

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ

2007 Н. Д. Семкин, В. Л. Балакин, И. В. Белоконов, К. Е. Воронов

Самарский государственный аэрокосмический университет

На основе модели метеорного и техногенного окружения проведен расчет числа соударений частиц с космическим аппаратом (КА), выполняющим функцию их детектора и выполненным в виде надувной пленочной конструкции сферической формы. Сделаны оценки прогноза числа соударений на период 2004 – 2012 гг. и получены зависимости числа частиц, соударяющихся с поверхностью КА, как функции параметров его размеров и параметров орбиты.

Введение

Наиболее совершенным средством регистрации микрометеороидных и техногенных частиц является преобразователь [1, 2] на основе пленочной МДМ – структуры (металл – диэлектрик – металл), выполненный в виде двух concentрических оболочек (рис. 1), внешняя из которых служит чувствительной поверхностью, а внутренняя – приемником ионов [3, 4]. Такой преобразователь может быть изготовлен на больших рабочих площадях (100 – 300 м²).

1. Оценка числа соударений метеорных частиц с преобразователем

В рассматриваемой модели метеорного окружения принимаются следующие допущения.

1. Все метеорные частицы, находящиеся в сфере действия крупного небесного тела, движутся по кеплеровым орбитам.

2. Все метеорные частицы делятся на две группы:

- а) поточные метеорные частицы;
- б) спорадические метеорные частицы.

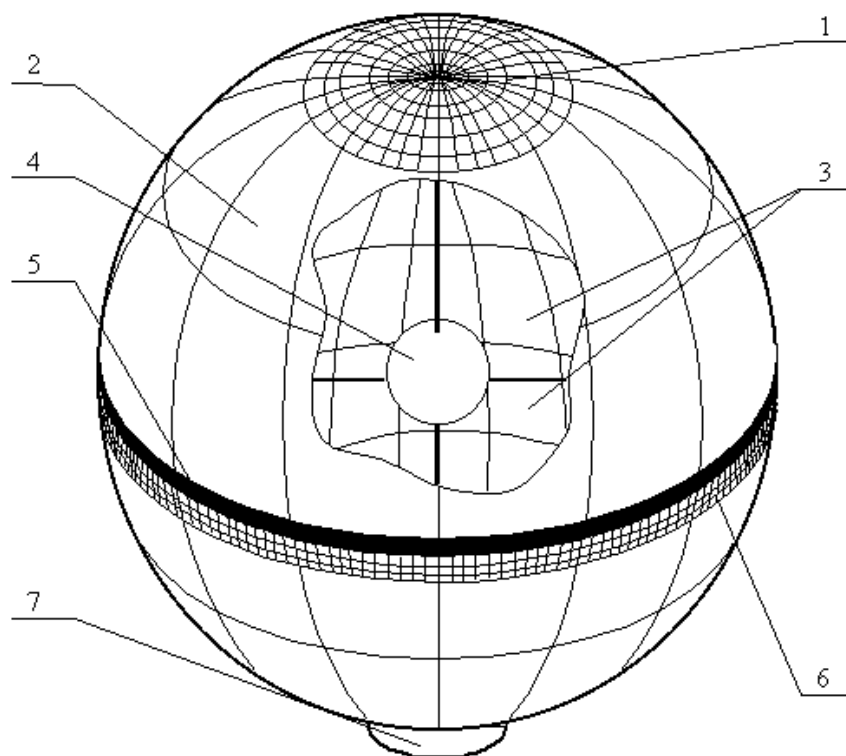


Рис. 1. Схема КА как преобразователя параметров частиц 1, 6 – пленочные солнечные батареи, 2 – внешняя общая пленочная оболочка, 3 – конденсаторные секции, 4 – приемник ионов, 5 – пленочная антенна, 7 – контейнер с научной аппаратурой

3. Задано распределение спорадических метеорных частиц по массе.

Рассчитанное в рамках данной модели общее число частиц (спорадических и поточных) с массой, большей m и попавших на i -ую площадку, площадь которой U_i за время $T = T_k - T_n$, где T_n - начало полета, T_k - время, соответствующее окончанию полета, определяется равенством

$$N_i = U_i \left(\int_{T_n}^{T_k} x_i a_k m^{-S_c} dt + \sum_{j \in J} \int_{T_n}^{T_k} x_{ij} a_j m^{-S_j} dt \right). \quad (1)$$

Здесь t – время экспонирования, с; x_i, x_{ij} – поправочные коэффициенты для спорадических и поточных метеорных частиц, соответственно; a_i, a_j, S_i, S_j – статистические коэффициенты.

Выражение (1) может быть упрощено [5]:

$$N_i^M = f U_i x_i T N_0(m), \quad (2)$$

где f – коэффициент безопасности, принимаемый равным 5; U_i – площадь i -го элемента, м²; T – время полета, сут; x_i – обобщенный поправочный коэффициент:

$$x_i = \frac{1}{T} K_{эс} K_{дс} \int_0^T K_{рз} dt = K_{эс} K_{дс} K_{рз}^{cp}; \quad (3)$$

$N_0(m)$ – коэффициент, зависящий от массы частицы:

$$N_0(m) = a m^{-b}. \quad (4)$$

Здесь a, b – статистические коэффициенты распределения:

$$lg a = \begin{cases} -7.5 & \text{при } m < 10^{-6} \text{ г,} \\ -9 & \text{при } m \geq 10^{-6} \text{ г,} \end{cases} \quad (5)$$

$$b = \begin{cases} 0.0167 & \text{при } m < 10^{-6} \text{ г,} \\ 1.1167 & \text{при } m \geq 10^{-6} \text{ г.} \end{cases}$$

Задача определения числа соударений спорадических и поточных метеорных час-

тиц с элементами поверхности КА сводится в основном к определению коэффициента x_i .

