

## Газодинамическая модель плотности космического мусора

А.И.Жигалова

Муниципальное общеобразовательное учреждение «Гимназия №5» города  
Королёва (Юбилейного) Московской области

Количество обломков ракет и космических аппаратов на околоземных орбитах увеличивается. Это космический мусор. Обломки находятся на различных орбитах и по высоте, и по наклонению к плоскости экватора Земли. В работе показаны особенности засорения экваториальных и полярных орбит. Опасность засорения космического пространства вызвана не только большим количеством обломков ракет и космических аппаратов, но и распределением их в пространстве вокруг Земли [1]. Если бы использовались все возможные орбиты, то космический мусор вокруг Земли тоже был бы распределён равномерно. Освоение космического пространства показывает, что на одни орбиты космические аппараты выводятся чаще, чем на другие. Например, США часто выводят космические аппараты на орбиты с наклонениями 28 градусов, а Россия на орбиты с наклонениями 50-70 градусов. Такие различия связаны с задачами, которые решают с помощью космических аппаратов. Если космический аппарат находится на орбите с наклонением  $i$  к плоскости экватора Земли, то его трасса будет лежать в поясе географических широт от  $+i$  до  $-i$ . Точно так же и космический мусор будет двигаться в поясе географических широт, заданном наклонением плоскостей орбит [2]. Особенно хорошо это видно на компьютерной модели.

Для изучения особенностей распределения космического мусора по географической широте вокруг Земли была взята за основу круговая орбита.

Круговые орбиты очень часто используются для решения практических задач, поэтому на таких орбитах находится много обломков космических аппаратов. Предположим, что высота орбиты над поверхностью Земли задана и остаётся постоянной. Тогда положение фрагмента будет определяться наклонением орбиты, долготой восходящего узла и временем прохождения перигея. Предположим, что все обломки на заданной круговой орбите с постоянным наклонением распределились равномерно и по долготе восходящего узла, и по траекториям-окружностям. Задача заключается в определении плотности космического мусора на заданной высоте.

Для решения этой задачи удобно применить газомеханическую модель космического мусора с приведённой плотностью к одной частице. Это означает, что на заданной высоте круговой орбиты находится единственная частица, которая равномерно распределяется по всей поверхности шагового слоя в пределах географических широт  $\pm i^0$ .

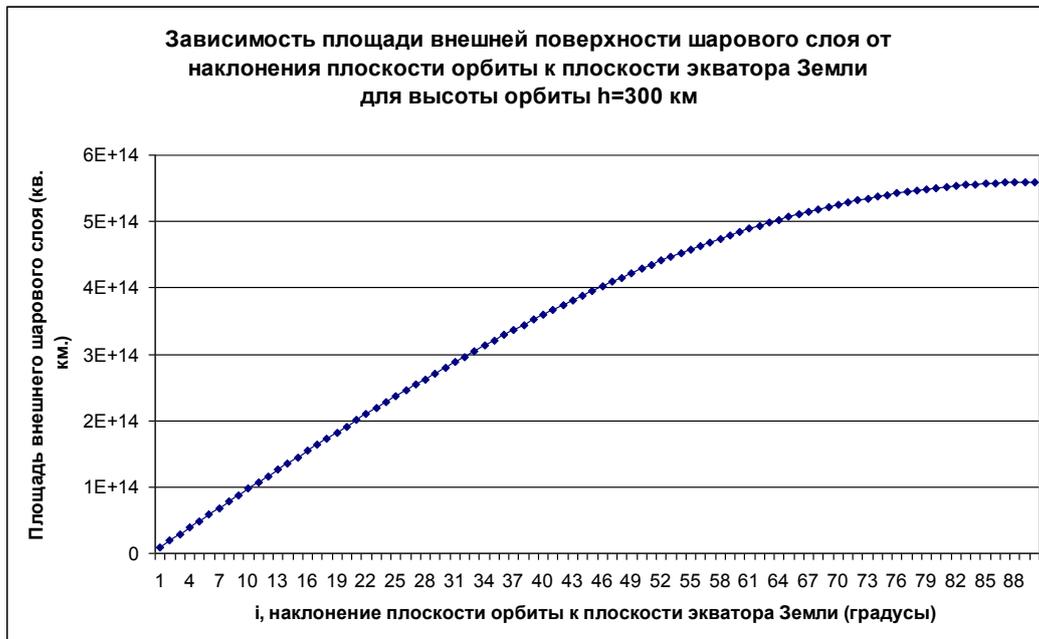


Рис.1. Зависимость площади шарового слоя от наклона орбиты

Площадь шарового слоя радиуса  $R$  с высотой  $h$  определяется по формуле  $S_c = 2\pi R h$ . Для орбитальных объектов шаровой слой предполагается заключённым между географическими широтами  $\pm i^0$ .

