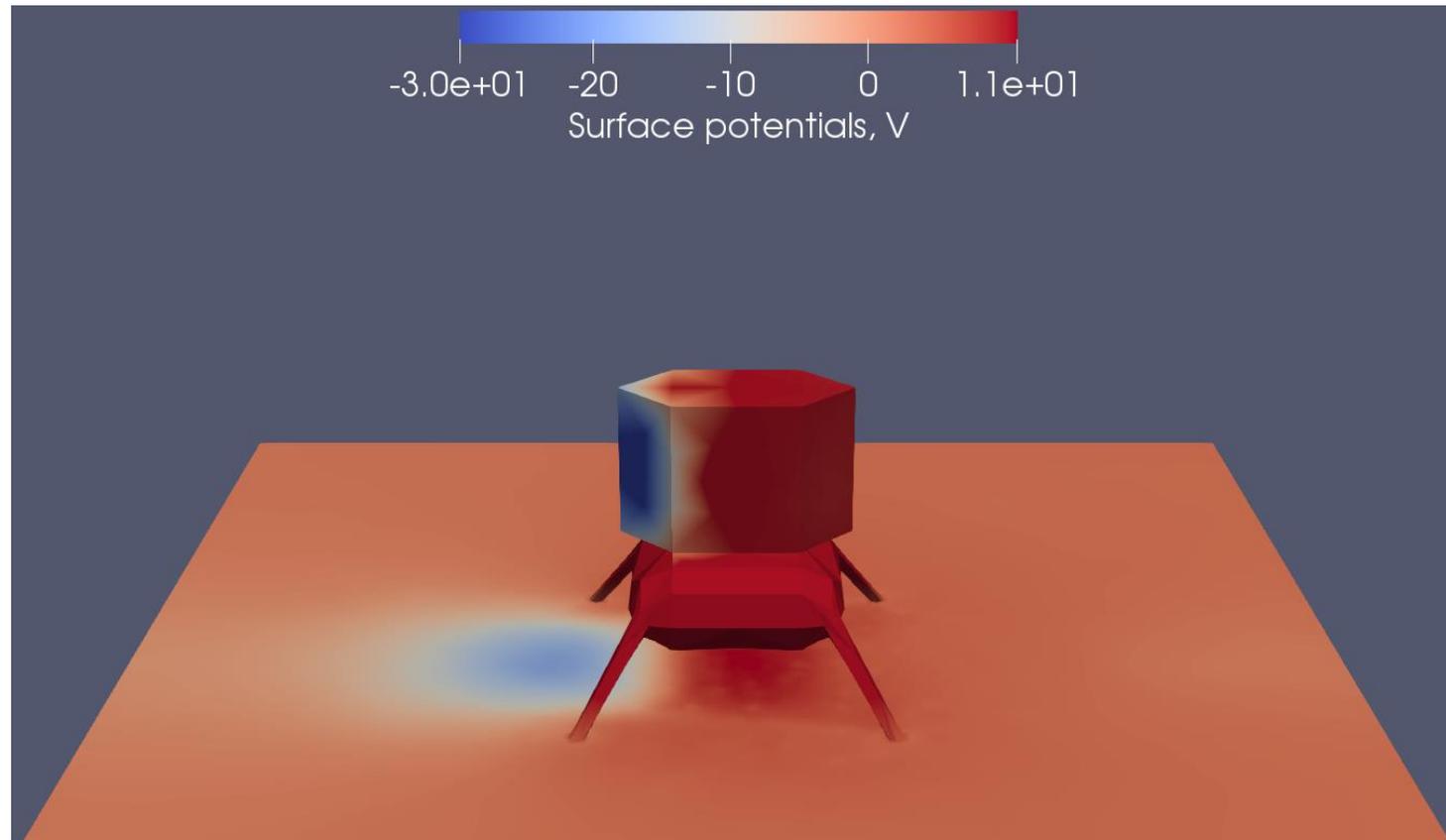
[MRAD “Modelling requirements”, 2013; Feuerbacher et al., 1972]

