

# Физическая аппаратура

УДК 539.1:621.039

## Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождений

Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, А. В. Пияков, И. В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева,  
г. Самара, Россия

*Рассмотрены различные модели метеорного окружения и космического мусора. Дан прогноз метеорной активности на ближайшую пятилетку. Проанализированы методы и средства регистрации и измерения физико-технических характеристик микрометеоритных и техногенных частиц.*

PACS: 07.50.-e

### Введение

Возрастающая активность в космическом пространстве многих стран и консорциумов приводит к его интенсивному загрязнению фрагментами ракетно-космической техники и появлению нового класса – техногенных пылевых частиц. По оценкам американских ученых общая масса объектов искусственного происхождения (космического мусора) на околоземных орбитах превысила 3 тыс. т.

По результатам многочисленных исследований [1, 2] на высотах от 300 до 1600 км наблюдается наиболее высокая их концентрация, по уровню уже значительно превосходящая плотность потока частиц естественного метеороидного фона (рис. 1). Поэтому исследование твердой составляющей межпланетной среды и ее взаимодействия с атмосферой Земли, различными телами солнечной системы и солнечным излучением имеет важное значение при решении как целого ряда научных задач — астрономических, геофизических, так и прикладных задач: прогнозирование метеорной опасности для космических аппаратов (КА) и воздействие большого числа ударов очень мелких пылинок на незащищенные оптические, светочувствительные и другие поверхности аппаратуры и элементов конструкций. Регистрация ударов метеорных тел с помощью датчиков, установленных на космических аппаратах, позволяет изучать плотность потока очень мелких частиц с массами  $10^{-6}$ — $10^{-15}$  г.

Измерения производятся как вблизи орбиты Земли, так и вдали от нее. Однако информативность метода существенно меньше базисных фотографических и радиолокационных наблюдений метеоров. Оценивается лишь некоторая скалярная функция массы и относительной скорости частиц. Все попытки измерений векторов скорости мете-

орных тел с помощью сложных комбинированных датчиков до сих пор не обеспечили ни требуемой точности, ни массовости таких измерений, что обусловлено низкой абсолютной концентрацией космической пыли в верхней атмосфере и околоземном космическом пространстве (ОКП), наличием множества источников помех (ложных сигналов, загрязнений, различного рода излучений и т. д.) и значительной погрешностью каждого метода.

Наблюдается недостаток в информации, необходимой для достоверной статистической обработки в диапазоне масс микрометеороидных и техногенных частиц, меньших  $10^{-6}$  г, т. е. данных, получаемых прямыми методами в космосе. Проведены уникальные космические эксперименты Stardust [3] по исследованию газопылевого облака кометы “Вилда-2”, непосредственно для сбора кометной пыли и межпланетной пылевой составляющей, а также проводятся эксперименты на космической станции “Альфа”.

Класс пылевых частиц искусственного происхождения — техногенных частиц появился сравнительно недавно как побочный продукт расширяющегося процесса освоения космического пространства. Именно они представляют основную опасность вследствие более высокой концентрации наиболее опасных крупноразмерных фрагментов для долговременных космических программ, именно изучению техногенных частиц, процесса их образования и распределения в ОКП посвящены практически все последние исследования.

В настоящее время поток частиц антропогенного загрязнения (так называемого космозоля) существенно превышает поток микрометеороидов. Важно отметить, что наблюдается устойчивая тенденция роста частиц антропогенного загрязнения всех

размеров. Эта тенденция хорошо прослеживается при сравнении результатов первых экспериментов по прямому измерению концентрации частиц в ОКП с результатами измерения в последние годы.

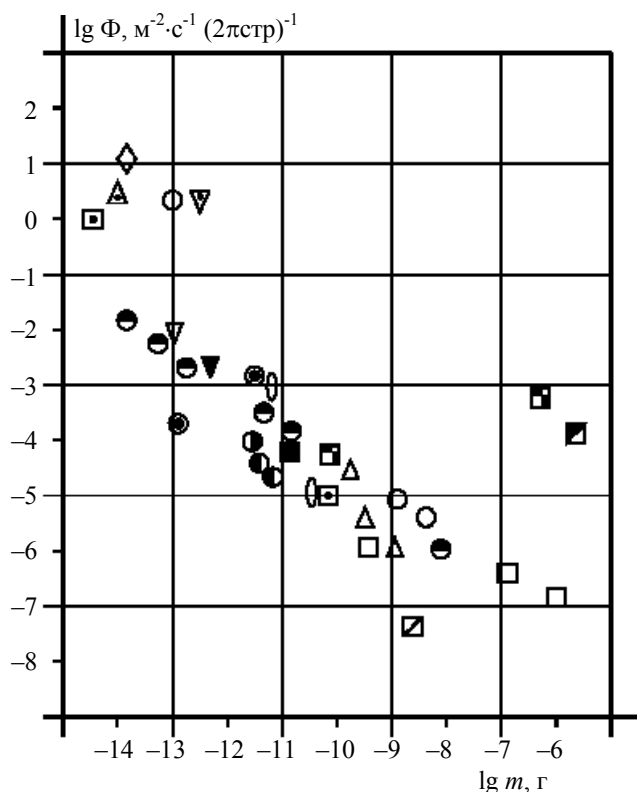


Рис. 1. Зависимость величины потока от массы частиц (результаты прямых измерений):

- △ — "Космос 125" (1966—1967); ▲ — "Космос 163" (1967);
- — "Эксплорер 16, 23" (1962—1964); □ — "Пегас 1,2,3" (1965—1966); 0 — "Ариэль-2" (1965); ▼ — ОГО-4 (1967);
- ▽ — ОГО-3 (1966—1967); ● — "Лунар Орбитер" (1966—1967); ⊙ — "Эксплорер-35" (1967—1969);
- — "Пионер 9, 10" (1969); □ — "Маринер-4" (1964—1967); ■, ☒ — "Джемини-8, 10" (1966);
- △ — "Джемини-12" (1966); ◇ — ракеты "Найс-Апал" (1968); ▽ — ракеты "Кентавр" (1967—1969);
- — "Интеркосмос-14" (1975); □ — "Молния", "Горизонт" (1994—1995); □ — LDEF; ○ — "Космос-1300" (1978—1979); □ — "Японский спутник" (1995);

Так, измерения на "Скайлэбе" показали, что концентрация микрочастиц антропогенного происхождения составила  $0,1 \text{ см}^2$ , в то время как по результатам измерений на "Шаттле" спустя 10 лет концентрация таких частиц составила уже  $100\text{--}200 \text{ см}^{-3}$ , т. е. наблюдается увеличение концентрации на три порядка. Последствия загрязнения ОКП частицами и фрагментами крупных размеров очевидны: столкновения при скоростях соударений порядка нескольких километров в секунду могут привести либо к катастрофическому разрушению КА, либо к выводу из строя его отдельных систем. Влияние соударений КА с частицами раз-

мерами менее 1 мм в настоящее время нельзя считать достаточно изученным. При высоких скоростях встречи возможно эрозионное разрушение поверхностей элементов конструкций КА, при низких — осаждение частиц на этих поверхностях. Взаимодействие с продуктами антропогенного загрязнения ОКП может привести к изменению функциональных характеристик элементов систем КА, таких как, например, оптические датчики, солнечные батареи, системы терморегулирования, зеркальные поверхности и т. п.

Многочисленные факты, выявленные как при эксплуатации космической техники, так и в специально поставленных космических экспериментах по экспонированию образцов конструкционных материалов в космосе демонстрируют заметную деградацию характеристик поверхностей, подвергшихся воздействию потоков частиц антропогенного происхождения.

Вся совокупность имеющихся к настоящему времени экспериментальных данных свидетельствует о возникновении угрозы значительного влияния антропогенного загрязнения верхней атмосферы ОКП на функционирование космической техники.

Прогнозы состояния окружающей среды в будущем зависят от того, насколько активно все страны будут осваивать космос, и от характера осуществляемых операций, так как даже одна авария спутника может сделать все прогнозы недействительными. Ожидается, что плотность потока частиц космического мусора будет возрастать. Зная об ухудшении обстановки в космическом пространстве, конструкторы КА должны исходить в своей работе из уточненных моделей и предположений о состоянии околоземного облака космического мусора.

К пылевым частицам естественного происхождения относятся метеорные потоки. Некоторые авторы [4, 5] делают вывод, что основным источником метеорных тел, в том числе и спорадических, в солнечной системе является распад комет. Вторым источником частиц субмикронных размеров является Солнце, его частицы движутся под действием радиационного давления. Для этих двух классов пылевых частиц предложены различные модели распределения в ОКП [6, 7]. Эти модели разработаны на основании использования различных результатов измерений: данные полетов, полученные с помощью анализа на Земле поверхности возвращенных спутников; эксперименты по сбору пыли; результаты специализированных научных приборов — прямые измерения; наблюдения с помощью радаров и оптических устройств за объектами диаметром более 10 см. Разработанные модели [8, 9] позволяют произвести предвари-

тельную оценку риска столкновения КА с пылевыми частицами на различных орбитах.

### Модель метеорного окружения

Все метеорные частицы делятся на две группы:

- поточные метеорные частицы;
- спорадические метеорные частицы.

Рассчитанное в рамках известной модели общее число частиц (спорадических и поточных) с массой, большей  $m$  и попавших на  $i$ -ю площадку, площадь которой  $S_i$ , за время  $T = T_{end} + T_b$ , где  $T_b$  — начало полета,  $T_{end}$  — время, соответствующее окончанию полета, определяется следующим равенством [10]:

$$N_i = S_i \left( \int_{T_b}^{T_{end}} \xi_i \alpha_i m^{-\beta_c} dt + \sum_{j=1}^{T_{end}} \int_{T_b}^{T_{end}} \xi_j \alpha_j m^{-\beta_i} dt \right), \quad (1)$$

где  $t$  — время экспонирования, с;

$\xi_i, \xi_j$  — поправочные коэффициенты для спорадических и поточных частиц, соответственно;

$\alpha_i, \alpha_j, \beta_c, \beta_i$  — статистические коэффициенты;

Выражение (1) записывается в более простом виде

$$N_i = f S_i \xi_{ij} T N_0(m),$$

где  $f$  — коэффициент безопасности, равный 5;

$S_i$  — площадь  $i$ -го элемента, м<sup>2</sup>;

$T$  — время полета, сут;

$\xi_{ij}$  — обобщенный поправочный коэффициент.