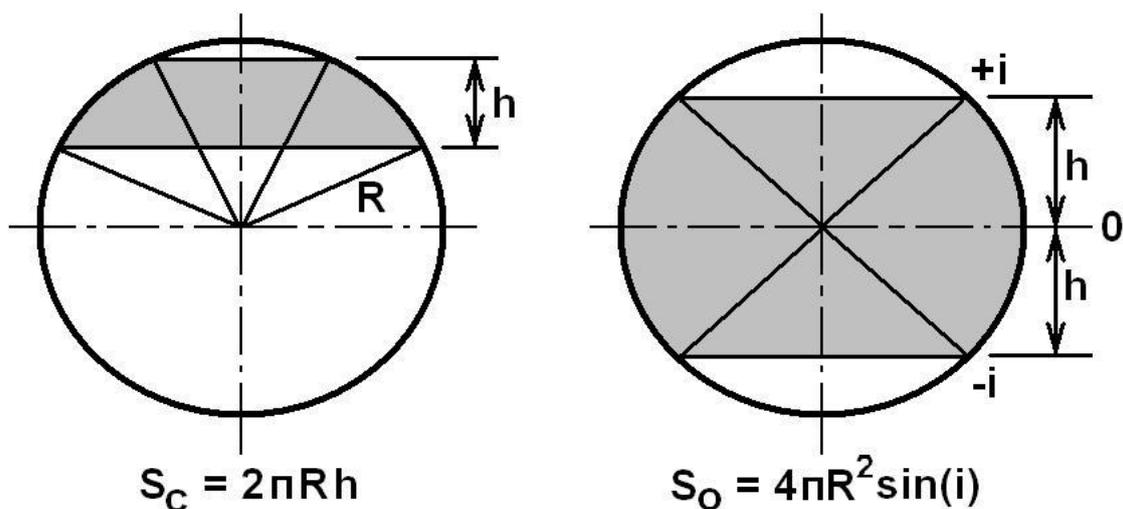


Рис.2. Расчёт плотности шарового слоя для распределённой орбитальной частицы

На рис.2 показана схема расчёта площади шарового слоя, по которому движется распределённая частица космического мусора с наклоном  $I$  плоскости орбиты к плоскости экватора Земли. Площадь такого орбитального шарового слоя равна  $S_o = 2 \cdot 2\pi R h = 4\pi R \cdot R \sin \varphi = 4\pi R^2 \sin \varphi$ , где  $\varphi = i$  - наклонение плоскости орбиты к плоскости экватора Земли.

Для расчёта плотности единственной пробной распределённой частицы достаточно вычислить величину, обратную площади этого шарового орбитального слоя  $\sigma_1 = \frac{1}{S_o}$ . Это поверхностная плотность космического мусора, которая показывает.

Сколько частиц содержится в одном квадратном метре шарового слоя. Для удобства принята приставка «фемто», то есть  $10^{-15}$ .



Рис.3. Зависимость плотности космического мусора от наклона орбиты

На рис.3 показана зависимость плотности космического мусора от наклона плоскости орбиты распределённой частицы к плоскости экватора Земли.

Рассмотрим наложении двух облаков космического мусора на одной высоте 300 км над поверхностью Земли. Первое облако создано американскими космическими аппаратами, то есть имеет наклонение  $i = 28^{\circ}$ . Второе облако создано Россией и имеет наклонение  $i = 57^{\circ}$ .

