

*Ключевые слова: космический мусор, переменное отношение площади к массе, согласующий баллистический коэффициент, каталог космических объектов, адаптивный метод расчета*

**К.В. Сорокин**

## **Сопровождение КО с переменным отношением площади к массе на низких околоземных орбитах.**

*В настоящее время на орбите Земли находится свыше 21000 сопровождаемых космических объектов искусственного происхождения. Значительную сложность для сопровождения представляют объекты с переменным отношением площади к массе. В статье представлено распределение величин ОПМ по объектам каталога, описана специфика сопровождения и перспективные методы улучшения характеристик сопровождаемости данных КО.*

### **Введение.**

В настоящее время на орбите Земли находится свыше 21000 сопровождаемых космических объектов искусственного происхождения, из которых большая часть является объектами космического мусора. Поддержание баз данных околоземных космических объектов существенно отличается от ведения астрономических каталогов звезд, планет и астероидов, так как все КО постоянно изменяют параметры своих орбит под воздействием различных сил. Возмущающие воздействия на КО атмосферы и солнечного излучения оказываются переменными и трудно предсказуемыми, [1] особенно ярко это проявляется в процессе сопровождения КО с переменным отношением площади к массе. Для низкоорбитальных КО (НОКО) с переменным ОПМ, основной сложностью является учет влияния верхней атмосферы. Несмотря на постоянный поток радиолокационной информации, по ряду КО наблюдался срыв с сопровождения, т.к. невязки координатных измерений с априорной орбитой превышали установленные в автоматическом режиме стробы для привязки.

## 1. Сопровождение НОКО с переменным ОПМ в рамках поддержания базы данных околоземных космических объектов.

При уточнении орбиты НОКО используется семимерный вектор элементов Лагранжа  $a = (\lambda, L, p, q, h, k, s)$ , где  $s$  – согласующее отношение площади к массе (ОПМ), т.н. согласующий баллистический коэффициент (СБК) между значениями плотности модели верхней атмосферы и измерениями параметров движения КО. Следует сразу оговориться, что величину мгновенного «физического» ОПМ вычислить не представляется возможным еще и потому, что корректное вычисление может быть сделано на интервале в несколько витков, не менее трех. На величину мгновенного «физического» ОПМ влияет стабилизированность КО, скорость собственного вращения относительно центра масс (ЦМ). При периоде обращения вокруг ЦМ меньше периода КО, в расчетах мы будем иметь дело со слабоменяющимся осредненным значением ОПМ. Совершенно очевидно, что решение задачи движения с учетом собственного вращения вокруг центра масс и распределения светоотражающих свойств для каждого КО в рамках поддержания базы данных КО абсолютно неприемлемо.

Вообще говоря, постоянное отношение площади к массе характерно лишь для КО сферической формы с одинаковыми светоотражающими характеристиками по всей поверхности (однако, как будет показано в дальнейшем, это не всегда выполняется). Для любых других КО, особенно обладающими значительным ОПМ, существует задача определения его текущего значения.

Было проведено исследование распределения отношения площади к массе по объектам каталога космических объектов. На большем интервале график распределения имеет форму, близкую с экспоненциальной, на текущий момент значения распределены на интервале от 0,00 до 36,35 кг/м<sup>2</sup>.

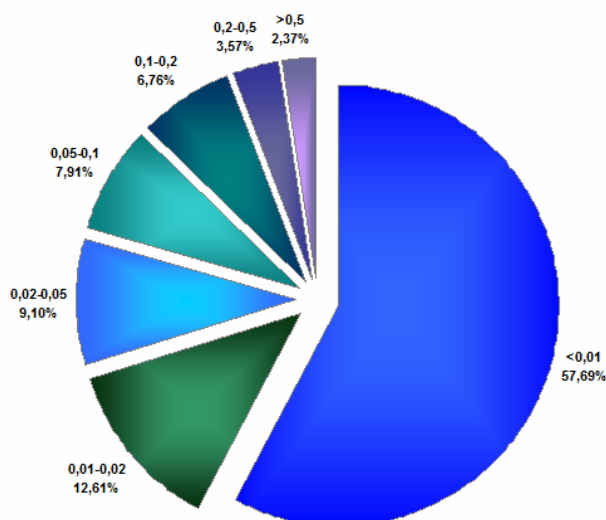


Рис.1. Распределение величины ОПМ по всем объектам каталога.