# Свойства материалов и поверхностей

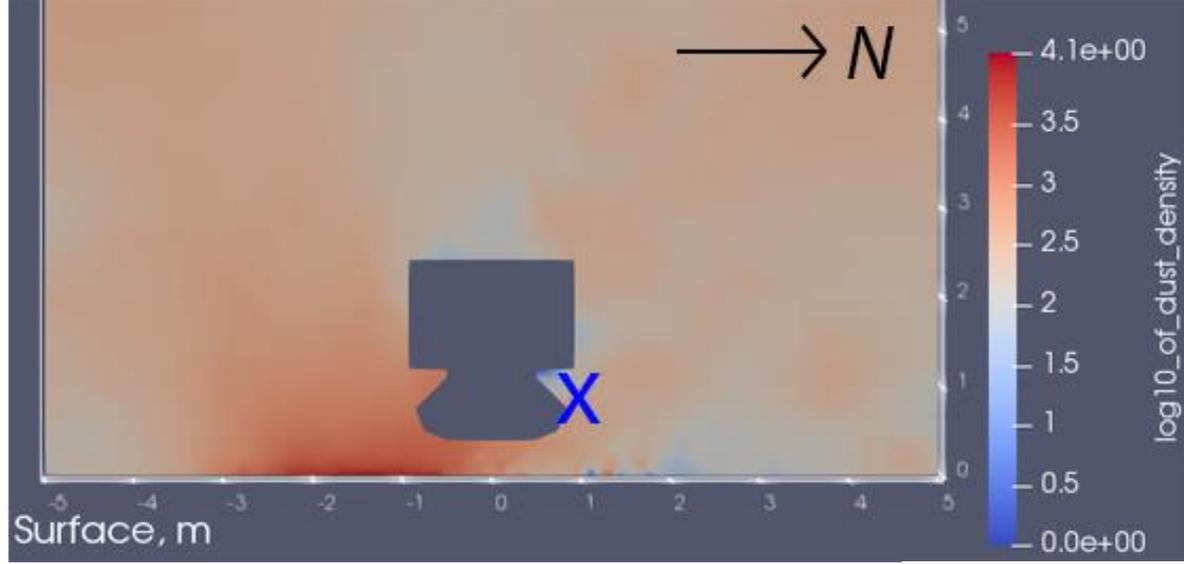
Ситуация	Потенциал поверхности, В	Потенциал северной солнечной панели, В	Температура лунной поверхности, К
Полдень	0	0	288
Вечер	0	27	240
Закат	-10	5	130

- Поверхность элементов аппарата подогревается РИТами и РИТЕГами. Проведя численный тепловой расчет, можно предположить, что температура КА будет варьироваться от 200 К (опоры, платформа) до 233 К (солнечные панели, инструменты).
- Плотность лунного реголита составляет  $1500 \text{ кг/м}^3$  [D.A. Kring, 2006]; плотность же материала пылевых частиц принимается за  $3000 \text{ кг/м}^3$ . Распределение частиц по размерам берется на основании исследований образцов 71501,1 Mare (Миссия Аполлон 17).
- Предполагается, что поверхность КА – эквипотенциальная поверхность из оксида алюминия и позолоченной ЭВТИ (теплозащиты), за исключением солнечных панелей, собранных из легированного цезием кремниевого стекла. Изначальный потенциал СП – 0 В для южной и +20 В для северной.
- Моделируется процесс восхода Солнца в отсутствии хвоста земной магнитосферы и при условии отсутствия локальных магнитных аномалий. В этом случае можно допустить, что весь поток СВ достигает КА.