$N_0(m) = \alpha m^{-\beta}$  — коэффициент, зависящий от массы частицы.

$$\xi_i = \frac{1}{T} K_{EC} K_{DC} \int_0^T K_{PT} dt = K_{EC} K_{DC} K_{PT}^{mid}.$$

Определим число частиц, попадающих на КА в виде сферы:

$$N^m = \int_0^\pi \int_0^\pi f \xi_{ij}(\alpha, \beta) N_0(m) t R^2 \sin(\alpha) d\alpha d\beta.$$

После ряда преобразований число соударений метеороидных частиц массой более  $m$  с датчиком сферической формы определяется выражением

$$N^m = f \pi^2 R^2 N_0(m) K_{YS} K_{PT}^{mid} (1 + \cos \psi) t. \quad (2)$$

В развернутом виде выражение (2) записывается в следующем виде:

$$N^m = f \pi^2 R^2 \alpha m^{-\beta} (1 + \bar{v}_k) \frac{1}{N_L} \int_{\tau=1}^{N_L} (0,9 + 0,26 \sin \lambda_\theta + \left\{ 0,06 - 0,075 \sin \left( \frac{\lambda_\theta}{4} \right) \cdot \sin \times \right. \\ \left. \times [2i_{KA} - 180^\circ - 42,4 \sin(\lambda_\theta - 135) - \Omega_A] \right\}) \times \\ \times (1 + \cos \psi) dt,$$

где  $R$  — внешний радиус датчика, м;

$\alpha, \beta$  — статистические коэффициенты распределения частиц по массе;

$m$  — масса метеороидной частицы;

$\bar{v}_k = \frac{v_k}{v_m} = 0,4$ , где  $v_k$  — скорость КА;

$v_m$  — скорость частицы;

$N_L$  — число расчетных орбит;

$\lambda_\theta$  — долгота Солнца, град,  $\lambda_\theta = \frac{360}{365} C_Y - 80^\circ$ ;

$C_Y$  — время, прошедшее с начала года, сут;

$i_{KA}$  — наклонение орбиты КА, град;

$\Omega_A$  — долгота восходящего угла орбиты КА, град;

$\psi = \arcsin \left( \frac{R_{Ear}}{R_{Ear} + H} \right)$ , где  $R_{Ear}$  — радиус

Земли, м;  $H$  — высота орбиты КА, м;

$t$  — время экспонирования, сут.

### Модель космического мусора

Модель космического мусора основана на статистическом подходе, особенностью которого является представление движения совокупности космических объектов во времени и пространстве в виде пуассоновского случайного процесса.

При таком предположении эволюция ансамбля объектов описывается пространственной плотностью [6, 8, 9]:

$$F(i_{KA}, \Omega, h_a, h_p, e, t),$$

где  $i_{KA}$  — наклонение орбиты, град;

$\Omega$  — долгота восходящего угла орбиты, град;

$h_a, h_p$  — высота над поверхностью Земли в апогее, перигее, км;

$e$  — эксцентриситет орбиты;

$t$  — время экспонирования, с.

Согласно кинетической теории газа, поток  $\Phi$  внутри объема  $\delta V$  дается в виде

$$\Phi = F v_k, \quad (8)$$

где  $\Phi$  — число частиц на единицу площади поперечного сечения за единицу времени;

$F$  — пространственная плотность частиц или число частиц, находящихся внутри единичного объема;

$v_k$  — скорость частиц относительно выбранного объема, м/с.

Среднее число столкновений  $N^T$  с космическим объектом поперечного сечения  $\sigma$  за малое время  $\delta t$  равно

$$N^T = \Phi \sigma \delta t.$$

Алгоритм расчета числа соударений  $N^T$  основан на выражении

$$N^T = \sum_{ij} n_{ij}, \quad (3)$$

где  $n_{ij} = F(\bar{\Gamma}_{ij}) \xi_{ij} v_{\Gamma}(h_i, \varphi_j) t.$

В результате преобразования выражения (3) число соударений техногенных частиц с КА сферической формы равно

$$N^T = \sum_{ij=1}^K F_{or} F(d) \xi_{ij} v_{ij} t,$$

где  $F_{or} = f_i f_{hm} f_{np} f_e f_{\Omega} f_T f_{\omega}$  — распределение частиц по орбитальным параметрам;

$f_i \dots f_{\omega}$  — распределение техногенных частиц в каждом классе следующих параметров: наклонение орбиты  $i_{КА}$ , высота в апогее  $h_a$ , высота в перигее  $h_p$ , эксцентриситет  $f_e$ , долгота выходящего узла орбиты  $\Omega$ , период обращения  $T$ , аргумент перигея орбиты  $\omega$ ;

$F(d) = \alpha d^{-\beta}$  — распределение техногенных частиц по размеру  $d$ , где  $\alpha, \beta$  — статистические коэффициенты.

После ряда преобразований число соударений частиц с массой, большей  $m$ , с КА сферической формы равно

$$N^T = 0,08 \pi F_{or}(i_{КА}, h_a, h_p, e, \Omega, T, \omega) \gamma m^{-0} \times \\ \times \left[ (d_0 + d_{\max})^3 - (d_0 + d)^3 \right] vt,$$

где  $m$  — масса частицы, кг;

$d$  — диаметр частицы, м;

$d_{\max}$  — максимальный диаметр частиц, м;

$d_0$  — средний размер объекта, м;

$v$  — скорость частицы ( $v = 25$  км/с);

$t$  — время экспонирования, с.

На основании этих моделей на рис. 2 приведены расчетные значения соударений для сферического ионизационно-конденсаторного преобразователя [10] с внешним диаметром 10 м, схематическое изображение которого показано на рис. 3.

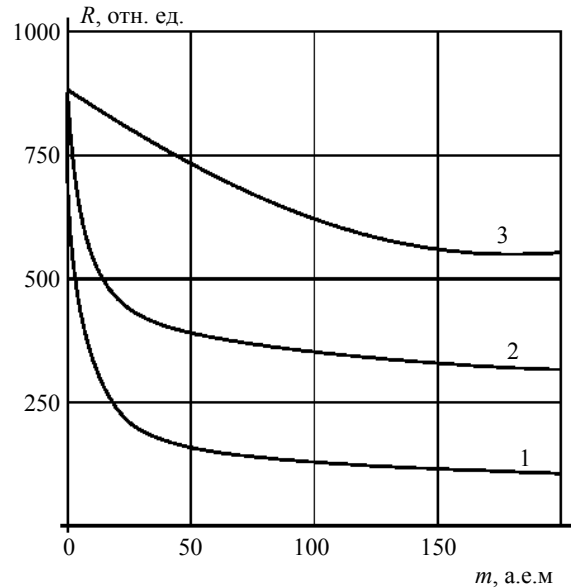


Рис. 2. Расчетные сравнительные характеристики пылеударных масс-спектрометров:

- 1 — классический электростатический отражатель;
- 2 — отражатель с нелинейным электростатическим полем;
- 3 — метод динамической компенсации

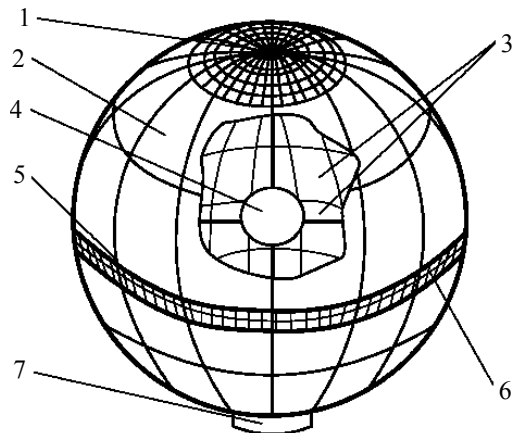


Рис. 3. Преобразователь частиц космического мусора как КА:

- 1, 6 — пленочные солнечные батареи; 2 — внешняя оболочка КА; 3 — конденсаторные секции;
- 4 — приемник ионов; 5 — пленочная антенна;
- 7 — контейнер с научной аппаратурой

### Прогноз метеорной активности на 2007—2012 гг.

Потоки метеорного вещества являются результатом перехвата гравитационным полем Земли метеорного вещества метеорных роев, являющихся результатом гравитационного воздействия Юпитера на пролетающие мимо ядра комет. Скорость метеоров лежит в пределах 30—70 км/с, плотность потока метеоров различна в зависимости от периода вращения метеорного роя вокруг Солнца. Число попаданий метеорного вещества будет меняться от года к году вплоть до его исчезновения на длительное время. В приближении за-

дачи трех тел рассчитано прохождение кометы вблизи Юпитера, при этом в точках Лагранжа  $L_1$  и  $L_2$  возникают метеорные рои, положение которых находится из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_0 x_0 + m_1 x_1 + m_2 x_2 &= 0 \\ -n^2 x_1 + f m_0 \frac{x_1 - x_0}{\Lambda_{01}^3} + f m_2 \frac{x_1 - x_2}{\Lambda_{12}^3} &= 0 \\ -n^2 x_2 + f m_0 \frac{x_2 - x_1}{\Lambda_{12}^3} + f m_2 \frac{x_2 - x_0}{\Lambda_{02}^3} &= 0 \\ m_0 y_0 + m_1 y_1 + m_2 y_2 &= 0 \\ -n^2 y_1 + f m_0 \frac{y_1 - y_0}{\Lambda_{01}^3} + f m_2 \frac{y_1 - y_2}{\Lambda_{12}^3} &= 0 \\ -n^2 y_2 + f m_0 \frac{y_2 - y_1}{\Lambda_{12}^3} + f m_2 \frac{y_2 - y_0}{\Lambda_{02}^3} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

где  $\Delta_{ij}$  — взаимные расстояния между точками  $P_i$  и  $P_j$  ( $P_0$  — Юпитер,  $P_1$  — ядро кометы,  $P_2$  — метеорный рой);

$m_i$  — масса тела, окружающего точку  $P_i$ ;

$x_i$  — координаты точки  $i$  в системе координат, связанной с барицентром системы, причем ось абсцисс проходит через точки  $P_0$ ,  $P_1$ ;

$f$  — постоянная тяготения;

$n$  — среднее движение.

потока. Вычисляемый период биений [11] является одной из основных величин, используемых при построении прогноза. Кроме того, при прогнозировании используются эмпирические данные о максимальных значениях плотности потока вещества для метеорного роя и значения предыдущих интенсивностей выпадения метеорного вещества. В предлагаемом прогнозе расчет, опирающийся на гравитационное воздействие Юпитера, проведен приближенно с точностью до недели. Результаты расчета приведены в табл. 1, из которой видно, что наиболее опасны в отношении метеорной опасности 2008 и 2012 гг., наиболее "спокойная" метеорная обстановка в 2010 г.