Выявлен незначительный «горб» в области значения ОПМ = 0,01, которое по умолчанию принимается в качестве априорного. Очевидно это связано с неуспешным вычислением ОПМ, что в свою очередь является следствием специфики уточнения данных КО (например, при быстром сгорание верхних ступеней ракет-носителей и их фрагментов по орбитам, построенным лишь по TLE, сопровождение выводимых КА на орбиты, где уточнение ОПМ затруднено и не дает практического эффекта и др).

Интересующие космические объекты – фрагменты космического мусора с переменным ОПМ - принадлежат, как правило, области с ОПМ свыше 0,1 кг/м<sup>2</sup>, составляющим более 12,70 % от всех объектов каталога. Следует учесть, что на данный момент картина распределения является неполной, так как информации от существующих измерительных средств по малоразмерным КО недостаточно.

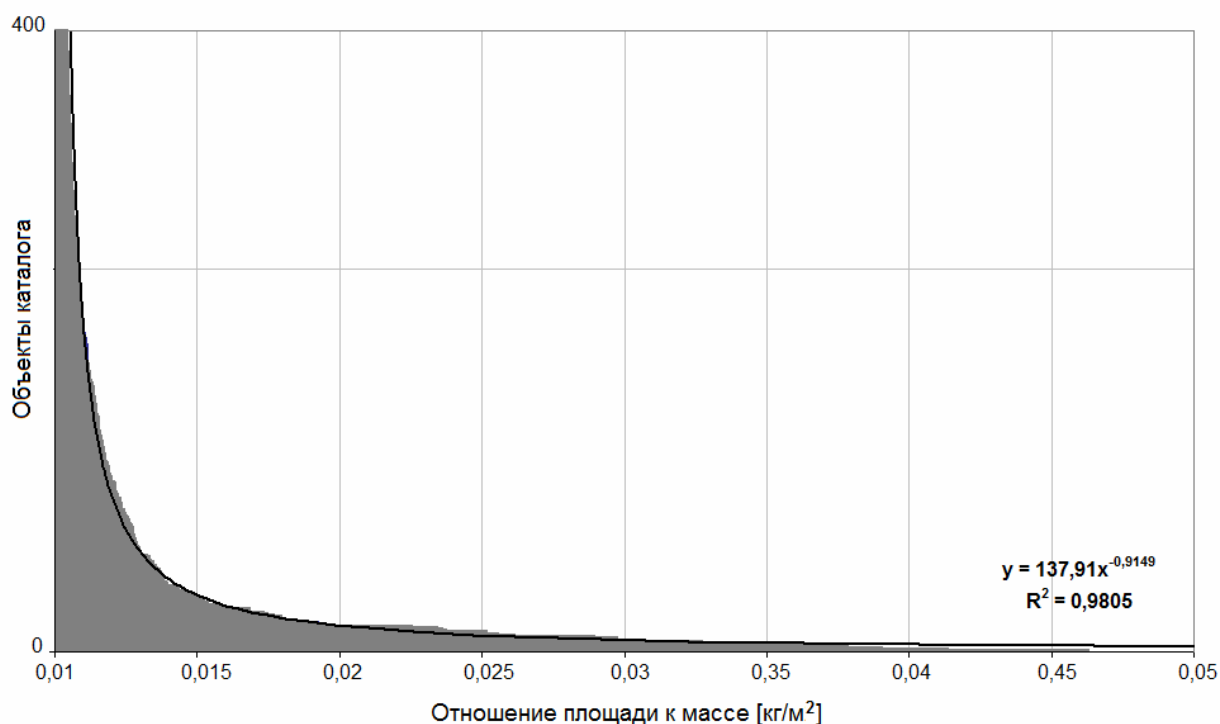


Рис.2. Распределение величины ОПМ на интервале 0,01 – 0,05 м<sup>2</sup>/кг среди объектов каталога.