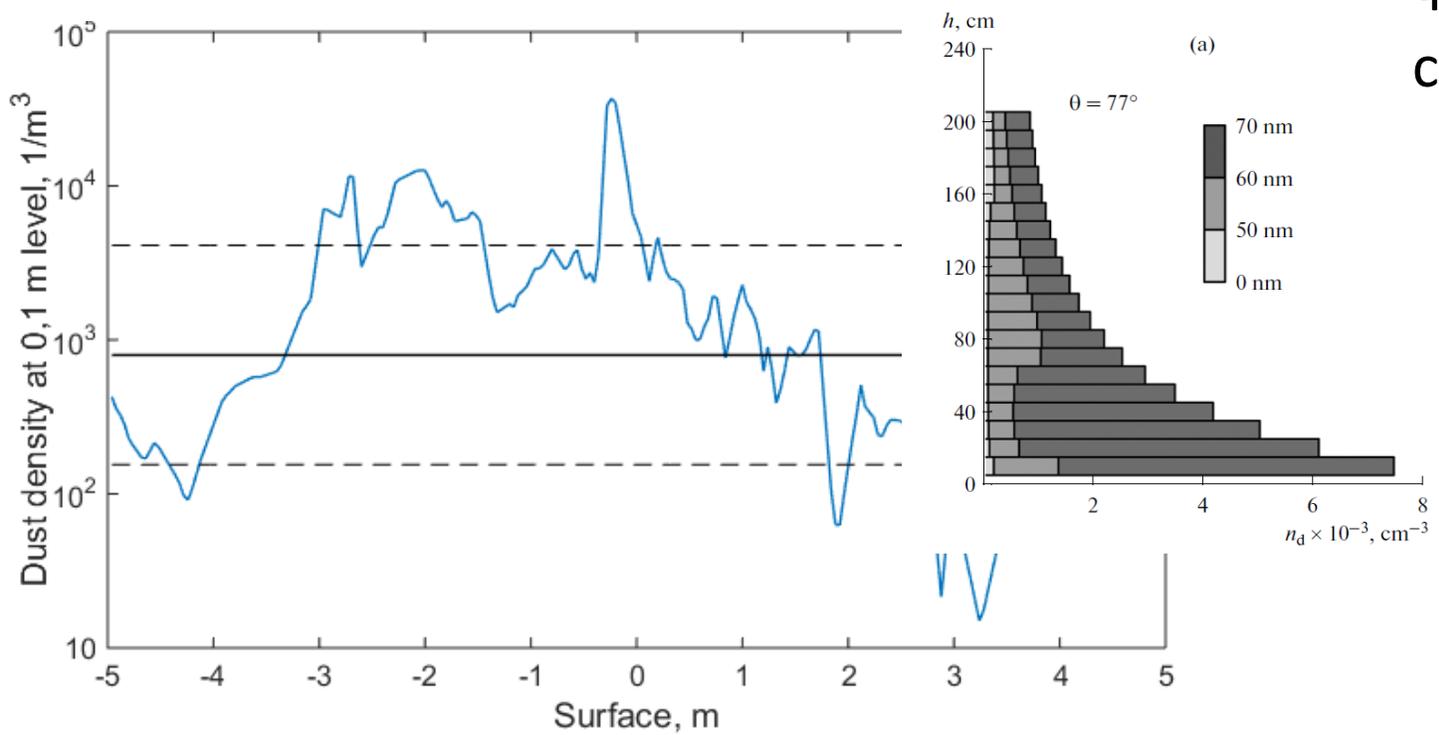
# Результаты: потенциал плазмы, «полдень»



Потенциал поверхностей Луны и КА по  
результатам моделирования



Концентрация пылевых частиц на высоте 10 см в случае «полдня» по результатам численного моделирования (синий) и среднее значение  $7.9 \cdot 10^2 \text{ м}^{-3}$  (черный).  
 [Kuznetsov et al., 2018]



Результат соответствует теоретическим моделям [S.I. Popel et al., 2013], где значения концентрации находятся в пределах  $4.5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$  до  $7.5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$  вблизи поверхности Луны (от 0 до 10 см) в зависимости от широты (от  $77^\circ$  до  $87^\circ$ ).

Спасибо!