### Моделирование высокоскоростных частиц

Высокоскоростные частицы даже в лабораторных условиях представляют собой сложный динамический объект исследования [12]. В процессе их ускорения необходима информация об их параметрах (скорости, массе, агрегатном состоянии). Для ускорения индивидуальных частиц с различными массами или потоков для решения ряда задач в области астро-, космофизики, физики высокоскоростного удара требуется создание ускорительных устройств, удовлетворяющих следующим основным требованиям:

Таблица 1

Название потока	Дата макс.	Интервал дат	Скорость потока, км/с	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
				Плотность потока, шт/ч					
Лириды	3.01	2.01—4.01	47	0—5	0—5	0—5	0—5	0—5	0—5
8-Аквириды	30.07	29.07—14.08	41	5	5	5	5	5	5
Дракониды	10.10	10.10	24,60	8	8	8	8	8	8
Ориониды	21.10	17.10—24.10	66	5	5	5	5	5	5
Тауриды	4.11	20.10—25.11	30	6	5	5	5	5	5
Леониды	16.11	14.11—19.11	72	5	5	5	5	5	5
Андромедида	20.11	15.11—6.12	20	1000	7000	1000	10	1000	7000
3-Тауриды	30.06	23.06—7.07	31	—	—	—	—	—	—
Геминиды	13.12	8.12—15.12	36	—	—	—	—	50	—
Урсиды	22.12	19.12—23.12	36	—	—	—	—	12	—

Поскольку приведенная выше система из шести уравнений содержит восемь неизвестных  $n$ ,  $m_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ , то для обеспечения ее решения привлекают дополнительные условия коллинеарности  $y_0 = y_1 = y_2 = 0$ .

После определения неизвестных рассчитываются орбиты метеорных роев, что позволяет определить период прохождения метеорного роя сквозь плоскость орбиты Земли. Поскольку период метеорного роя не кратен периоду обращения Земли вокруг Солнца, то будет иметь место периодическое усиление и ослабление интенсивности метеорного

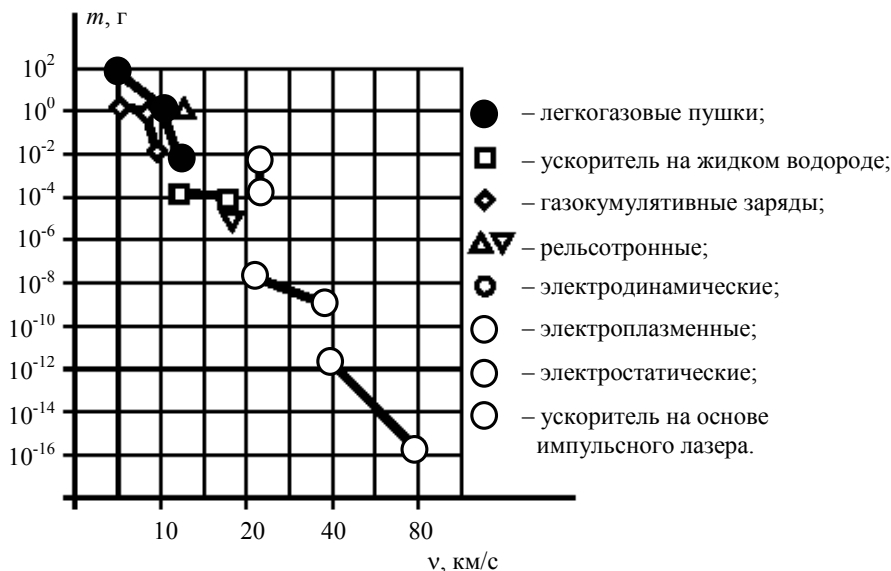
- диапазон частиц по скоростям и массам, соответственно, 1—80 км/с и  $1—10^{-16}$  г;
- высокая повторяемость результатов;
- контролируемость параметров ударяющей частицы;
- простота эксплуатации, надежность, низкая стоимость;
- обеспеченность надежной системой регистрации;
- простота регулирования параметров ускоряемых частиц.

Тип и конструкция ускорителя определяются поставленной задачей и зависят от диапазона исследуемых масс и скоростей ускоряемых частиц.

Параметры высокоскоростных частиц, достигнутые к настоящему времени в экспериментах [12—14], приведены на рис. 4.

литиевую проволоку образуется высокоскоростная плазма, разрывающая диафрагму с расположенными на ней моделями и ускоряющая их в трубе разгона до большой скорости. Одним выстрелом можно разогнать 10 000 мелких (диаметром 50 мкм) стеклянных шариков.

Рис. 4. Распределение частиц по скоростям и массам, полученное с помощью различных типов ускорителей



Для моделирования микрометеоритной пыли и техногенных частиц успешно применяются электростатические и электроплазменные ускорители, с помощью которых возможно ускорение частиц до скорости 10—40 км/с в диапазоне масс  $10^{-11}$ — $10^{-15}$  г.

Для разгона ударников значительных масс до высоких скоростей чаще всего используются двухступенчатые легкогазовые пушки [15]. К настоящему времени теория легкогазовых пушек хорошо разработана, и современные легкогазовые пушки позволяют получать предельные величины разгоняемых масс и скоростей от 0,04 г и 11 км/с до 2,5 г и 4,7 км/с, соответственно.

Для ускорения макрочастиц широко используются электромагнитные ускорители различных типов [16—18]. Электромагнитные пушки рельсового типа, в них ускорение ударника осуществляется за счет взаимодействия индуцируемых в нем вихревых токов с движущимся магнитным потоком. При дополнительном использовании взрывного сжатия магнитного слоя для значительного повышения его напряженности появляется возможность довести скорость ударника массой 0,01 г до 10 км/с [18]. Недостатки связаны с возникновением дугового разряда на контактах, частым разрушением ускоряющих катушек и ударника в процессе ускорения.

Разгонять ударники до больших скоростей можно посредством их увлечения высокоскоростным потоком плазмы [19]. При разряде большой высоковольтной батареи конденсаторов через

В электростатическом ускорителе [20] с напряжением порядка 300 кВ очень мелкие частицы диаметром 0,5—1 мкм из алюминия разгоняются до скорости порядка 2—10 км/с.

При более высоком ускоряющем напряжении 1—2 МВ метод электростатического ускорения позволяет ускорять частицы размером 0,05—1 мкм, соответственно, до скорости 50—20 км/с. При электростатическом ускорении можно осуществить определение размера и скорости индивидуальной частицы. Таким образом, метод электростатического ускорения является лучшим, удобным в эксплуатации, наиболее эффективным для моделирования микрометеоритной пыли микронных и субмикронных размеров. Недостатками электростатического ускорителя Ван де Граафа являются прежде всего его сложность и наличие высоких напряжений.

В работе [21] рассмотрены методы ускорения частиц посредством переключения нескольких трубок синхронно с параметрами движения частицы. При напряжении на электродах, составляющем 100 кВ, и числе трубок, равном 100, можно получить в эквиваленте 10 МВ. При таких напряжениях частица массой  $10^{-16}$ — $10^{-17}$  г может быть ускорена до 100—120 км/с. Программируемая система селекции частиц выделяет их с нужными зарядом и скоростью и генерирует последовательность импульсов, разряжающих ускоряющие электроды в тот момент, когда частица находится в его окрестности. Ускорение частицы является стабильным, когда сфазированы разрядка электродов и выход частиц из них.

Значительный интерес вызывает применение наносекундных и пикосекундных лазеров с большой плотностью энергии в качестве устройства ускорения твердых частиц микронных и субмикронных размеров. Например, в работе [22] с помощью плазмы, образованной в результате взаимодействия лазера с фольгой, 200-мкм частица приобретает скорость 1 км/с. С помощью ускорителя на основе лазера с большой плотностью мощности можно ускорять частицы размером 4—6 мкм до скоростей порядка 35—37 км/с [23].

Для решения задачи ускорения потоков частиц наиболее целесообразным, с точки зрения простоты, является использование таблеток с взрывчатым веществом (ВВ), в котором замешаны частицы. При взрыве продукты ВВ, как показывает практика, сгорают почти полностью, а частицы остаются целостными и имеют скорость 1—5 км/с [24—26]. Использование такого метода позволяет с малыми затратами за короткое время прогнозировать поведение элементов конструкций КА в течение длительной эксплуатации.

Рассматривая все вышеуказанные устройства для ускорения частиц, можно выделить четыре метода, в сумме перекрывающие требуемые диапазоны по скоростям и массам. Это методы электромагнитного, электроплазменного, электростатического, лазерного ускорения.

Детальное изучение явлений при высокоскоростных соударениях с помощью электроплазменного и электромагнитного ускорителей осложняется значительными электромагнитными помехами и влиянием плазмы на систему регистрации и исследуемые мишени (тем более, если мишени выполнены в виде различного рода датчиков). В этом случае меньшими недостатками обладает метод с использованием мощного импульсного лазера как вариант электроплазменного ускорителя для создания облака ускоряющей высокоскоростной плазмы [22].

Ускоренные электростатическим ускорителем частицы имеют положительный заряд порядка  $10^{-11}$ — $10^{-14}$  Кл. При соударении частицы с мишенью возникают явления, сопровождаемые разрядом частицы на мишень, что искажает информацию о параметрах ударной плазмы [27]. Учет этого фактора особенно важен при скорости соударения до 5—8 км/с. Совместное действие потенциального и кинетического механизмов на процессы ударной ионизации изучалось в работе [28].

Зависимость заряда, образованного в результате взаимодействия частицы с мишенью, не может быть описана в виде  $Q \approx km^\alpha v^\beta$  [29] в широком диапазоне скоростей (1—8 км/с).

В диапазоне скоростей 1—8 км/с зависимость заряда от параметров частицы имеет экспо-

ненциальный характер [30], что совпадает с моделью поверхностной ионизации [31]. Для более точного описания процессов ионизации при высокоскоростном соударении в экспериментальную установку на основе электростатического ускорителя [27] введено устройство разрядки частиц (система нейтрализации заряда).

Для более детального исследования явления стационарного свечения ударно-сжатого вещества [32], наблюдаемого при взаимодействии частицы с тонкой МДМ-структурой на основе полиметилметакрилата, экспериментальная установка дополнена масс-спектрометром, определяющим элементный состав синтезированного в момент взаимодействия нового соединения. Для выделения заданного диапазона масс и скоростей разгоняемых частиц в электростатическом ускорителе рядом авторов используется система сепарации.

При ускорении частиц с помощью импульсного лазера возникает проблема зарядки частиц в тонкие диэлектрические мишени. В процессе зарядки частицы могут слипаться одна с другой, что отражается на качестве эксперимента.