### 1.1. Увеличение числа сопровождаемых малоразмерных НОКО с переменным ОПМ.

Рост числа сопровождаемых КО с большим и переменным значением ОПМ может быть связан в первую очередь с ростом возможностей радиолокационных измерительных средств. Максимальное количество рассматриваемых КО будет наблюдаться среди объектов сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Основным источником образования служат разрушения ИСЗ и РБ, однако существующие модели орбит облаков таких фрагментов имеют большую степень неопределенности, а их непосредственное сопровождение на данный момент осложнено недостаточным количеством измерительной

информации. [2] С созданием и введением в строй новых измерительных средств сантиметрового и миллиметрового диапазона количество сопровождаемых малоразмерных КО резко возрастет. Например, в результате развития американской системы контроля, модернизации и создания новых РЛС, ожидаемое увеличение каталогизированных объектов может составить до 80.000, в сумме достигнув 100.000 космических объектов, и значительную часть из них будут составлять именно малоразмерные КО с переменным ОПМ.

## **1.2. Обзор источников объектов космического мусора с переменным ОПМ.**

Наиболее сложными для сопровождения объектами являются фрагменты экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), широко распространенным средством пассивного терморегулирования в системах обеспечения теплового режима КА. Экраны ЭВТИ состоят из многих чередующихся слоев тонкой металлизированной полимерной пленки, между экранами помещены слои стеклоткани или других пористых (сетчатых) материалов. Существенно влияют на снижение термического сопротивления частые прошивки, технологические стыки экранов ЭВТИ, заклепки и т.п. [3]. В результате возможно образование фрагментов в виде единичных полотнищ, для которых ОПМ может превышать 50-60 м<sup>2</sup>/кг. На орбитах с высотами ниже 1000 км большинство таких КО быстро тормозится в верхних слоях атмосферы и сгорает, но прогнозирование движения на интервале более суток становится невозможным.

Можно ожидать более широкого применения экранов противометеорной защиты - систем тонких (1 -2 мм) разнесенных металлических пластин. Панели внешнего экрана выполняются из легких сплавов; возможно нанесение покрытия, способного отражать большую часть лучистой энергии: фактически он является дополнительным элементом системы терморегулирования. [4] Промежуточные экраны противометеорной защиты могут выполняться и из композиционных материалов. Элементы конструкции из полимерных композиционных материалов, стекло- и углепластика, успешно применяются в ракетно-космической технике. Малые значения удельной массы, сложная форма и неоднородность светоотражающих свойств, делают сопровождение фрагментов частичных разрушений КА крайне сложным.

Еще одним источником фрагментов являются панели солнечных батареи (СБ). Удельная масса применяемых СБ из моно-кристаллического кремния составляет около 1,25 - 1,85 кг/м<sup>2</sup>, максимальное ОПМ - 0,8 - 0,54 м<sup>2</sup>/кг. Перспективные пленочные СБ из

аморфного кремния имеют удельную массу  $0,3 \text{ кг/м}^2$ . [5],[6], что соответствует максимальному ОПМ свыше  $3,3 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Таким образом, увеличение количества сложных для сопровождения КО с переменным ОПМ будет связано с конструктивными особенностями перспективных космических аппаратов и других образцов ракетно-космической техники.

### **1.3. Неадекватность используемой модели движения КА.**

Неадекватность используемой модели движения КА приводит к тому, что даже для КА сферической формы с равномерными светоотражающими характеристиками наблюдаются колебания величины ОПМ. Это можно видеть на примерах неманеврирующих КА юстировочного класса «Вектор». КА конструктивно выполнен в виде сферы диаметром 2.0 м, масса 570 кг, поверхность покрыта элементами солнечных батарей, на поверхности расположены 4 штыревые антенны, не оказывающие существенного значения на величину ОПМ. [7][8]

При сопровождении КО с переменным ОПМ крайне важным является регулярное оперативное обновление массива индексов солнечной активности и геомагнитной возмущенности. При минимуме и максимуме солнечной активности, например, величины расчетных значений ОПМ могут отличаться на порядок. [3] При этом на высотах 500-1000 км плотность верхней атмосферы также способна изменяться на порядок. В процессе диссипации энергии под действием атмосферного торможения, на высотах менее 1000 км для КО с переменным ОПМ наблюдается сложнопрогнозируемое нарастание невязок измерений с орбитой, затрудняющее их дальнейшее сопровождение.

