

УДК 629.78

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ГСО

Внуков А.А.¹, Баландина Т.Н.²

¹vnukovalx@ya.ru

(¹ООО «Научно-производственный центр «Малые космические аппараты»,
г. Железногорск, Красноярский край;

²АО «Информационные спутниковые системы»
им. академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск, Красноярский)

В работе рассмотрены основные причины возникновения космического мусора на геостационарной орбите, проанализированы требования российских и международных стандартов по ограничению засорённости околоземного пространства. Исследованы причины невыполнения требований стандартов по уводу космических аппаратов на орбиту захоронения, на основании этого исследования обоснована необходимость применения сервисных космических аппаратов для активного удаления космического мусора.

Чем больше аппаратов человечество запускает в космос, тем менее пригодным он становится для использования. Космические аппараты выходят из строя каждый год с завидной регулярностью, результатом этого является то, что на орбите Земли количество мусора возрастает ежегодно в среднем на 4 % (рис. 1).

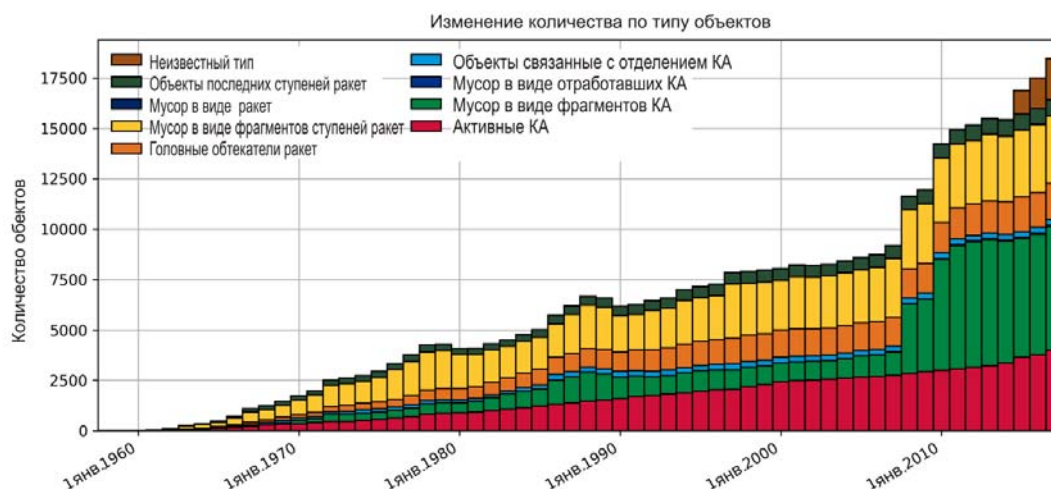


Рис. 1. Тенденция накопления космического мусора на околоземных орбитах по типу объектов [1]

Размер объектов космического мусора (ОКМ), которые находятся на околоземной орбите, достаточно широко варьируется: от микрочастиц до не функционирующих космических аппаратов массой в несколько тонн.

Наиболее засорены те области орбит вокруг Земли, которые чаще всего используются для работы космических аппаратов. Это низкая околоземная орбита (НОО), геостационарная орбита (ГСО) и солнечно-синхронные орбиты (ССО). По другим данным вокруг Земли в настоящее время уже имеются три слоя космического мусора от поверхности Земли: 300-400 км; 1500-1700 км; 36000 км.

На круговой орбите высотой до 200 км время жизни ОКМ равно нескольким дням, на орбите высотой 600 км – 25-30 годам, на орбитах высотой 1000 км – двум тысячелетиям, а для ОКМ на орбитах более 2000 км вероятность упасть на Землю в абсолютном большинстве случаев равна нулю.

Меры по предотвращению засорения геостационарной орбиты

Исследователи считают, что для ряда орбит предсказанный Дональдом Кесслером эффект, когда они из-за каскадно растущего количества мусора станут непригодны для полетов, вот-вот наступит. В 2002 году Ричард Кроутер из британского Агентства оценок и исследований в области обороны (Defence Evaluation and Research Agency) предположил, что это произойдет в 2015 году. Сейчас специалисты NASA и ESA утверждают, что для высот от 800 до 1000 км этот момент уже наступил. На высотах около 400 км, где часто производятся пилотируемые полеты, ОКМ меньше из-за пусть небольшого, но ощутимого сопротивления разреженных слоев земной атмосферы, которое заставляет ОКМ терять скорость, снижаться и, наконец, сгорать в более плотных атмосферных слоях. В то же время на ГСО ОКМ может находиться бесконечно долгое количество времени, что в перспективе может привести к дополнительным сложностям эксплуатации геостационарных КА (рис. 2).