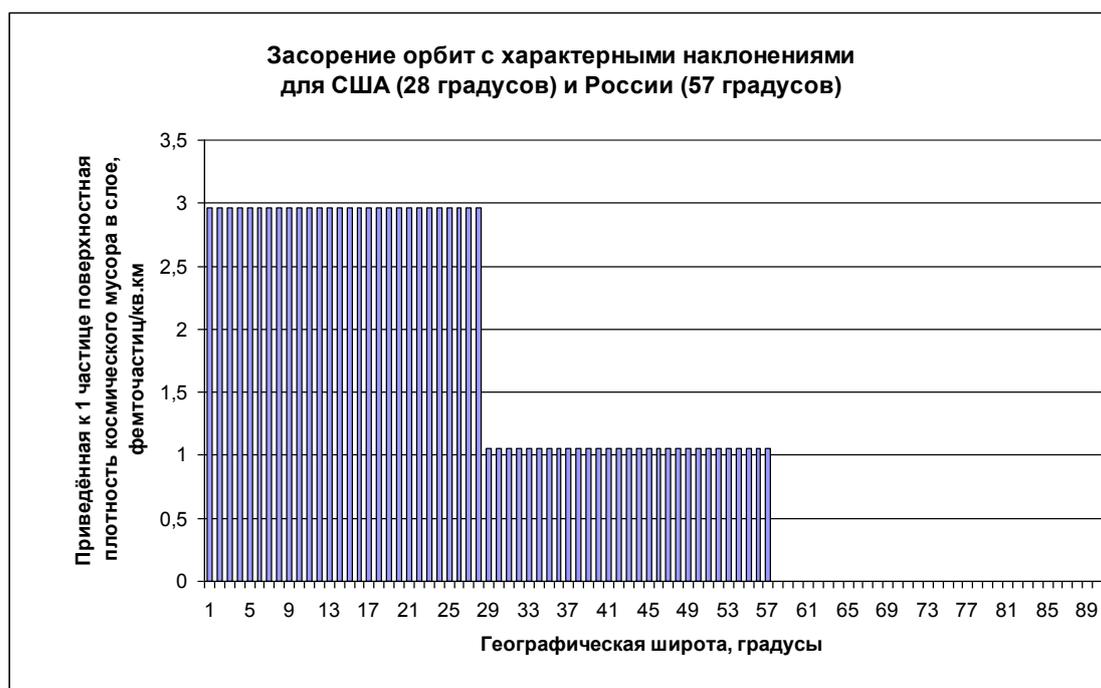


Рис.4. Наложение двух облаков космического мусора

На рис.4 показана плотность космического мусора от наложения двух облаков. В пределах географических широт до  $28^{\circ}$  находится космический мусор и США, и России. Однако на этих широтах плотность космического мусора США составляет 2 фч/кв.м, а плотность космического мусора России в 2 раза меньше, то есть 1 фч/кв.м.

В пределах географических широт от 28 до 57 градусов находится только российский космический мусор с плотностью 1 фч/кв.м. Этот результат очень важен для международных переговоров, например, о возможных штрафах за засорение космического пространства. Пусть США и Россия создали на орбитах по одной частице космического мусора. Космический мусор США имеет плотность 2 фч/кв.м и мешает российским космическим аппаратам в пределах широт до 28 градусов. Условный штраф США составляет  $2 \cdot 28 = 56$  единиц. Космический мусор России имеет плотность 1 фч/кв.м и мешает американским космическим аппаратам в пределах широт тоже до 28 градусов. Условный штраф России составляет  $1 \cdot 28 = 28$  единиц. Следовательно, создав на орбитах по одной частице космического мусора США должны заплатить России 28 условных единиц, которые экономисты и дипломаты с помощью инженеров должны пропорционально перевести в реальные средства.

В каких областях будет больше всего обломков в смысле плотности? Для ответа на этот вопрос надо рассмотреть два предельных случая наклонений орбит.



Рис.5. Наложение 90 облаков космического мусора

На рис.5 представлен график зависимости плотности космического мусора от географической широты при наложении 90 облаков космического мусора на высоте 300 км над поверхностью Земли. Этот график иллюстрирует опасность засорения экваториальных орбит.

Экваториальные орбиты с наклоном 0 градусов к плоскости экватора Земли очень чувствительны к засорению. К этому же случаю относятся экваториальные орбиты с наклонами 180 градусов, но обратные орбиты не применяются, потому что энергетически не выгодны из-за запусков против вращения Земли. Если космический мусор находится на экваториальных орбитах, то его движение происходит строго в плоскости экватора. При засорении экваториальных орбит все обломки движутся в одной плоскости. Это приводит к очень большой плотности космического мусора. Активные космические аппараты могут столкнуться с обломками. Опасность засорения экваториальных орбит заключается в том, что любой космический аппарат два раза за каждый виток пересекает плоскость экватора. Если эта плоскость будет сильно засорена обломками, то вероятность столкновения космического аппарата с ними будет тоже очень большая. Следовательно, засорение экваториальных орбит является очень опасным с практической точки зрения. Математически опасность засорения экваториальных орбит характеризуется сингулярностью поверхностной плотности космического мусора, то есть бесконечным

значением. Подтверждение опасности этого явления уже есть. Геостационарные орбиты засорены или заселены спутниками так плотно, что международные организации с трудом выделяют орбиты для новых спутников связи.