Экспериментальная установка на основе импульсного лазера [23] в значительной степени устраняет указанный недостаток. Зарядка частиц в таком устройстве осуществляется с помощью электростатического ускорителя. Скорости частиц выбираются так, чтобы они внедрялись в тонкую мишень со скоростью 100—300 м/с, не вызывая при этом сквозной пробой. Затем мишень с заряженными в нее частицами подвергалась воздействию лазера. В экспериментах были достигнуты скорости частиц размером 6 мкм до 37 км/с.

Таким образом, разработанные ранее и эксплуатирующиеся в настоящее время ускорители различных типов могут быть использованы для решения вопросов экспериментальной отработки аппаратуры для исследования частиц космического мусора и микрометеороидов после проведения работы по их оснащению дополнительной аппаратурой и соответствующими методиками проведения экспериментов, на что и направлены усилия различных экспериментаторов.

Значительный научный и практический интерес представляет исследование взаимодействия интенсивных потоков высокоскоростных частиц с полубесконечными и тонкими преградами, а также с элементами конструкций КА [24]. В результате многочисленных экспериментов по моделированию потоков частиц в лабораторных и космических (с помощью ракет) условиях [33—35] были получены сведения о взаимодействии потоков высокоскоростных частиц с материалами, являющимися важными для космической техники.

### Методы и средства регистрации и измерения физико-химических характеристик микрометеороидных и техногенных частиц

Изучение околоземной и межпланетной пылевой составляющей проводилось пьезоэлектрическими датчиками, устанавливаемыми на высотные геодезические ракеты, а также ИСЗ (1957—1966 гг.) [36—38], однако все полученные с их помощью результаты были признаны ошибочными [39, 40] в связи с выявленными внутренними шумами чувствительного элемента, обусловленными вибрацией. В дальнейшем они использовались лишь в составе комбинированных датчиков. Первые достоверные данные получены с помощью датчиков на основе эффекта световой вспышки при высокоскоростном ударе [40, 41] и простейших пробойных датчиков сеточного типа [42—44], с газонаполненными ячейками [45], с фотосопротивлением, закрытым защитной пленкой, а также пробоя конденсаторного датчика [46]. В дальнейшем для исследований использовалось экспонирование высокочистых пластин из Cu, Ag, Au с последующим анализом параметров кратеров и остатков частиц [47, 48], создание люминесцентных преобразователей [49], комбинированных люминесцентно-конденсаторных датчиков, позволяющих отдельно регистрировать массу и скорость пылевой частицы [50], а также ионизационных датчиков [51—53].

Тонкопленочные МДМ-структуры с успехом применяются для исследования потоков высокоскоростных частиц [48, 54], поскольку в этом случае изменение емкости пробитой структуры лежит в пределах 0,1—70 %.

Использование явления эмиссии заряженных частиц при высокоскоростном ударе в космических экспериментах оказалось наиболее перспективно, так как само явление позволяет получить информацию не только о физических параметрах частицы, но и их химическом составе.

Наибольшее число физических явлений (ФЯ) приходится на диапазон скоростей взаимодействия частиц выше 1 км/с относительно лабораторной системы отсчета. При таких скоростях наблюдается целый спектр ФЯ под общим названием "высокоскоростной удар".

Представленные методы и устройства для регистрации пылевых частиц можно классифицировать с учетом ряда их особенностей следующим образом:

- по способу взаимодействия частиц с прибором методы разделяются на контактные и бесконтактные;
- по информативности преобразователя характеризуются одной выходной зависимостью или несколькими. Наиболее информативными являются

методы на основе ионизации, вспышки, изменения электропроводности ударно-сжатых веществ;

- по быстрдействию методы и устройства регистрации различаются длительностью процесса формирования выходных импульсных сигналов, которое происходит одновременно с процессом высокоскоростного взаимодействия, а в другом случае длится по времени много больше времени взаимодействия частицы с чувствительной поверхностью преобразователя;

- по совместимости с элементами конструкций КА средства регистрации частиц различаются степенью влияния их на характеристики элементов (радиаторов, тепловых труб и т. д.). Наиболее перспективными являются методы и устройства регистрации частиц, рассмотренные в работах [1, 3, 4, 7, 14, 18];

- по возможности использования преобразователей для определения параметров одиночного или группового воздействия в виде интенсивных потоков частиц.

Последние три десятилетия характеризуются появлением различных подходов к проблеме исследования свойств космической пыли, среди них:

- послеполетный анализ, включающий экспонирование в космических условиях (например на МКС) различных металлических, полупроводниковых и многослойных пленочных структур с последующим их возвращением на Землю для дальнейшего исследования кратеров, остатков частиц (эксперименты LDEF — Long Duration Exposure Facility);

- элементный анализ остатков частиц. Данная задача является сложной в связи с тем, что необходимо соблюдение чистоты эксперимента, возможности отличия частиц естественного и искусственного происхождения. При этом в лаборатории используется дорогая современная экспериментальная база (электронный микроскоп, спектрофотометр и др.);

- сбор частиц в специальных ловушках. В качестве ловушки используется микропористая пена аэрогель (оптически прозрачное, имеющее низкую плотность 0,1—0,001 г/см<sup>3</sup> и высокую чистоту вещества). Такие ловушки устанавливаются на КА типа "Шаттл", "Мир", МКС. Аэрогели используются как среда отбора кометных и межзвездных частиц в миссии Stardust;

- использование детекторов совмещенной конструкции. При этом мишенью таких устройств является аэрогель, а приемником вторично-заряженных частиц (ионов), образованных в результате соударения, является, как правило, вторично-электронный умножитель, а приемником ударной световой вспышки — фотоэлектронный умножитель или ПЗС-матрица.



Из бесконтактных методов практическое применение в космических условиях имеет лишь метод наведения тока при пролете заряженной частицы через какую-либо систему электродов [55]. Остальные методы непригодны для регистрации мелких частиц на больших площадях чувствительной поверхности или, в лучшем случае, могут быть применены лишь в лабораторных условиях.

### **Требования, предъявляемые к системе регистрации пылевых частиц**

- Наличие математической модели соответствующего физического явления взаимодействия частицы с прибором, а также импульса тока преобразователя как функции параметров частицы и его основных конструктивных элементов.
- Обеспечение метода регистрации надежной тарировкой.
- Надежное функционирование и достоверность результатов измерений.
- Большие рабочие площади чувствительной поверхности преобразователя.
- Высокая помехозащищенность преобразователя.

Удовлетворение всех вышеуказанных требований в полной мере означало бы создание некоей идеальной системы регистрации частиц. В работе [34] приведены результаты синтеза оптимальной по заданным параметрам структуры многопараметрического преобразователя, отвечающей основным требованиям.

Преобразователь [23], показанный на рис. 3, близок к идеальному: наиболее полная информация о параметрах частицы, большие рабочие площади чувствительной поверхности (200—300 м<sup>2</sup>), независимость измеряемых параметров от места соударения, повышенная помехозащищенность, возможность функционирования на различных высотах. Следует также указать на перспективы проекта Stardust по сбору космической пыли.

### **Космические эксперименты**

За последние 50 лет проведено порядка ста космических экспериментов по регистрации и измерению параметров частиц естественного и искусственного происхождения на околоземных орбитах и в отдаленных районах космического пространства. Существует ряд превосходных обзоров [39, 55, 56], касающихся общих проблем микрометеорной обстановки. Однако к настоящему времени большинство этих обзоров устарело и не охватывает многих работ, выполненных в последние годы. На рис. 1 приведены результаты измерений величины потока частиц в различных районах космического пространства, проведенных специалистами разных стран в течение 30 лет. Анализ

зависимостей величины потока частиц от массы, полученных с помощью различных датчиков, показывает на значительное расхождение результатов (в ряде случаев более чем на порядок). Такой разброс экспериментальных данных указывает прежде всего на несовершенство используемых средств измерения. В работе [39] дана критика результатов экспериментов, проведенных в конце 60-х и начале 70-х годов прошлого века. Как отмечалось выше, применяемые датчики в основном были выполнены однопараметрическими. При априори неизвестных минимум трех параметров частицы измерялся лишь один параметр (или два параметра в ионизационном датчике), что создавало неопределенность в оценке размера, скорости, плотности частицы. Если эксперименты касались определения элементного состава частицы [57], то физические ее параметры практически не регистрировались, причем влиянию чистоты на результаты экспериментов уделялось в напечатанных работах мало места.

Другой причиной больших расхождений результатов космических экспериментов является отсутствие в работах анализа и синтеза теоретических моделей многопараметрических преобразователей параметров частиц, а также их сравнительных характеристик с результатами моделирования, анализа погрешностей измерения.

Важным вопросом является организация защиты датчиковой аппаратуры от различных факторов космической среды, а также от факторов, инициируемых функционированием самого космического аппарата.

Таким образом, проблема регистрации высокоскоростных частиц в космических условиях заключается в создании многопараметрического преобразователя, в наибольшей степени удовлетворяющего вышеуказанным требованиям, а также усовершенствовании техники ускорения и методик обработки информации.

В конце 70-х годов возросла активность разработчиков аппаратуры для регистрации высокоскоростных частиц в связи с подготовкой эксперимента к комете Галлея [58]. Аппаратура содержала датчики на основе таких явлений при высокоскоростном ударе как ионизация, пробивание тонких преград, вспышка, пьезоэффект. Кроме того, был установлен времяпролетный масс-спектрометр в его классическом исполнении. Следует отметить, что в эксперименте объект исследования (частицы) обладал известной скоростью соударения с датчиком (~79 км·с<sup>-1</sup>), причем величина потока частиц была вполне достаточной для набора статистики, а размеры частиц находились в диапазоне от 0,1 мкм до сотен мкм и более, в связи с чем вопрос о чувствительности аппаратуры не являлся проблемой.

Из вышеуказанного следует, что эта задача не идентична задаче регистрации космического мусора на околоземной орбите. Метод экспонирования в космических условиях различных поверхностей (специально обработанных полупроводников, металлов) с последующим анализом кратеров в лаборатории получил свое развитие с конца 70-х годов [57, 59] и к настоящему времени успешно конкурирует с прямыми методами регистрации частиц. Большие рабочие площади, длительные сроки экспонирования, современная научная аппаратура для анализа характеристик кратеров, а также остатков материала частиц позволили получить уникальную информацию о характеристиках частиц космического мусора.

В работе [60] представлены результаты исследования метеорного вещества на ИСЗ "ИнтерКосмос-14" с помощью датчиков люминесцентно-конденсаторного типа, а также сопутствующих наземных наблюдений. Полученные распределения метеорных тел по массам в окрестности Земли и межпланетном пространстве приведены на рис. 5. Конденсаторные и люминесцентные датчики выполнены по технологии, разработанной в Самарском государственном аэрокосмическом университете (г. Самара, Россия) в 1973 г.