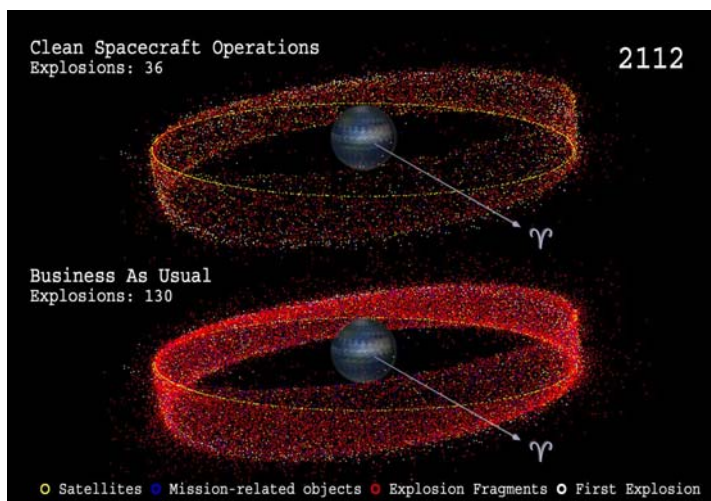


Рис. 2. Перспективы роста засорённости геостационарной орбиты в ближайшие 100 лет по данным ESA [2]

В настоящее время в ГОСТ Р 52925-2008 [3] для геостационарной орбиты определено следующее требование: по завершении активного функционирования КА должен быть уведён на орбиту с высотой, исключающей его столкновение с космическими объектами, продолжающими находиться в области ГСО. Учитывая, что защищаемой областью ГСО тем же

ГОСТом определена область орбит с высотой $35786 \text{ км} \pm 200 \text{ км}$, где 35786 км – это высота ГСО, орбита захоронения выработавшего свой ресурс КА должна иметь высоту

$$35786 + 200 + (1000 \cdot C_R \cdot A \cdot m^{-1}),$$

где C_R – коэффициент давления солнечного излучения, $\text{км} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-1}$; $A \cdot m^{-1}$ – отношение площади КА к его массе после прекращения активной эксплуатации и проведения пассивации, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$.

В рекомендациях Межагентского координационного комитета по космическому мусору (МККМ) [4] дополнительно к требованию по высоте орбиты захоронения прописаны также требования для последних ступеней ракет-носителей в части гарантирования увода их на такую орбиту, при движении по которой за счёт естественной эволюции орбиты в течение 25 лет ступень выйдет из защищаемой зоны околоземного космического пространства. Это требование возникло в результате математического моделирования движения КА в околоземном пространстве (рис. 3) [5].

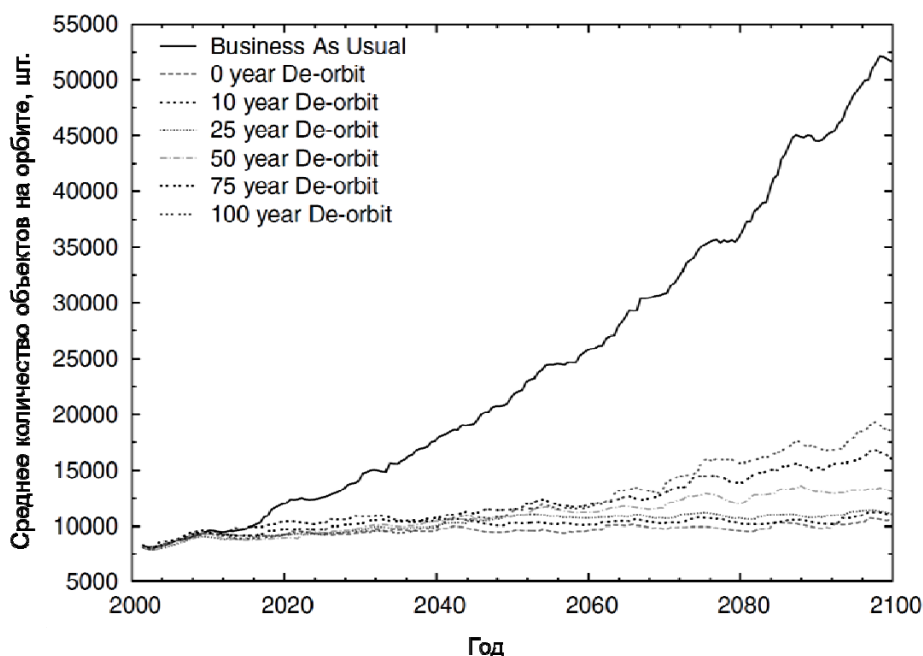


Рис. 3. Эволюция количества искусственных объектов с геометрическими размерами больше 10 см на орбите в 100 лет

Из рис. 3 видно, что в случае соблюдения «правила 25 лет» количество ОКМ на периоде в 100 лет возрастает примерно на 10%, в то время как при 50-летнем остаточном сроке существования КА на орбите прирост числа ОКМ составляет порядка 25%, а при отсутствии мероприятий по очистке орбит – возрастает в 5 раз.

Таким образом, для КА на ГСО, выполняющих требования ГОСТ Р 52925-2008 и рекомендации МККМ, не существует проблемы возникновения космического мусора. Однако техническое несовершенство сложных систем (надёжность сложной системы является производением всех входящих в эту систему элементов и меньше надёжности элемента с минимальной надёжностью) приводит к тому, что даже при учёте всех ограничений при разработке КА, существует вероятность того, что этот КА станет космическим мусором. Исследования Офиса исследования космического мусора Европейского космического агентства показывают [6], что, несмотря на увеличение доли космических аппаратов, удовлетворяющих

требованиям МККМ по ограничению засорения космического пространства, доля спутников, остающихся по завершению функционирования в защищаемой зоне ГСО, достаточно велика (рис. 4).