## **2. Перспективные методы расчета и прогнозирования переменного значения ОПМ.**

### **2.1. Учета вектора возмущающего воздействия для объектов с большим ОПМ.**

Рассматривается подход к определению орбит и прогнозированию численным методом параметров движения объектов с переменным большим ОПМ. Ограниченная протяженность интервала измерений в ряде случаев оказывается недостаточной для определения необходимого набора уточняемых параметров. Направление вектора ускорения, вызванного сопротивлением верхней атмосферы (либо давлением солнечной радиации) может значительно, но в ограниченных пределах, отклоняться от направления вектора скорости (направления Солнце – КО).

Набор уточняемых параметров  $Q \{q, P\}$  движения объекта включает:

- шесть элементов орбиты КО  $q$
- компоненты вектора  $P$  дополнительных параметров, характеризующих влияние давления солнечной радиации на движение КО.

Модель опирается на следующие предположения:

- направление возмущающего ускорения может в определенных пределах отличаться от эталонного;
- на различных участках траектории величина и направление возмущающего ускорения может меняться скачкообразно;
- величина и направление возмущающего ускорения описывается 3-мерным вектором параметров  $p_i$ , который сохраняет постоянное значение внутри одного участка;
- на выбранном интервале времени траектория КО непрерывна, описывается системой дифференциальных уравнений в рамках одной модели и одним вектором состояния КО, отнесенному к заданному моменту времени.

Реализованный на этих принципах тип прогноза может быть использован при сопровождении КО с большим переменным ОПМ, однако потребует большего машинного времени для проведения расчетов.

## 2.2. Анализ изменения ОПМ с помощью методов ЛАЧХ для сгорающих КО.

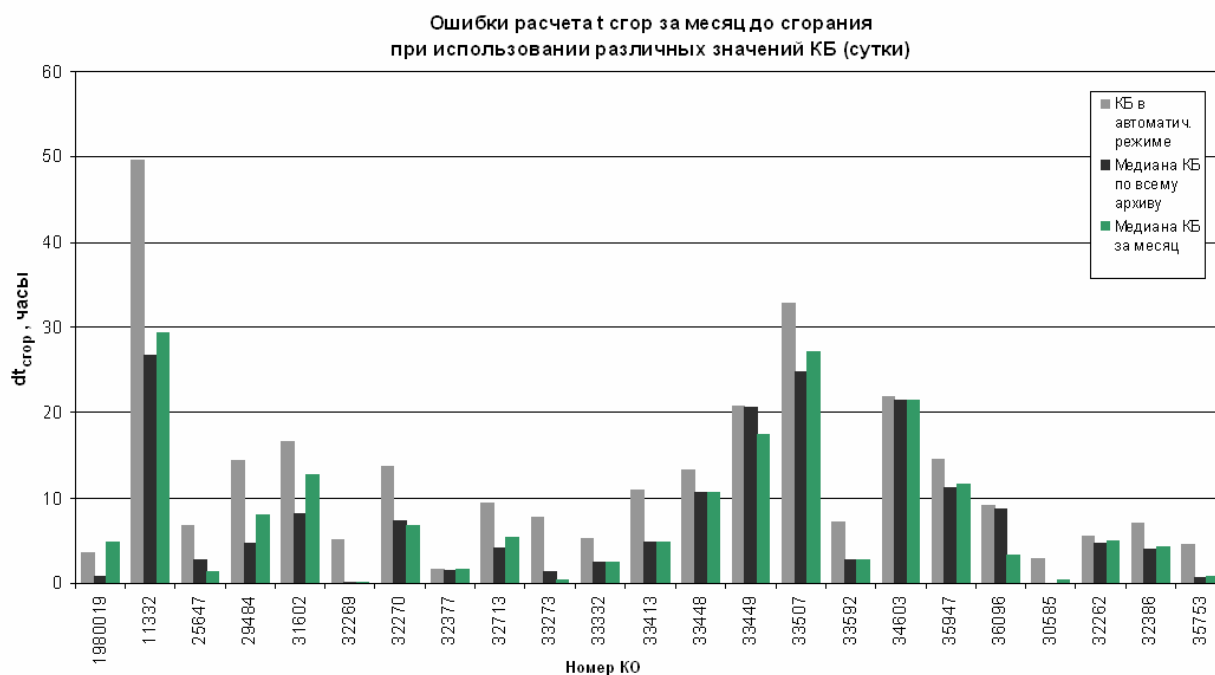
В ряде исследований предлагалось использовать кратковременный динамический прогноз согласующего баллистического коэффициента (СБК) при расчете времени сгорания КА. Вычисления проводились по имеющимся в открытом доступе TLE. На основании анализа зависимостей, полученных из статистических временных рядов СБК и индексов солнечной активности и геомагнитной возмущенности, проводится поиск закономерностей изменения, которые позволят осуществить прогноз этого параметра на момент входа в атмосферу. [9]