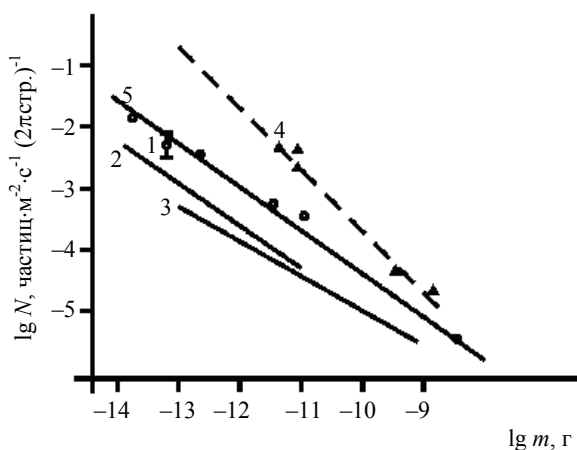


Рис. 5. Данные, полученные в ходе экспериментов на КА: 1 — ОТО-4; 2 — "Эксплорер-16"; 3 — "Эксплорер-35"; 4 — "Космос-163"; 5 — "Интеркосмос-14"

Эксперименты LDEF по сбору космической пыли на больших площадях чувствительной поверхности проводятся на космических аппаратах с середины 80-х годов. В результате получены важные сведения о физико-химических характеристиках мелких частиц (<3 мкм), их пространственно-временном распределении, а также изучались различные компоненты окружающей среды (зодиакальное облако, бета-метеороиды, метеорные по-

токи, межзвездная пыль и орбитальные осколки). В экспериментах использовались шесть детекторных панелей, расположенных по всем направлениям в пространстве. Приблизительно 60 % детекторов имели высокую чувствительность к размеру частиц (толщина диэлектрика датчика составляла ~4 мкм). Остальные датчики имели более низкую чувствительность.

Данные экспериментов записывались на магнитную ленту и передавались на Землю по истечении 9—10 мес. экспонирования. Одной из наиболее важных задач было исследование пространственно-временных характеристик метеорных потоков. В связи с этим проводилось исследование ударных кратеров (их размеров и элементного состава материала внутри кратера). В одном из случаев анализа числа соударений зафиксирован 131 удар частиц в течение 2 мин, что на 3 порядка превышает величины среднего значения потока, полученные в других экспериментах. Анализ химического состава остатков материала частицы в кратере сопряжен с проблемой загрязнения датчиков IDF. Решение этой проблемы позволяет проводить более достоверную идентификацию прохождения частицы (метеориты и орбитальные осколки).

С этой целью использовались электронный микроскоп (SEM/EDS) и масс-спектрометр (SIMS), при этом в качестве мишени применялись ВЧ-германиевые пластины. Проводилась идентификация больших кратеров (60, 71 и 180 мкм) на германиевых поверхностях.

Испытания в рамках LDEF показали, что поверхность образцов загрязнена щелочными разновидностями силикогенов. Поверхности датчиков состояли из золота 999-й пробы и были гладкими. Проведенные эксперименты включают следующие исследования: стереоптический анализ, электронный и гамма-спектрометрический анализы внутренней полости кратера и окружающей области.

Датчики TDE, используемые в экспериментах, выполнены в виде структуры металл—диэлектрик—полупроводник. Толщина диэлектрика (SiO<sub>2</sub>) 0,4—1 мкм, а оксида силикона — 250 мкм.

Датчик включен в электрическую цепь. При пробое частицы возникает разряд, который регистрируется. Необходимо отметить, что возможно самопроизвольное закорачивание таких тонких структур, которое ошибочно может восприниматься как ударное воздействие. Некоторые результаты элементного анализа высокоскоростных частиц SIMS- и SEM/EDS-методами приведены в табл. 2.

Таблица 2

Взаимодействие	Диаметр кратера, мкм	Метод анализа	Относительный избыток элементов, обнаруженных в кратере или зоне воронки	Примечания
Ge <sub>2</sub> A/6	7	SIMS	Al, K>Na, Mg, Si, Ca, Fe, Zn>Ti	
7	8	"	C, Na, K, Ca>Mg, Al, Nt, Fe, Cu	
12	6	"	Na, Mg, Si, K>Ca	(Na, K, Ca, Ti, Zn, Cu) ниже места удара
13	8	"	Si>Na, Mg, Al, K, Fe	(C, Na, Al, Si, K, Ca>Fe) вблизи кратера
15	8	"	Na, Mg, Fe	
17	71	EDS	Al, Si	Только в центре разрушенной зоны. Не замечено в SIMS
17	71	SIMS	Ca, Fe (только в зоне воронки)	(Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe) вокруг места удара
18	17	"	Si, Fe>Mg	(C, Na, Mg, Al, Si, K, Ca>Ti, Cr) в непосредственной близости
Ge <sub>2</sub> B/2	14	"	Si>Na	(Na, Fe, Cu) около кратера. В EDS не наблюдалось
	6	"	Na, Mg, Si>K>Al	В EDS не наблюдалось
	17	"	Mg>Na	(Na, Mg, Fe>Si, K, Ca) вне области удара. В EDS не наблюдалось
	15	"	Mg, Si>Na, K	Далеко от места удара
	60	EDS	Al, Si>Cu>Zn>S	Не анализировалась в SIMS
	15	SIMS	Na, Mg, Si, Ca, Fe>K	(Al, Si>Na, Mg, K, Ca, Fe, Zn>Ti, Cr) в области кратера. Не обнаружено в EDS
	22	"	Na, Mg, Si>K	(Mg, Al, Si, K, Ca, Fe) вокруг места удара

В 1978—1979 гг. была проведена серия экспериментов с экспонируемыми в космосе мишенями в виде матрицы тонкопленочных конденсаторов [33].

На ситалловой подложке наносились структуры металла (Ag) — диэлектрик (полиметилметакрилат) толщиной 0,3—0,6 мкм и верхняя обкладка из серебра толщиной 0,1 мкм. После экспонирования находили кратеры в закороченных конденсаторах, затем образцы помещали в вакуумную камеру времяпролетного масс-спектрометра, на закороченные участки подавали короткий импульс амплитудой 300—500 В и записывали массовые спектры ионов, по которым находили элементы материала частицы путем сравнения спектров с ранее полученными в лабораторных условиях спектрами материала конденсатора. На рис. 6 показаны схема экспериментальной установки и поток частиц, при этом величина потока частиц с массой  $10^{-13}$  г составила  $\sim 10^{-5}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Рассмотренный метод позволяет установить происхождение частицы. В работе [58] показаны элементы, из которых состоят частицы. Результаты позволяют судить о принадлежности частицы к техногенной или метеороидной. В 1994—1997 гг. проведены эксперименты по регистрации частиц на геостационарной орбите с помощью совмещенного преобразователя, использующего явление ионизации и пробоя тонких МДМ-структур [61, 62]. Схема преобразователя показана на рис. 7, а результаты космических экспериментов — на рис. 8.

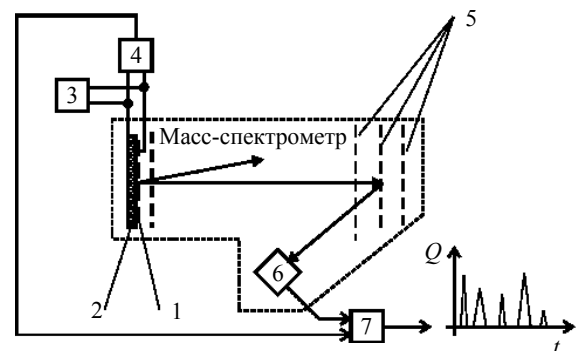


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки для регистрации спектров пылевых частиц с матрицы конденсаторов тонкопленочных (слева) и поток частиц (справа):

1 — МДМ-структуры; 2 — подложка; 3, 4 — источники питания; 5 — электрическое зеркало масс-спектрометра; 6 — вторично-электронный умножитель; 7 — блок индикации и обработки ионных спектров

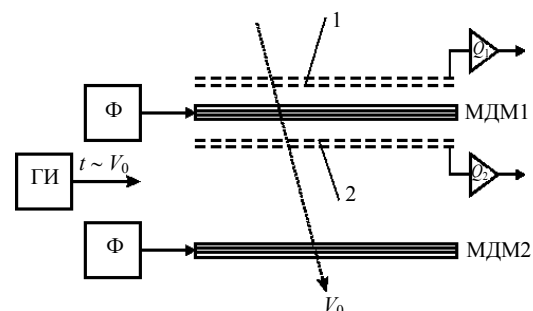


Рис. 7. Структурная схема ионизационно-конденсаторного преобразователя:

1, 2 — приемники ионов; ГИ — генератор импульсов; Ф — формирователь импульсов

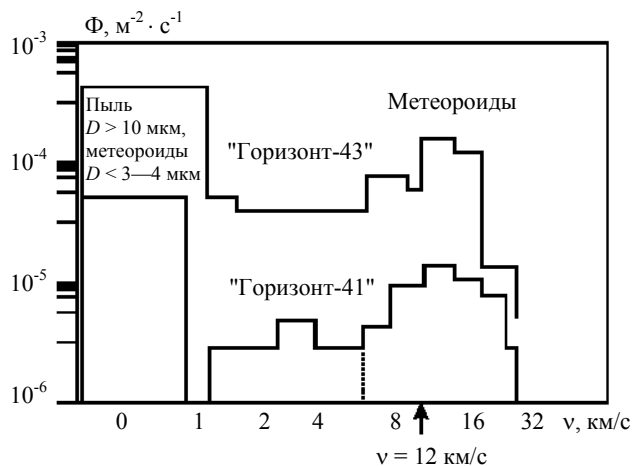


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований на геостационарной орбите

Образованные при соударении ионы регистрировались с помощью приемников в виде двухфазной сеточной решетки 1, 2 (см. рис. 7). При взаимодействии частицы с тонкой МДМ-структурой реализуются два режима: измерение электропроводности ударно-сжатой МДМ-структуры и измерение остаточного напряжения короткозамкнутой структуры. При пробивании двух МДМ-структур измеряется время пролета частицы, по которому судят о ее скорости. На рис. 9 представлены экспериментальные зависимости напряжения с ударно-сжатой и закороченной МДМ-структурой от скорости и массы частицы, полученные с помощью электростатического ускорителя [63], а в [64] приведены модели взаимодействия частицы с МДМ-структурой для двух случаев. Использование метода измерения электропроводности ударно-сжатого диэлектрика позволяет повысить чувствительность по массе преобразователя ионизационно-конденсаторного типа, экспериментальное ис-

следование которого проводилось с ускорителем на основе импульсного лазера [22]. Эксперименты с помощью ионизационно-конденсаторного преобразователя плоской конструкции проведены на двух КА "Горизонт 41, 43", а результаты представлены в [61, 62]. В 1996—1997 гг. были проведены эксперименты по изучению характеристик частиц на КА "Экспресс-2" с помощью ионизационного преобразователя полусферической формы. По сравнению с ранее известным он дополнен еще одним приемником в виде вторично-электронного умножителя, что делает его более чувствительным к ударам субмикронных частиц. Сравнение результатов трех экспериментов, проведенных на геостационарной орбите, показывает, что измеренные величины потоков частиц находятся в пределах одного порядка. На рис. 10 приведена зависимость количества ударов частиц за 12 ч [65].