Полярные орбиты, казалось бы, должны быть противоположностью экваториальных орбит с точки зрения засорения обломками.

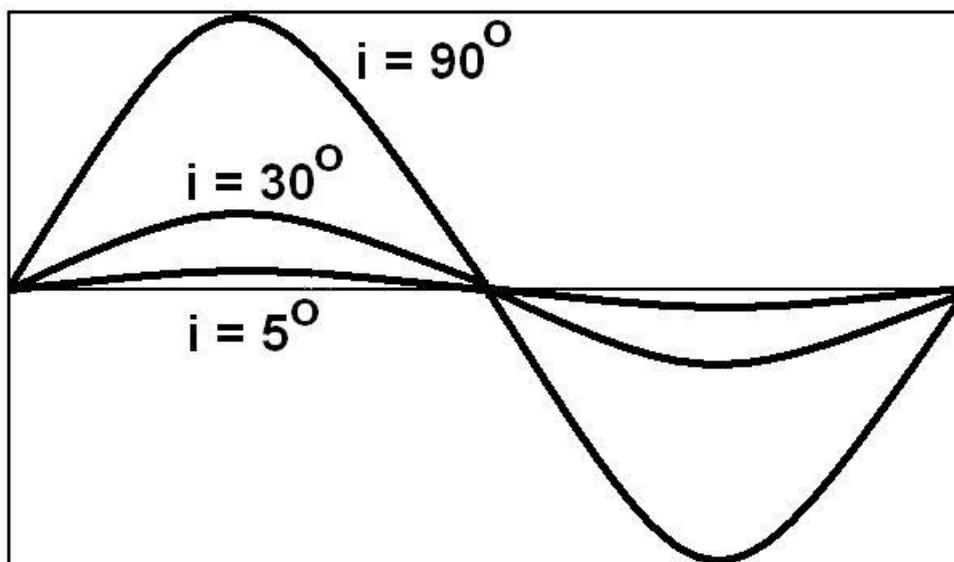


Рис.6. Трассы орбит с различными наклонениями

Сравнительная характеристика трасс орбит с различными наклонениями показана на рис.6. Космический мусор на полярных орбитах равномерно распределяется вокруг всей Земли, поэтому плотность засорения космического пространства должна быть минимальной. Это так, если говорить о средней плотности засорения всего космического пространства. Однако обломки на полярных орбитах обязательно пролетают над полюсами два раза за каждый виток вокруг Земли. Все полярные орбиты пересекаются над полюсами. Над полюсами будут в одной точке сходиться все обломки космического мусора. Следовательно, при засорении полярных орбит будет возрастать плотность космического мусора над полюсами. Если активный космический аппарат будет выведен тоже на полярную орбиту, то он обязательно будет проходить через полярные шапки космического мусора, подвергаясь опасности столкновения.

Засорение орбит со средними наклонениями не так критично, но тоже увеличивает плотность космического мусора. Если рассмотреть два облака космического мусора с различными наклонениями, то плотность обломком будет повышена в области географических широт меньшего наклонения. Аналогично можно

изучить наложение трёх и более облаков космического мусора с различными наклонениями орбит. При таком изучении наименьшие наклонения оказываются самыми критическими, потому что создают самую большую плотность обломков в пространстве. Среди наименьших наклонений особенно выделяется плоскость экватора, то есть экваториальные орбиты.

Выводы.

1. Засорение экваториальных орбит опасно из-за образующейся большой плотности обломков, из-за сосредоточения их в одной плоскости, в малом пространстве вокруг Земли.

2. Засорение полярных орбит опасно из-за образования полярных шапок космического мусора, через которые будет проходить орбита космического аппарата при наклонении 90 градусов.

Недопустимости засорения экваториальных и полярных орбит должно быть уделено особое внимание.

#### Литература

1. Иванов В.Л., Меньшиков В.А., Пчелинцев Л.А., Лебедев В.В. Космический мусор. – Том 1: Проблема и пути её решения. – М.: Патриот, 1996. – 360 с.

2. Жигалова А.И. Модели распределения космического мусора вокруг Земли // Материалы XXVI Международной конференции "Применение инновационных технологий в образовании" 24-25 июня 2015 г. - ИТО-Троицк-Москва / Ред. группа Алексеев М.Ю. и др. - С.414-415. - Электронный ресурс (дата обращения 27.07.2015) <http://www.ito.mosedu.ru/files/materials.pdf>