Входящий в (3) коэффициент $K_{рз}^{cp}$ зависит от положения орбиты КА и долготы Солнца, т.е. от положения Земли на гелиоцентрической орбите:

$$K_{рз}^{cp} = \frac{1}{N_L} \sum_{n=1}^{N_L} K_{рzn}, \quad (6)$$

где N_L – число расчетных орбит ($1 \leq v \leq N_L$).

Величина $K_{рzn}$ определяется как

$$K_{рzn} = 0.9 + 0.26 \sin I_\odot + \left(0.06 - 0.075 \sin \frac{I_\odot}{4} \cdot \sin(2i_{КА} - 180^\circ - 422 \sin(I_\odot - 135^\circ) - \Omega_{КА}) \right)$$

где $I_\odot = \frac{360}{365} C_y - 80^\circ$ – долгота Солнца, град;

C_y – время, прошедшее с начала года, сут;

$i_{КА}$ – наклонение орбиты КА, град; $\Omega_{КА}$ – долгота восходящего угла орбиты КА, град.

Коэффициент $K_{дс}$, учитывающий движение КА по орбите или неравномерность числа соударений на его лобовую и тыльную стороны, определяется как

$$K_{дс} = 1 + \overline{v}_k \cos g, \quad (7)$$

где $\overline{v}_k = \frac{v_n}{v_m} \approx 0.4$, v_n – скорость КА (8 км/с),

v_m – скорость метеорной частицы (20 км/с), g – угол между нормалью к поверхности КА и вектором скорости.

Коэффициент $K_{эс}$, учитывающий положение экспонируемой площадки относительно вертикали, проходящей через эту площадку, и расстояние этой площадки от центра Земли, определяется по соотношению:

$$K_{эс} = \begin{cases} 1, & \text{если } j_i \leq (90^\circ - f); \\ 1 - \frac{(1 - \cos f) f - 90^\circ + j_i}{2f}, & \text{если } (90^\circ - f) < j_i < (90^\circ + f); \\ \cos f, & \text{если } (90^\circ + f) \leq j_i \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь j_i – угол между нормалью к поверхности элемента КА и зенитом,

$$j = \arcsin\left(\frac{R_3}{R_3 + H}\right),$$

R_3 – радиус сферической Земли,

H – высота орбиты.

Для оценки числа соударений метеорных частиц с преобразователем его сфера с радиусом R разбивается на элементарные участки площадью dU_i (рис. 2):

$$dU_i = dx dy, \quad (9)$$

где

$$dx = R da,$$

$$dy = r db,$$

$$r = R \sin a.$$

Тогда

$$dU_i = R^2 \sin a da db. \quad (10)$$

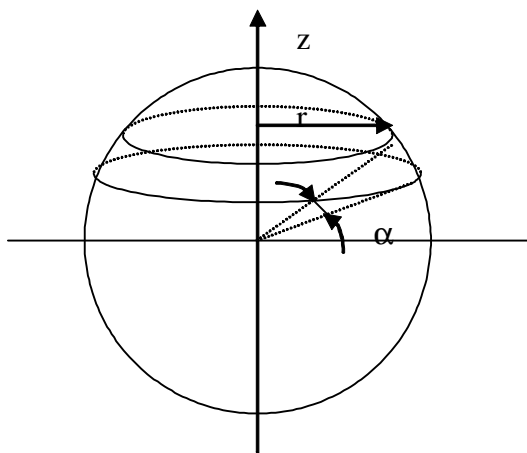
Число частиц, попадающих на элементарную площадку за время t :

$$dN_i^M = f x_i N_o(m) dU_i t = f x_i N_o(m) t R^2 \sin a da db. \quad (11)$$

Число частиц, попадающих на всю сферу преобразователя:

$$N^M = \int_0^p \int_0^{2p} f x_i(a, b) N_o(m) t R^2 \sin a da db$$

или



$$N^M = f R^2 N_o(m) t \int_0^p \int_0^{2p} x_i(a, b) \sin a da db, \quad (12)$$

где $x_i(a) = K_{zc} K_{oc} K_{pz}^{cp}$;

$$K_{zc} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i \leq (90^\circ - f); \\ 1 - \frac{(1 - \cos f) f - 90^\circ + a_i}{f}, & \text{если } (90^\circ - f) < a_i < (90^\circ + f); \\ \cos f, & \text{если } (90^\circ + f) \leq a_i \leq 180^\circ, \end{cases}$$

(13)

a_i – угол между нормалью к поверхности элемента КА и зенитом.

Тогда (12) примет вид:

$$N^M = f R^2 N_o(m) t \int_0^p \int_0^{2p} K_{zc}(a) K_{oc} K_{pz}^{cp} da db = \tilde{K} \int_0^p K_{zc}(a) da, \quad (14)$$

где $\tilde{K} = 2 p f R^2 N_o(m) t K_{oc} K_{pz}^{cp}$.