В марте 1995 г. ракетой Н-11 был запущен японский спутник SFU, который находился на орбите 301 день на высоте 300—5000 км и с наклоном 28,5 %. Общая площадь чувствительной поверхности составила примерно 150 м². На чувствительную поверхность были нанесены тефлон, покрытый серебром для лучшего излучения, и алюминизированный каптон MCU. В январе 1996 г. спутник был возвращен на Землю "Шаттлом STS-72". Спутник является первой беспилотной японской платформой многоцелевого использования для космических исследований и технологических экспериментов. Лабораторные исследования экспонированных поверхностей показали наличие 337 участков воздействия размером более 200 мкм, а также трех кратеров в 2,5 мм. Результаты хорошо согласуются с результатами LDEF, EuReCa и Hubble.

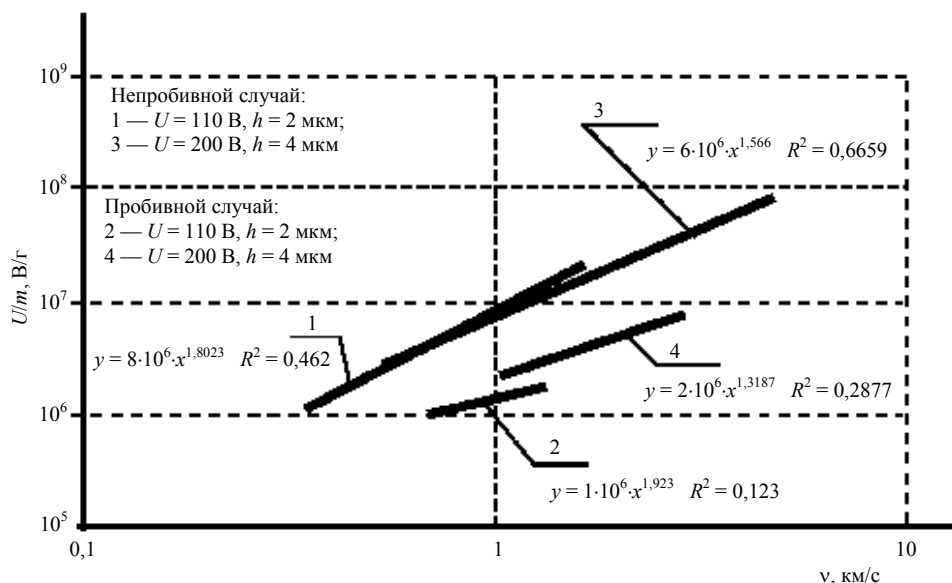


Рис. 9. Зависимость амплитуды напряжения с ударно-сжатого конденсатора от скорости пылевой частицы

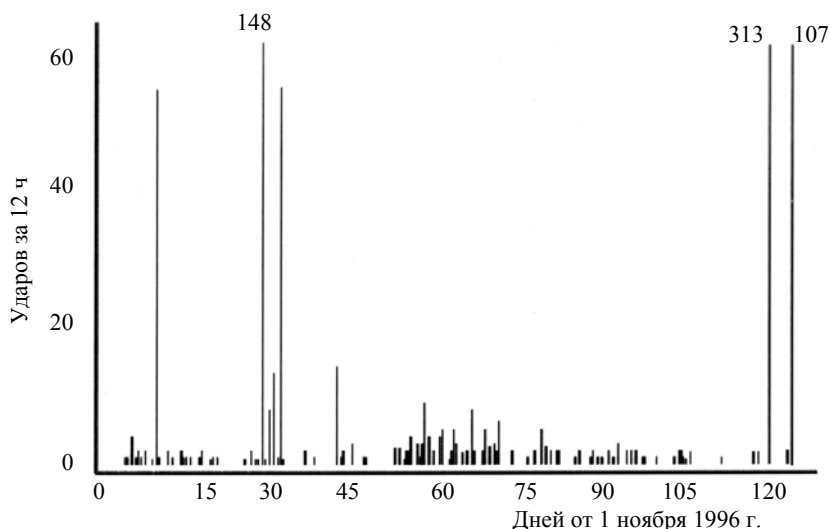


Рис. 10. Интенсивность соударений

В 1983 г. был запущен на высоту 900 км инфракрасный астрологический спутник ИКАС. Он работал в течение 10 мес в диапазоне от 8 до 120 мкм. ИКАС исследовал до 95 % неба на четырех широких полосах частиц, расположенных на 12, 25, 60 и 100 мкм. Полученные результаты доказали, что с помощью ИКАС можно обнаружить космические частицы достаточно больших размеров.

В феврале 1999 г. была выведена на высоту 830 км космическая обсерватория ARGOS, на которой был установлен детектор космических частиц SPADUS времяпролетного типа. Он содержит две разнесенные в пространстве секции из матрицы поливиниловых пленок толщиной 6 мкм. Размеры каждой секции 6×6 см, а их число равно 60. При пробое каких-либо двух пленок частицей определялось время ее пролета и, следовательно, скорость. Получены значения потоков частиц в зависимости от их размеров, а также распределение потоков частиц во времени (днях). Данный детектор использовался на КА STARDUST в экспериментах по изучению кометы "Вилда-2".

Анализ существующих методов и средств регистрации космической пыли показывает, что наилучшим решением является конструкция детектора совмещенного типа (HD-CAD — Hybrid Dust Collector and Detector).

С помощью такого детектора измеряют энергию и скорость частицы (а значит, оценивают ее массу) в реальном режиме времени, а также захватывают частицу, оставляя ее целостной. Аэрогель является мишенью, которая при ударном воздействии высвечивается, причем интенсивность высвечивания является функцией параметров частицы, направления ее траектории. По этим данным можно восстановить траекторию воздействия, используя двухмерную чувствительную ПЗС-матрицу снизу и пару линейных ПЗС-матриц по сторонам (рис. 11). Измерение скорости может быть сделано

с помощью обеих боковых ПЗС-матриц и сигналов разряда при пробивании тонкой пленки фторида поливинилидена (PVDF) толщиной 1—2 мкм с быстрой цифровой обработкой сигналов с помощью процессора. Полупрозрачный полимер (PVDF) имеет сильные пьезоэлектрические свойства, и электрические сигналы с него являются функцией механических напряжений, возникающих при ударном воздействии частицы.

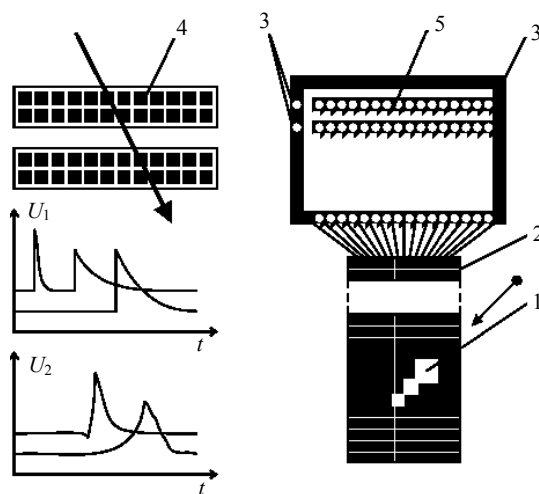


Рис. 11. Структура контейнера с аэрогелем и сигналы с обкладок при проникновении частиц:

- 1 — место удара микрометеороида; 2 — контейнер с ячейками; 3 — граничные ячейки; 4 — схема пробоя; 5 — структура ячеек

Самое важное преимущество этой системы над другими — широкое разнообразие ее приложения. Система регистрации может использоваться для непрерывного контроля большой продолжительности и неповреждающего сбора метеоритов и космического мусора, а также для миссий с возвращением на исходные тела метеороидов, комет и астероидов для того, чтобы захватить испускаемые частицы с их поверхности как приемники

STARDUST для комет и MUSES-C — для околоземных астероидов.

Другим перспективным направлением является предложенный в работе [10] проект создания детектора микрометеороидных и техногенных частиц в виде пленочной сферической конструкции на основе пленочных МДМ-структур (см. рис. 3), раскрываемой на высоте 800—1000 км от Земли. Детектор имеет приемопередающую аппаратуру, разгонный двигатель и является космическим аппаратом. Площадь чувствительной поверхности детектора может составлять 100—300 м<sup>2</sup>. Осуществляются оценка трех параметров частиц (вектор скорости, размер, плотность), а также оценки их элементного состава.

Запуск такого КА осуществляется с базового аппарата с высоты 300 км.

Важный научный интерес представляет регистрация элементного состава космической пыли (в частности, микрометеороидов). Авторами работ

[27, 32, 66—68] были поставлены эксперименты в лабораторных и космических условиях [29], однако разрешающая способность масс-спектрометра была низкой. В настоящее время разработаны различные варианты конструкций масс-спектрометров для определения элементного состава космической пыли [69—73] и выполнен комплекс работ по моделированию в лабораторных условиях [27, 68]. Разработанные конструкции пылеударных масс-спектрометров (рис. 12) имеют площади чувствительной поверхности ~300—400 см<sup>2</sup>, разрешающую способность порядка 80—100 [73]. В работе [70] описан динамический метод фокусирования ионных пакетов, позволяющий увеличить разрешающую способность до 500 (рис. 13). Описан способ повышения достоверности информации за счет введения источника ионов для получения спектров газовой составляющей собственной внешней атмосферы КА.