## 2.3. Введение аппроксимирующей функции.

Метод основывается на введении аналитической зависимости переменного значения ОПМ от времени и параметров априорной орбиты при прогнозировании движения КО. По данным архивов исследуемых КО каталога выполнен гармонический анализ Фурье изменения ОПМ. Анализ проводился в целях поиска аналитических зависимостей ОПМ от времени, а в дальнейшем и от параметров априорной орбиты

$$s = s ( t, \lambda, L, p, q, h, k ) \quad (2)$$

Аппроксимирующая функция может быть использована при прогнозировании движения КО. На данный момент исследование продолжается, метод позволит, по сравнению с методом учета вектора возмущающего воздействия, сократить машинное время, необходимое для расчета прогнозной орбиты, рассматривается возможность использования аппроксимирующей функции при прогнозировании движения, как численным так и аналитическим методами.



**Рис.3 Ошибки расчета  $t_{\text{сгор}}$  для НОКО со слабо изменяющимся ОПМ.**

В процессе работы было показано, что при прогнозировании движения, положительный эффект от введения ОПМ, отличного от априорного, может быть получен на интервале 2 - 3 месяцев. Также, в ходе исследования использовалась медиана ОПМ по всему архиву орбит для прогнозирования движения сгорающих НОКО, в результате, с большей достоверностью удалось выполнить расчет времени сгорания.

### **Заключение**

Задача сопровождения КО с переменным ОПМ по мере совершенствования измерительных средств и дальнейшего освоения околоземного космического пространства будет являться все более актуальной. На данный момент ведутся различные научные изыскания в данной области, результаты которых в дальнейшем должны найти применение при ведении каталога космических объектов.

## Список литературы

1. В.В. Титенко. Фрагменты космического мусора, обнаруженные во время наблюдений обсерваторий научной Сети и ее партнеров. Состояние на август 2009 года. Проект «ПулкОН». Москва, 2009.
2. Л.В. Рыхлова. Проблема заселенности космоса объектами искусственного происхождения. Москва, Космоинформ, 1993.
3. Испытания в криовакуумной камере экранно-вакуумной теплоизоляции по определению ее эффективной теплопроводности. Т.А. Таранова. Государственное конструкторское бюро «Южное». XXX Академические чтения по космонавтике. Москва, 2006.
4. Оценка эффективности экранной защиты космических объектов. Трушков В.Г., Дробкова М.С. ФГНУ НИИ прикладной математики и механики. Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании», 2006.
5. Официальный сайт НПП «Квант» <http://www.npp-kvant.ru>
6. Официальный сайт ОАО «Сатурн» <http://www.saturn.kuban.ru>
7. В.М. Агапов. Комментарий к запуску КА "Космос-2292". Новости Космонавтики №22/1994.
8. Г.И. Гозюмов. Обзор состояния и развития спутников юстировочно-калибровочного класса. МАК "Вымпел", 1996.
9. А.В.Голубек. Исследование возможности улучшения точности определения баллистического коэффициента для сгораемых космических объектов. Научные Чтения памяти К.Э.Циолковского. Калуга, 2002.

*Сорокин Кирилл Владимирович,*

*Место работы: ОАО «МАК «ВЫМПЕЛ»», Россия, 125319, г. Москва, 4-я ул. 8 Марта, д. 3.  
тел. (499) 152-95-95*

*e-mail: k.sorokin@mail.ru*