Используя свойства интеграла, выражение (14) после преобразований можно записать следующим образом:

$$N^M = f p^2 R^2 N_o(m) K_{oc} K_{pz}^{cp} (1 + \cos f) t. \quad (15)$$

Таким образом, число соударений с преобразователем метеорных частиц с массой более m определяется в развернутом виде выражением

$$N^M = f p^2 R^2 a m^{-b} (1 + \bar{v}_k) \frac{1}{N_L} \sum_{n=1}^{N_L} ((0.9 + 0.26 \sin I_\Theta + (0.06 - 0.075 \sin \frac{I_\Theta}{4} \times \sin(2i_{кл} - 180^\circ - 42.4 \sin(I_\Theta - 135^\circ) - \Omega_A))) (1 + \cos f) t. \quad (16)$$

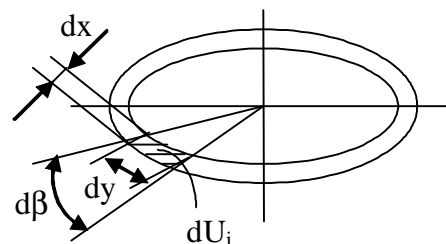


Рис. 2. Пленочный сферический преобразователь

2. Определение критической массы частиц

Встреча КА с метеорными и техногенными частицами является случайным событием. Поэтому, используя вероятностную модель метеорного окружения, можно определить и вероятность встречи поверхности преобразователя хотя бы с одной частицей, масса которой больше m :

$$P_{\text{встр}} = 1 - e^{-N}, \quad (17)$$

где N – число соударений со всей поверхностью КА.

Не каждое соударение сопровождается пробоем оболочки преобразователя. Плотность частиц, скорость соударения и направление удара – также случайные параметры. В соответствии с рекомендациями COSPAR принято, что соударения происходят по нормали со скоростью $v = 20$ км/с и что плотность частицы $r = 2,5$ г/см³. В этом случае при заданной конструкции оболочки преобразователя расчетным или экспериментальным путем можно определить критическую массу частицы $m_{\text{кр}}$, превышение которой приведет к появлению пробоины в оболочке.

Для определения $m_{\text{кр}}$ можно использовать зависимость глубины проникновения частицы в материал оболочки от параметров ее движения и характеристик ударника (частицы) и мишени (оболочки) [6]:

$$\frac{P}{d_p} = 1.5 \left(\frac{r_p}{r_t} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{r_p v^3}{2S_t} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (18)$$

где P – глубина проникновения, м; d_p – диаметр ударника, м; v – скорость ударника, м/с; S_t – константа деформационной прочности мишени, 1/кгм; r_p, r_t – соответственно плотность ударника и мишени, кг/м³.

Отсюда

$$d_p = \frac{P}{1.5} \left(\frac{2r_t S_t}{r_p^2 v^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (19)$$

Минимальный диаметр частицы, способной пробить оболочку, равен

$$d_{\text{пкр}} = \frac{d_{\text{оул}}}{1.5} \left(\frac{2r_t S_t}{r_p^2 v^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (20)$$

где $d_{\text{оул}}$ – толщина оболочки преобразователя, м.

Минимальный объем проникающих частиц в предположении сферической формы частицы равен:

$$V_{\text{кр}} = \frac{4}{3} p \left(\frac{d_{\text{пкр}}}{2} \right)^3. \quad (21)$$

Следовательно, критическая масса части равна:

$$m_{\text{кр}} = r_p V_{\text{кр}} = 0.01 p \frac{r_t S_t}{r_p V^2} d_{\text{оул}}^3. \quad (22)$$

При $r_t = 2.0$ г/см³ и $d_{\text{оул}} = 20$ мкм критическая масса частицы равна $6,5 \cdot 10^{-3}$ кг.

3. Определение числа частиц, пробивающих оболочку преобразователя

Выше определено количество соударений с преобразователем частиц, масса которых более m , за интервал времени t .

Число частиц, пробивающих оболочку преобразователя за время экспонирования t , определим, подставив в (4) выражение для критической массы $m_{\text{кр}}$. Число метеорных частиц, пробивающих оболочку, равно:

$$N_{\text{кр}}^M = f p^2 R^2 N_0 (m_{\text{кр}}) K_{\text{дс}} K_{\text{рз}}^{\text{ср}} (1 + \cos f) t. \quad (23)$$

Число техногенных частиц, пробивших оболочку, равно:

$$N^T = 0.08 p F_{\text{об}}(i, h_a, h_p, e, \Omega, T, w) g \times \\ \times m_{\text{кр}}^{-\Theta} ((d_0 + d_{\text{max}})^3 - (d_0 + d)^3) vt. \quad (24)$$

Суммарное число частиц, пробивающих оболочку за время t , равно:

$$N_{\text{кр}}^{\Sigma} = N_{\text{кр}}^M + N_{\text{кр}}^T. \quad (25)$$

Зная $N_{\text{кр}}^M$ и $N_{\text{кр}}^T$, можно оценить количество соударений частиц с преобразовате-

лем, при которых не нарушается целостность его оболочки:

$$N_{\text{нпр}}^{\Sigma} = N_{\text{нпр}}^M + N_{\text{нпр}}^T = (N^M(m_{\text{min}}) - N^M(m_{\text{кр}})) + (N^T(m_{\text{min}}) - N^T(m_{\text{кр}})), \quad (26)$$

где $N_{\text{нпр}}^M$ и $N_{\text{нпр}}^T$ – соответственно число соударений метеорных и техногенных частиц, не приводящих к пробиванию оболочки; m_{min} – минимальная регистрируемая масса.