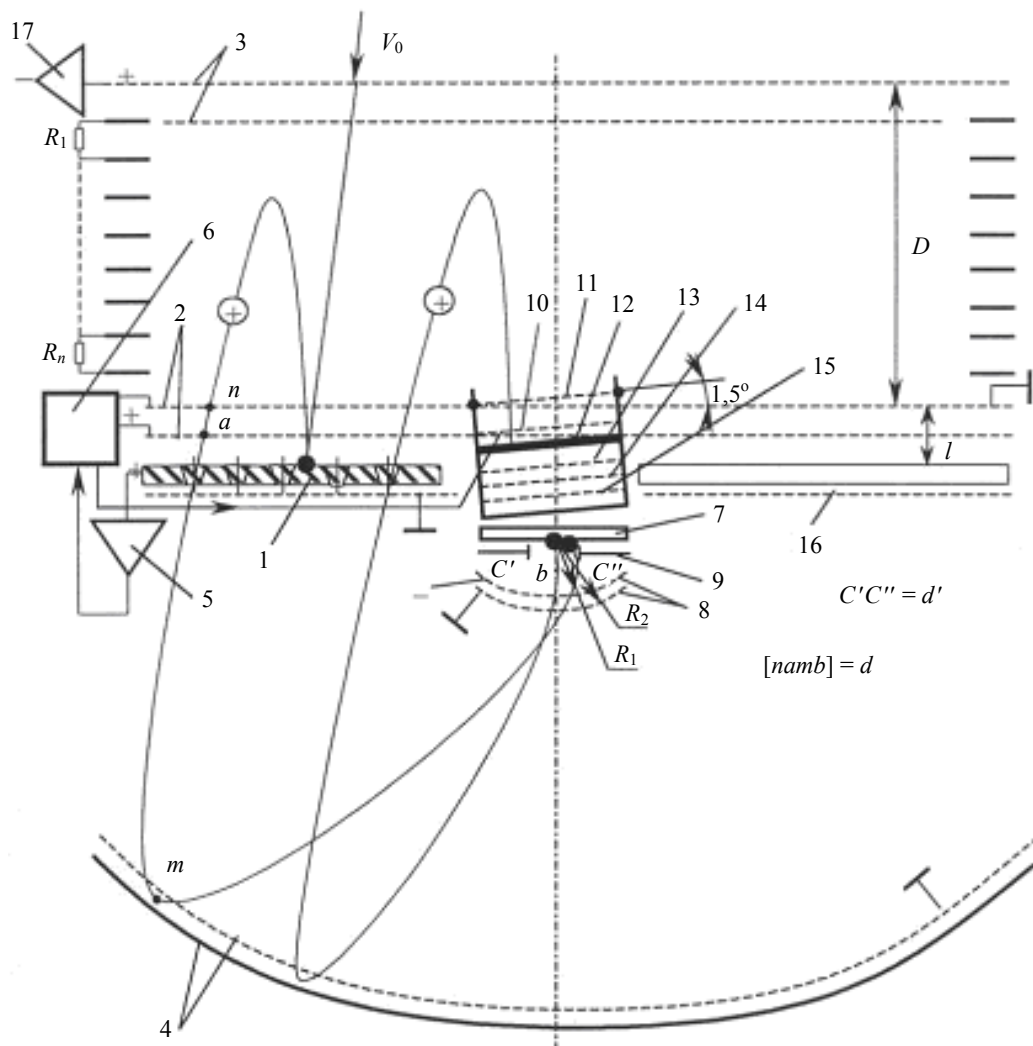


Рис. 12. Схема газопылевого масс-спектрометра:

- 1 — мишень; 2 — ускоряющие сетки; 3, 4 — электростатические отражатели; 5 — усилитель-формирователь;
- 6 — ключ; 7 — приемник ионов (МКП); 8, 9 — фокусирующая система; 10—15 — источник ионов; 16 — заземляющая сетка;
- 17 — зарядочувствительный усилитель

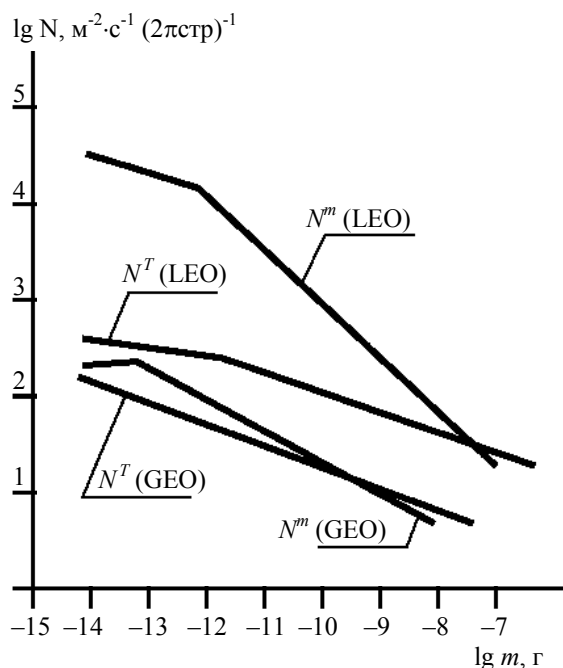


Рис. 13. Расчетные значения соударений для сферического ионизационно-конденсаторного преобразователя

### Заключение

Дальнейшая перспектива решения проблемы регистрации и изучения характеристик частиц космического мусора заключается в реализации таких проектов как Stardust [3] и КАИКС [10]. Совокупность косвенных и прямых методов, объединенных вместе на одном КА, представляет в будущем наиболее эффективный проект по регистрации и измерению характеристик космической пыли. Более детальное изучение физико-химических характеристик микрометеороидов предполагает разработку более совершенной аппаратуры на основе применения времяпролетного масс-спектрометра специальной конструкции с улучшенными характеристиками.

За период 2007—2012 гг. предполагается проведение исследований комет и астероидов, а также шести небольших спутников Марса и Юпитера. Две из таких миссий запланированы с возвращением, а на остальных аппаратах запланированы и уже проводятся прямые измерения космической пыли в различных частях Солнечной системы от орбиты Меркурия до Сатурна. Запущены четыре космических аппарата для сбора пыли с возможностью послеполетных исследований ударных взаимодействий на низких орбитах.

Образцы кометной пыли, доставленные на Землю STARDUST, и астероидной пыли, доставленных MUSEC-C, HD-CAD на низкой орбите (LEO), позволят уточнить количество метеорного вещества, выпадающего на Землю.

### Литература

1. Potter A. Measuring the orbital debris population// Earth Space Review. 1995. V. 4. № 3.
2. Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор)//Сб. науч. тр./ Под ред. А. Г. Масевича. — М.: Космоинформ, 1995. — 121 с.
3. Brownlee D. E. Stardust: Sunpliny Early Star System// JPL Fact Sheet, Jfel, May, 1996.
4. Whipple F. L.// Astrophys. J. 1951. № 113. — 464 p.
5. Dohnanyi J. S., Geophys. J.// Res. 1970. № 75.— 3468 p.
6. McDonnell J. A. M.// Sp. Res. 1971. № 11. — 415 p.
7. Анати И., Васюкова З. В., Кащеев Б. Л., Рыбаков А. К. и др. Результаты исследования метеорного вещества на ИСЗ "Интеркосмос-14" и сопутствующих наземных наблюдений метеоров// Космические исследования. Т.МХ. 1981. Вып. 5. С. 790—794.
8. Kessler D. J., Reynolds R. C., Anz-Mlador D. D. Orbital Debris Enviroment for Spacecraft in how Earth Orbit., NASA, TM-100-471. April. 1989.
9. Chobotov V. A. Dynamics, of Orbiting Debris Clouds and the Resulting Collision Hazard to Spacecraft. International Astronautical Federation Paper, 87—571, Oct. 1987.
10. Балакин В. Л., Белоконов И. В., Семкин Н. Д., Воронов Д. Е. Математическая модель преобразователя частиц космического мусора// Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 1998. № 1(5). С. 53—61.
11. Маркелова Е. С., Семкин Н. Д. Прогноз метеорной активности для космических аппаратов, находящихся на орбите Земли// Вестник СГАУ. Сер. Актуальные проблемы радиоэлектроники. 1999. Вып. 1.
12. Высокоскоростные ударные явления/ Под ред. В. Н. Николаевского. — М.: Мир, 1973. — 534 с.
13. Мерзиевский Л. А., Тутов Б. П., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростное метание твердых тел// Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 5. С. 7791.
14. Крыса В. К., Евдокимов А. Н., Матухин П. Г. и др. Вакуумные испытательные комплексы для ускорения мелкодисперсных частиц// Тр. Всес. науч.-практич. конф. "Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем КА". — Л. Апрель. 1990. С. 37—45.
15. Златин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин Г. И. и др. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. — М.: Наука, 1974. — 273 с.
16. Simpson J. P., Witteborn F. C. Effect of the shuttle contaminant Environment on a sensitive infrared telescope// Applied optics. 1997. V. 16. № 8. P. 2051—2073.
17. Баренгольц Дж. В. Прилипание частиц к поверхности в вакууме// Аэрокосмическая техника. 1989. № 1. С. 100—109.
18. Швецов Г. А., Анисимов А. Г., Тутов В. М. Рельсотронные ускорители макрочастиц. 4.1, 4.2. Общие характеристики// Докл. на IV междунар. конф. по генерации мегагаусных магнитных полей и родственным экспериментам. — Санта-Фе. США. 17 июля 1986. С. 311—530.
19. Scully C. N. et al. Symp. Hypervelocity Impact 7th// Tampa, Florida. NOV. 1964. P. 123.
20. Carlson R. E., Fager J. A. Conf. AJAA Structure and Materials// 6th, Palm. Springs. California. Apr., 1965.
21. Frichemcht J. P. A Hypervelocity microparticle linear accelerator// Nuclear instruments and methods. 1976. V. 28. P. 70—78.
22. Семкин Н. Д. Исследование характеристик конденсаторного датчика для регистрации твердых частиц с помощью импульсного лазера// Известия вузов СССР. Сер. Приборостроение. 1986. Т. XXIX. № 8. С. 60—64.
23. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Кондрашов В. Н. Исследование характеристик ионизационно-конденсаторного пре-

образователя пылевых частиц, полученных с помощью импульсного лазера: Препринт ТРИНИТИ 0040-А. ЦНИИАтоминформ, 1998.

24. Сёмкин Н. Д. Регистрация высокоскоростных потоков пылевых частиц// Тр. Всес. науч.-практич. конф. "Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем КА." — Л. Апрель, 1990. С. 31—36.

25. Физика быстропротекающих процессов/ Под ред. Б. А. Златина. — М.: Наука, 1971. — 327 с.

26. Вакуумные электростатические комплексы для ускорения мелкодисперсных частиц/Крыса В. К., Евдокимов А. Н., Матухин П. Г. и др.// Тр. Всес. науч.-практич. конф. "Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем КА." — Л. Апрель, 1990. С. 37—45.

27. Сёмкин Н. Д. Исследование характеристик пылевых частиц с помощью электростатического ускорителя. Деп. в ВИНТИ. 6709-B87, 1987. — 48 с.

28. Сёмкин Н. Д., Новиков Л. С., Куликаускас В. А. Масс-спектрометрия ионов, имитируемых при соударении микрометеоритных частиц с материалами// ФХОМ, 1989. № 6. С. 49—56.