4. Результаты моделирования

Моделирование проводилось с целью определения числа соударений метеорных и техногенных частиц с преобразователем при следующих исходных данных:

вид орбиты – эллиптическая с наклоном $i = 51^\circ$; долготой восходящего узла $\Omega = 150^\circ$; высотой апогея $h_a = 3.6 \cdot 10^4$ км; высотой перигея $h_p = 5.0 \cdot 10^2$ м; эксцентриситетом $e = 0.73$;

относительная скорость КА $v_k = 0.4$;

скорость частиц $v_m = 25$ км/с, максимальный размер техногенных объектов $d_{\text{max}} = 1.0$ м.

По результатам моделирования получены следующие значения искомых величин:

$$N_{\text{кр}}^M = 108.2; N_{\text{кр}}^T = 96.4; N_{\text{кр}}^{\Sigma} = 204.6.$$

Особый интерес представляет зависимость величин $N^M(m)$ и $N^T(m)$ от орбиты КА (рис. 3).

На рисунках 4 - 7 показаны зависимости числа соударений от массы частиц (в граммах) для различных диаметров КА и параметров его орбиты.

Существует сложная зависимость числа соударений техногенных частиц N^T от параметров орбиты КА.

Так, например, $N^T(i = 40^\circ) > N^T(51^\circ) > N^T(30^\circ)$.

5. Прогноз взаимодействия метеорных потоков с КА на 2004 – 2012 гг.

Потоки метеорного вещества являются результатом захвата гравитационным полем Земли вещества метеорных роев, возникающих при гравитационном воздействии планеты Юпитер на пролетающие мимо ядра комет.

Скорость метеоров лежит в пределах 30-70 км/с. Плотность потока метеоров различна.

На рисунке 8 показана схема метеорного роя.

Как видно из рис. 8, в зависимости от периода вращения метеорного роя возможны различные ситуации: от однократного прохождения Земли сквозь метеорный рой за один период его обращения вокруг Солнца до многократного прохождения при больших периодах обращения.

В последнем случае количество попадания метеорного вещества будет меняться

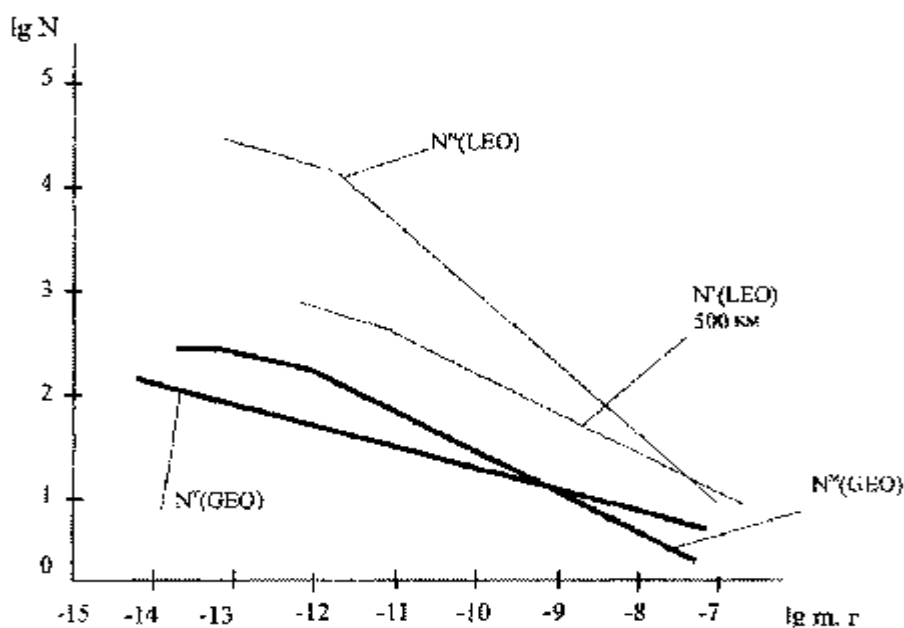


Рис. 3. Зависимость $N^M(m)$ и $N^T(m)$ от параметров орбиты КА LEO – низкая околоземная орбита, GEO – геоцентрическая орбита