29. Dietzel H., Eichhorn G., Fechtig H. et al. The Heos 2 and Helios micrometeoroid experiments// J. Phys. E. (Sci. Instrum.), 1973. V. 6. № 3. P. 209—217.

30. Сёмкин Н. Д. Исследование ионизационного метода измерения параметров твердых частиц// Датчики и устройства систем управления и контроля: Сб. науч. тр. — Куйбышев, 1985. С. 105—109.

31. Drapats S., Michel K. W. Theory of shock-wave ionization high-velocity Impact of Micrometeorites// HZ Naturforsch. 1974. V. 29a. P. 870—879.

32. Сёмкин Н. В., Семегчук С. М., Юсупов Г. Я. Эффект стационарного свечения канала проводимости ударно-сжатого диэлектрика, МДМ-структуры// Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 6. С. 517—521.

33. Portnyagin Yu. I., Kluev O. F., Semkin N. D. et al. Simulation of cosmic man-made dust effects of space vehicle elements in Rocket and Laboratory experiments. The XXIII wheeling of COSPAR June-July, 1990. The Hague The Netherlands.

34. Портнягин Ю. И., Ключев О. Ф., Шидловский А. А., Сёмкин Н. Д. и др. Ракетные эксперименты по моделированию воздействия компонентов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на материалы и системы космических аппаратов. Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов// Тр. Всес. науч.-практич. конф. — Л., 1990. С. 10—18.

35. Сёмкин Н. Д. Анализ методов регистрации высокоскоростных частиц и их синтез. Деп. в ВИНТИ. 8566-B87. 1987. — 37 с.

36. Бuzдыгар Т. В., Ключев О. Ф., Пасынков С. Г., Сёмкин Н. Д. и др. Методы и средства диагностики гетерофазных потоков и эффектов их взаимодействия с материалами и системами космических аппаратов в ракетном эксперименте. Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов// Там же. С. 18—31.

37. Nazarova T. N.// Sp. Sci. Rev. 1968. № 8. P. 455.

38. Alexander W. M., Secretan L., McCracken C. W., Berg O. E.// Sp. Res. 1963. № 3. P. 891.

39. Nilsson C.// Sci. 1966. V. 153. № 3741. P. 1242.

40. Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве. Материалы научных съездов и конференций. — М.: Наука, 1973. — 212 с.

41. Einhorn G. Measurements of the light flash produced by high velocity particle impact// Planet. Space Sci. 1959. P. 771.

42. Bring E. R. Micrometeorite measurements from 1958 alpha and gamma satellites// Planet and Space Sci. 1959. V. 1. № 1. P. 27—31.

43. D'Aiutolo C. T. Satellite measurements of the meteoroid environment. Ann. New York// Acad. Sci. 1964. V. 119. P. 82—97.

44. LaGow H. E., Secretan L. The micrometeorite penetration experiment. — NASA Techn. Note D-608, 1960.

45. Alwarez M., Humes D. H., Kinard W. H., O'Neal R. L. The interplanetary and near Jovian dust environment: some experimental results// Space Res. 1975. V. 15. P. 549—554.

46. D'Aiutolo C. T., Kinard W. H., Naumann R. J. Recent NASA meteoroid Penetration results from satellites. — Smithson// Contris Astrophys. 1967. V.11. P. 239—251.

47. Tomandl D. A., Brownlee D. E., Olszewski E. W., Hodge P. W. Laboratory analysis of inter planetary dust// Pubs Astron. Soc. Pacif. 1977. V. 89. № 35531. P. 623.

48. Semkin N. D., Balakin V. L., Shkumistov V. M., Chochua G. G., Voronov K. E. Prospects of use of inflatable film structures for the purpose of study of pollution of terrestrial space be natural and artificial particles: Proceeding of the Second European conference on space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17—19 March 1997 (ESA SP-393, May, 1997).

49. Назарова Т. Н., Рыбаков А. К., Комиссаров Г. Д., Васюкова З. В., Орлов И. И.// Космические исследования. 1969. Т. 7. № 5. — 795 с.

50. Breisacher P., Mahudevan P. Impact of liquid hydrazine on heated surface in the low-pressure space environment// AIAA. Shuttle environment and operations meeting a collection of technical papers. 1983. P. 127—130.

51. Adams N. G., Smith D. Studies of microparticle impact phenomena Leading to the development of a highly sensitive micrometeoroid Detector// Planet and Space Sci. 1971. V. 19. P. 195—204.

52. Bedford D. K. Observations of the micrometeoroid flux from Prospero// Proc. Roy. soc. — London, 1975. V. A343. № 1633. P. 277—287.

53. Bedford D. K., Sayers J. The near-earth micrometeoroid flux from the Satellite Prospero// Space Res. 1973. V. 13/2. P. 1063—1069.

54. Semkin N. D., Novikov L. S., Voronov K. E., Bonin D. G., Pomelnikov R. A., Rotov S. V. Detector of micrometeoroid and artificial space Debris particles// Space Debris. 2000. № 2. P. 273—293.

55. Макдонелл Ж. А. М. Обзор замеров частиц пыли, сделанных в отдаленных точках космического пространства: XII конф. КОСПАР. — Л., 1970.

56. Лебединец В. Н. Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль.— Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 215 с.

57. McDonell J. A. M. Space Debris : Orbital Microparticles Impacting LDEF Experiments Favor a Natural Extraterrestrial Origin// LPSC Abstracts. 1991. V. XXII. LPSC.

58. Сагдеев Р. З., Кисель И. и др. Первые результаты измерений элементного состава пылевых частиц кометы Галлея, полученные приборами ПУМА в проекте "Вега"// Письма в АЖ. 1986. Т. 12. № 8.1.

59. McDonell J. A. M., Sullivan K. Foil Perforation Particle Impact Records on LDEFMAP A0023: Incident Mass Distributions// First LDEF Post-retrieval Symposium, NASA CP-3134, 1992.

60. Анати И., Васюкова З. В., Кауцев Б. Л. и др. Результаты исследования метеорогического вещества на ИСЗ "Интеркосмос-14" и сопутствующих наземных наблюдений метеоров// Космические исследования. 1981. Т. XIX. Вып. 5. С. 790—794.

61. Novikov L. S., Voronov K. E., Semkin N. D., Verkhoturov V. M., Grabodatsky D. S., Maksimov I. A. Measurements of Solid Micro-Particle Fluxes in Geosynchronous Orbit. Proceedings of symp. on Environment Modelling for Space-based Application// ESTEC Nordwik 18—20 Nov. 1996. ESA. SP-392. 1996.



62. Novikov L. S., Voronov K. E., Semkin N. D., Verkhovurov V. M., Grabodatsky, D. S., Maksimov I. A. Attempt of measurement of space debris microparticle flux in geosynchronous orbit. Proceeding of the Second European Conference on Space Debris. ESOC. Darmstadt. Germany, 1997.
63. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С., Богоявленский Н. Л. Ударно-сжатые пленочные структуры металл—диэлектрик—металл при высокоскоростном соударении микрометеорных и техногенных частиц// ПТЭ, 2005. С. 1—7.
64. Семкин Н. Д., Воронов К. Е. Проводимость ударно-сжатых МДМ структур на основе полиметилметакрилата// ЖТФ. 1998. Т. 68. № 8. С. 63—66.
65. Drolshagen G., Svedhem H., Grun E. G., Grafodatsky O., Verhoturov V., Prokopiev U., Gusyelnikov V. In Sity Measurement of cosmic Dust and space Debris in the Geostationary orbit// Proceedings of the Second European Conference on Space Debris. ESOC. Darmstadt. Germany 17—19 March, 1997.
66. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Богоявленский Н. Л. Проводимость ударно-сжатого канала пленочной МДМ-структуры в режиме стационарного свечения// ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 1. С. 85—89.
67. Austin D. E. Impact-ionization mass-spectrometry of cosmic dust. California Institute of Tehnology Pasadena, California, 2003. № 5. P. 178.
68. Austin D. E., Heidi L. K. Manning, Carl Z. Bailey and atoll. Hypervelocity Microparticle Impact Studies using a Novel Cosmic Dust Mass-spectrometr// Journal of Geophysic. 2003. V. 108, ES, 503. doi 101029/2002 YE 001947.
69. Семкин Н. Д., Воронов К. Е. Пылеударный масс-спектрометр: Пат. 2122257 Россия; Опубл. 20.11.98; Бюл. № 32.
70. Газопылеударный масс-спектрометр/ Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Помельников Р. А., Пияков И. В.: Пат. 2231860 Россия, МПК Н 01 J 49/40; Бюл. № 18 от 27.06.2004.
71. Газопылеударный масс-спектрометр/ Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Помельников Р. А., Пияков И. В.: Пат. 2235386 Россия, МПК Н 01 J 49/40; Бюл. № 24 от 27.08.2004.
72. Семкин Н. Д., Пияков И. В., Воронов К. Е., Помельников Р. А. Перспективы развития времяпролетных масс-спектрометров для анализа газовых и пылевых частиц// Прикладная физика. 2002. № 2. С. 124—142.
73. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Мясников С. В., Помельников Р. А. Газопылеударный масс-спектрометр// ПТЭ. 2002. Т. 45. № 1. С. 107—112.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2008 г.

## Registration of a spase artificial and natural dust

N. D. Semkin, K. E. Voronov, A. V. Piyakov, I. V. Piyakov  
Korolev's Samara State Space University, Samara, Russia

*Varios models of a meteoric environment and space debris have been considered, the forecast of meteoric activity for the nearest five-years period has been given, and also the review of methods and means of registration and measurement of physical and chemical characteristics of micrometeoritic and technogenic particles is given.*

PACS: 07.50.-e

УДК 533.9.07:53.086:535.548

## Радиография микро- и нанообъектов в мягком рентгеновском излучении фемтосекундной лазерной плазмы

С. В. Гасилов, И. Ю. Скобелев

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

Т. А. Пикуз, А. Я. Фаенов

Канзайский институт оптических наук; Японское агентство по атомной энергии, Киото, Япония

*Исследованы спектр излучения, спектральная яркость и размер источника рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучений на основе фемтосекундной лазерной плазмы. Мягкое рентгеновское излучение этого источника было использовано для абсорбционной и фазово-контрастной радиографии микро- и нанообъектов. Кристаллы фторида лития применялись для регистрации рентгеновских изображений с субмикронным пространственным разрешением.*

PACS: 06.30.-k

### Введение

Получение изображений с помощью жестких рентгеновских лучей является важным методом

диагностики, который позволяет изучить внутреннюю структуру предмета без его разрушения. Однако изображения некоторых предметов, полученные с помощью традиционной рентгеновской