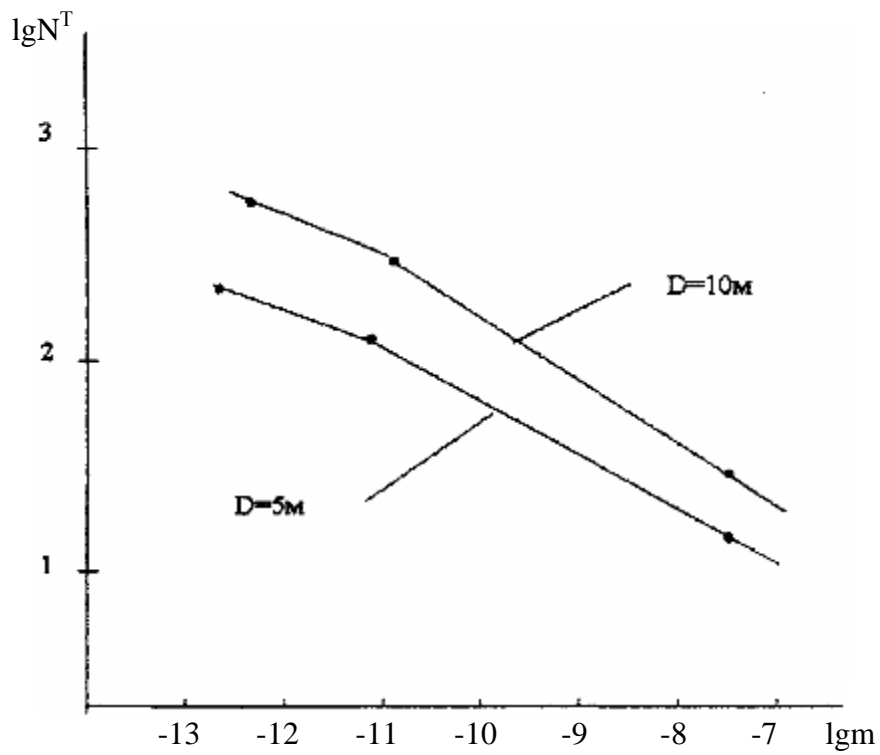


Рис. 4. Зависимость числа соударений техногенных частиц от диаметра КА (круговая орбита)

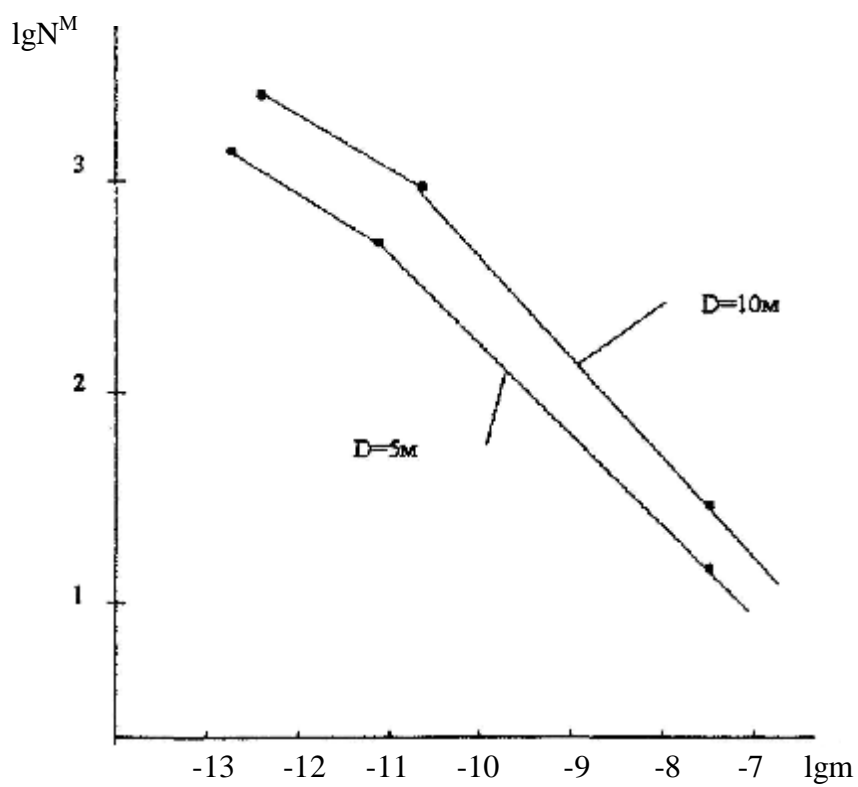


Рис. 5. Зависимость числа соударений микрометеороидных частиц от диаметра КА (круговая орбита)

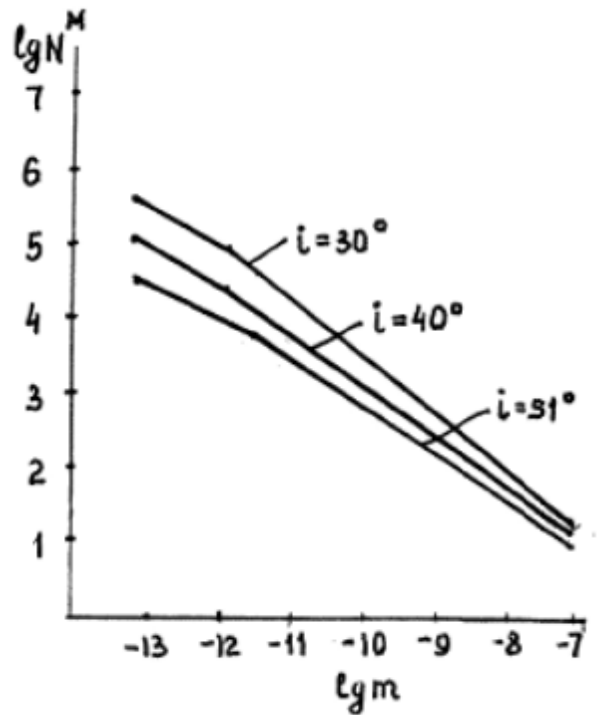
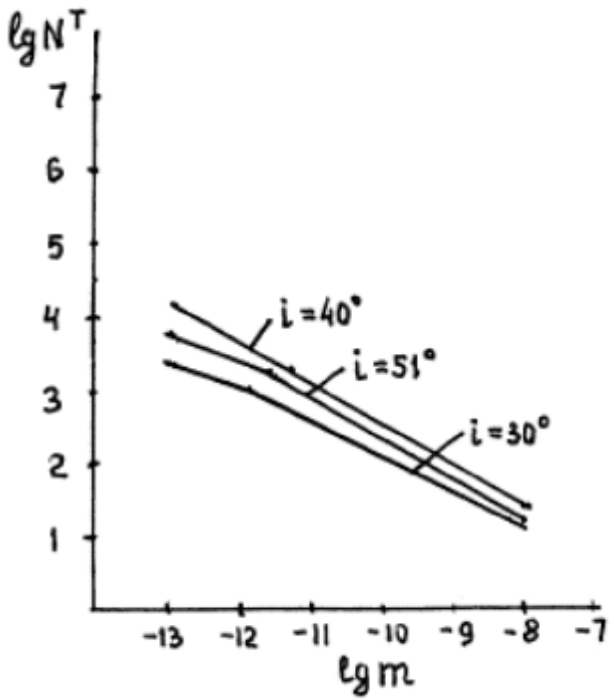
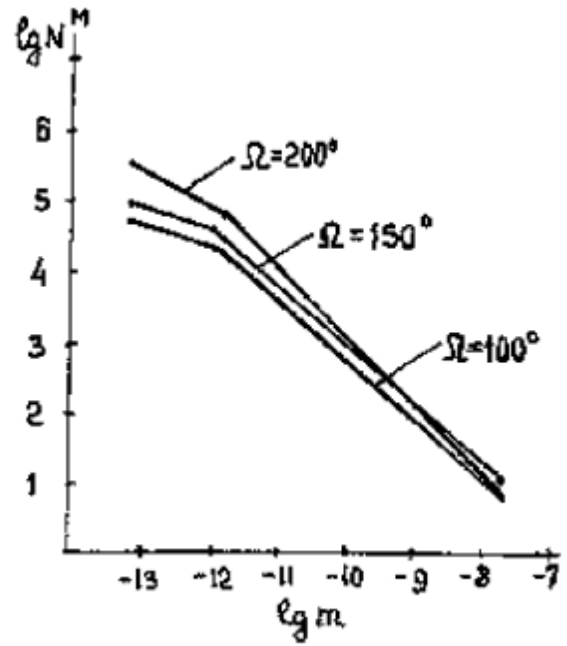
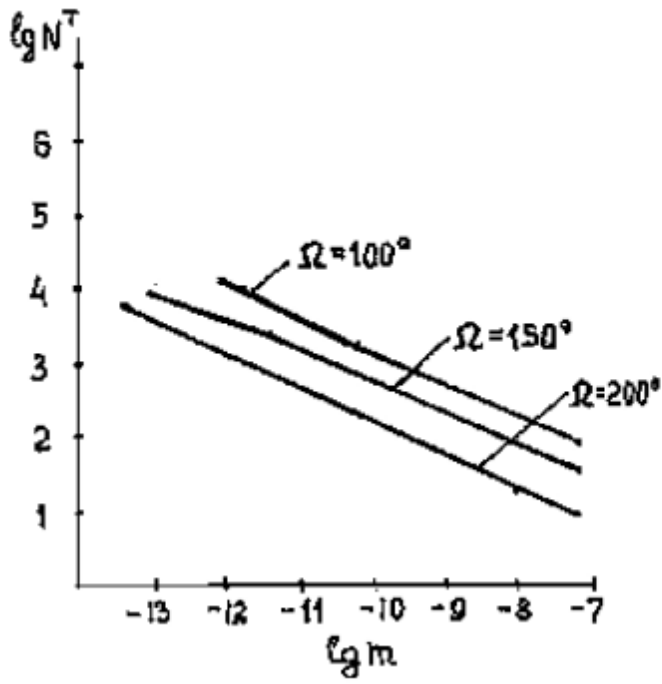


Рис. 6. Зависимость числа соударений метеороидных и техногенных частиц от параметров эллиптической орбиты

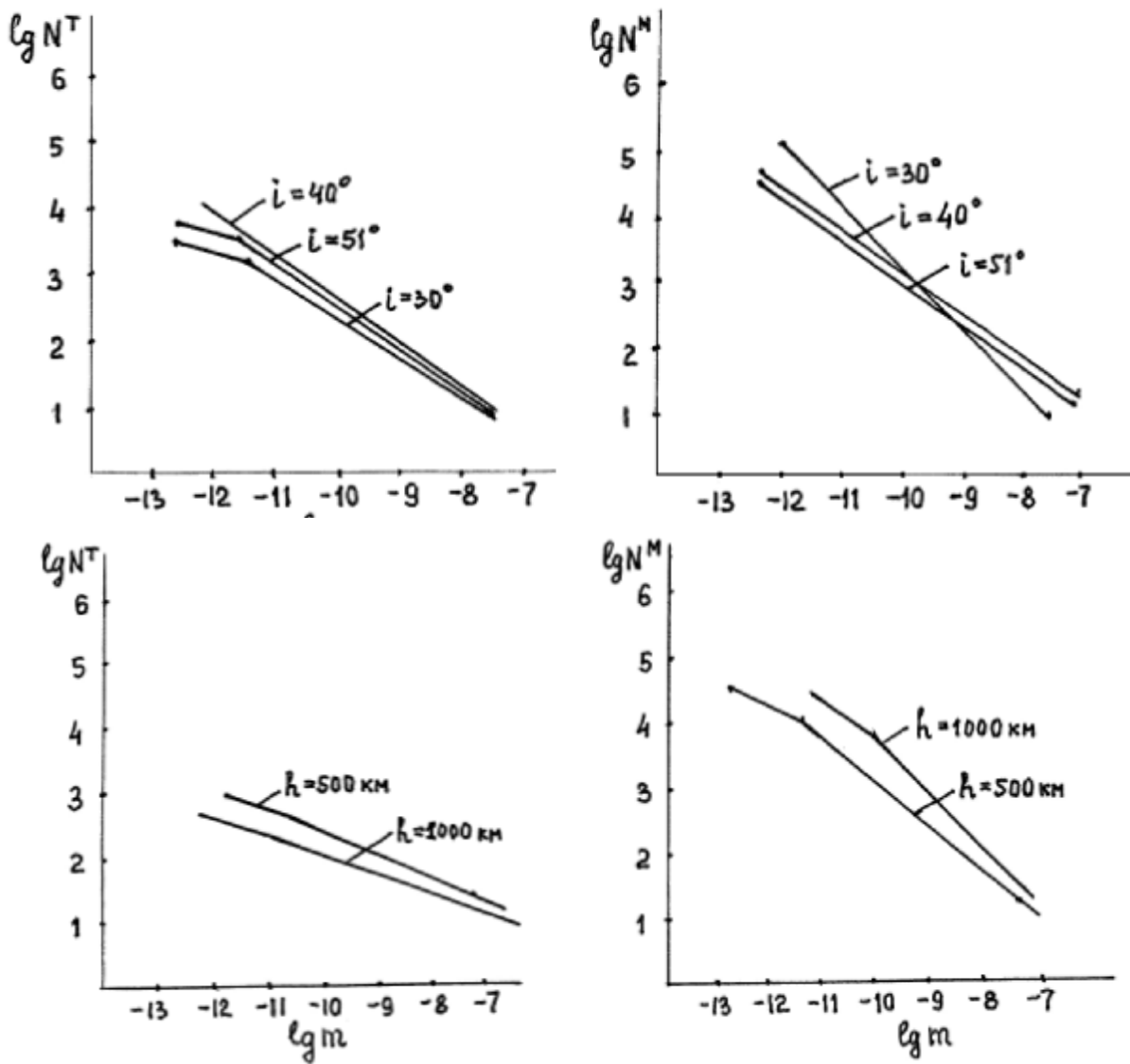


Рис. 7. Зависимость числа соударений метеороидных и техногенных частиц от параметров круговой орбиты

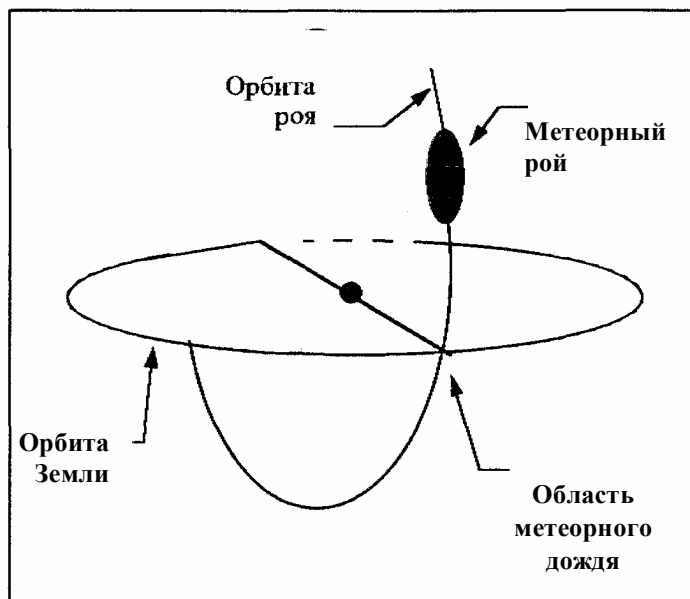


Рис. 8. Схема метеорного роя

от года к году вплоть до его исчезновения на длительное время. Так, например, метеорный рой Драконида, бывший очень обильным в 1946 году, далее долгое время практически не наблюдался вплоть до 1998 года.

Поэтому расчет плотности метеорного вещества проводился в несколько этапов. На первом этапе в приближении задачи трех тел рассчитывается прохождение кометы вблизи Юпитера, и при этом в точках Лагранжа L1 и L2 возникают метеорные рои. Положение метеорных роев находится из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_0 x_0 + m_1 x_1 + m_2 x_2 &= 0, \\ -n^2 x_1 + fm_0 \frac{x_1 - x_0}{\Delta_{01}^3} + fm_2 \frac{x_1 - x_2}{\Delta_{12}^3} \\ -n^2 x_2 + fm_0 \frac{x_2 - x_1}{\Delta_{12}^3} + fm_0 \frac{x_2 - x_0}{\Delta_{02}^3} &= 0, \\ m_0 y_0 + m_1 y_1 + m_2 y_2 &= 0, \\ -n^2 y_1 + fm_0 \frac{y_1 - y_0}{\Delta_{01}^3} + fm_2 \frac{y_1 - y_2}{\Delta_{12}^3} \\ -n^2 y_2 + fm_0 \frac{y_2 - y_1}{\Delta_{12}^3} + fm_0 \frac{y_2 - y_0}{\Delta_{02}^3} &= 0, \end{aligned} \right\} (27)$$

где Δ_{ij} взаимные расстояния между точками P_i и P_j (P_0 - Юпитер, P_1 - ядро кометы, P_2 - метеорный рой); m_i - масса, x_i, y_i - координаты точки i в системе координат, связанной с барицентром системы, причем ось абсцисс проходит через точки P_0, P_i ; f - постоянная тяготения; n - среднее движение.

Поскольку данная система 6 уравнений содержит 8 неизвестных: $n, m_2, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$, то для ее решения привлекают дополнительные условия коллинеарности: $y_0 = y_i = y_2 = 0$.

На втором этапе рассчитываются орбиты метеорных роев, что позволяет определить период их прохождения через плоскость орбиты Земли. Поскольку период метеорного

роя, как правило, не кратен периоду обращения Земли вокруг Солнца, то будет иметь место периодическое усиление и ослабление интенсивности метеорного потока.

Вычисляется период биений, который является одной из основных величин, используемых при построении прогноза [7]. Кроме того, при прогнозировании используются эмпирические данные о максимальных значениях плотности потока вещества для метеорного роя и значениях предыдущих интенсивностей выпадения метеорного вещества, которые определяются конфигурацией метеорного роя.

При прогнозе расчет, опирающийся на гравитационное воздействие Юпитера, проводился приближенно с точностью до недели, поскольку большая точность требует значительного увеличения затрат времени. По результатам расчета плотности метеорных потоков на период 2004-2012 гг. (таблица 1) можно сделать вывод о том, что наиболее значимы в отношении метеорной опасности 2008 г. и 2012 г., а наиболее «спокойная» обстановка соответствует 2005-2006 гг.

Заключение

Результаты моделирования взаимодействия микрометеороидных и техногенных частиц с КА сферической пленочной конструкции позволяют оценить его предельные возможности и преимущества по сравнению с известными способами детектирования микрочастиц, к которым следует отнести:

1. Возможность определения физических параметров частиц (скорость, размер, плотность) на больших площадях чувствительной поверхности КА как преобразователя при независимости измеряемых параметров от вектора скорости частиц.
2. Возможность получения большего объема информации при небольшом времени экспонирования КА.
3. Возможность получения информации на различных околоземных орбитах КА в широком диапазоне масс и скоростей частиц.

Таблица 1

Название потока	Дата максимального потока	Интервал времени прохождения потока у Земли	Скорость потока, км/с	2004	2005	2006	2007	2008
				год	год	год	год	год
Лириды	3.01	2-4.01	47	15	10	5	0...5	0...5
Δ-Аквариды	30.07	29.07-14.08	41	5	5	5	5	5
Дракониды	10.10	10.10	24,60	8	8	8	8	8
Ориониды	21.10	17-24.10	66	5	5	5	5	5
Тауриды	4.11	20.10-25.11	30	7	8	7	6	5
Леониды	16.11	14-19.11	72	6	5	5	5	5
Андромедиды	20.11	15.11-6.12	20	1000	10	10	1000	7000
В-Тауриды	30.06	23.06-7.07	31	-	-	20	-	-

Название потока	Дата максимального потока	Интервал времени прохождения потока у Земли	Скорость потока, км/с	2009	2010	2011	2012
				год	год	год	год
Лириды	3.01	2-4.01	47	0...5	0...5	0...5	0...5
Δ-Аквариды	30.07	29.07-14.08	41	5	5	5	5
Дракониды	10.10	10.10	24,60	8	8	8	8
Ориониды	21.10	17-24.10	66	5	5	5	5
Тауриды	4.11	20.10-25.11	30	5	5	5	5
Леониды	16.11	14-19.11	72	5	5	5	5
Андромедиды	20.11	15.11-6.12	20	1000	10	1000	7000
β-Тауриды	30.06	23.06-7.07	31	-	-	-	-
Геминиды	13.12	8-15.12	36	-	-	50	-
Уриды	22.12	19-23.12	36	-	-	12	-

Список литературы

1. Патент №205008 (Россия). Детектор микрометеороидных частиц. //Семкин Н. Д. Опубликовано 10.12.95, БИ №34, с. 32.

2. N. D. Semkin, L. S. Novikov, K. E. Voronov et al. Detector of micrometeoroid and artificial space debris particles. Space Debris 2, 273-293, 2000.

3. Патент №2134435 (Россия). Детектор космического мусора. //Семкин Н. Д. Опубликовано 10.08.1999, БИ №24, с.57.

4. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Ротов С. В. Детектор микрометеороидных и техногенных частиц //Измерительная техника. – 1999. - №8. - С.3-6.

5. Chobotov V. A. Classification of Orbits

wich Regard to collision hazard in Space //Jurnal of Spacecraft and Rockets, №20, 1983, pp. 135-142.

6. Леонтьев Л. В., Тарасов А. В., Терешкин И. А. Некоторые особенности формы кратеров, образованных высокоскоростными частицами в полубесконечной преграде //Космические исследования. – 1971. - №9. – Т. 5. - С. 796-801.

7. Маркелова Е. С., Семкин Н. Д. Прогноз метеорной активности для космических аппаратов, находящихся на орбитах Земли // Вестник СГАУ. Серия “Актуальные проблемы радиоэлектроники” вып.1. - Самара, 1999. - С. 36-40.