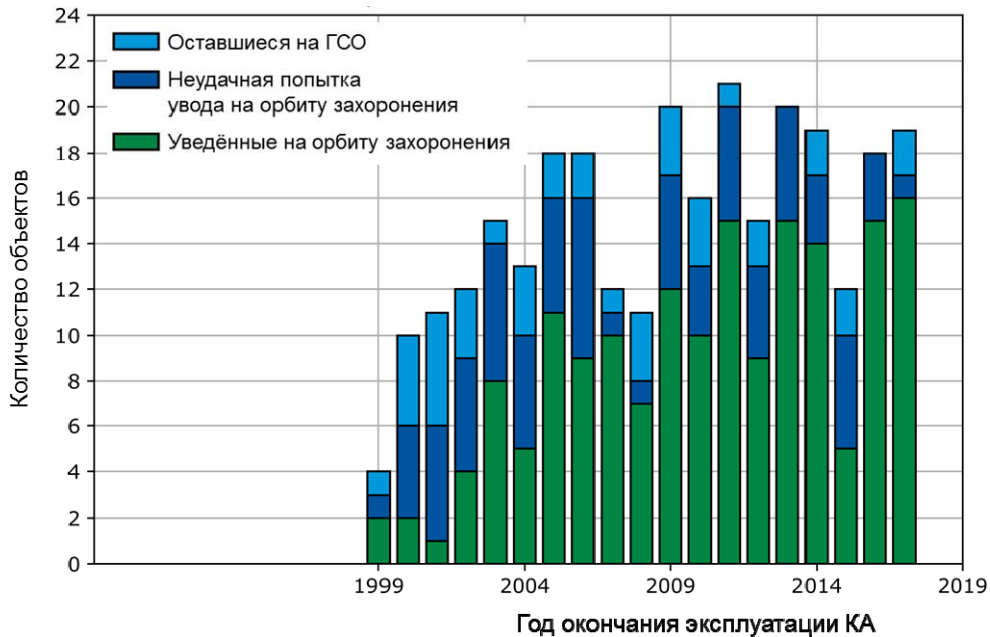


Рис. 4. Тенденция соблюдения требований МККМ по ограничению засорения околоземного пространства в области ГСО [7]

Невыполнение требований МККМ некоторыми КА может быть связано не столько с отсутствием необходимых ресурсов на борту, но в первую очередь с возникновением нештатных ситуаций, приведших к потере работоспособности спутника.

Вероятность успешного увода КА на орбиту захоронения

В общем случае условная вероятность успешного увода КА на орбиту захоронения после завершения срока активного существования (САС) КА определяется следующим соотношением:

$$P_y = \frac{P_{\text{ПН}}(T_{\text{САС}}) \cdot P_{\text{СС}}(T_{\text{САС}} + T_y)}{P_{\text{ПН}}(T_{\text{САС}}) \cdot P_{\text{СС}}(T_{\text{САС}})} = P_{\text{СС}}(T_y),$$

где $P_{\text{ПН}}(T_{\text{САС}})$ – вероятность безотказной работы (ВБР) полезной нагрузки КА в течение САС ($T_{\text{САС}}$); $P_{\text{СС}}(T_{\text{САС}})$ – ВБР служебных систем (платформы) КА в течение САС ($T_{\text{САС}}$); $P_{\text{СС}}(T_y)$ – ВБР служебных систем (платформы) КА в течение времени увода на орбиту захоронения (T_y).

Для платформ космических аппаратов ВБР составляет в среднем 0,9 [8], а это означает, что даже в течение САС 10% от запущенных на ГСО КА могут выйти из строя и остаться на орбите в качестве космического мусора. Кроме того, поскольку эксплуатация КА может быть продолжена после истечения гарантированного САС. В этом случае заранее (при разработке КА) определить ВБР платформы на момент принятия решения об уводе не представляется возможным, поскольку заранее неизвестен срок эксплуатации КА за пределами САС. Этот срок определяется непосредственно в момент принятия решения о продлении функцио-

нирования КА по целевому назначению и также не гарантирует успешного увода на орбиту захоронения, поскольку ВБР платформы за пределами САС зависит от следующих факторов:

– деградация характеристик двигательной установки (снижение давления в топливном баке, выгорание рабочей камеры двигателя и т.д.);

– ошибка оценки остаточных запасов топлива, включающая в себя ошибки датчиковой аппаратуры (давление в баке, время работы двигателей) и ошибки методики оценки запасов топлива;

– ошибка оценки дополнительного возможного времени функционирования КА на ГСО, вызванная недостаточно полными, или, наоборот, избыточными моделями солнечной активности и гравитационного поля Земли;

– надёжность функционирования критичных для этапа увода КА на орбиту захоронения элементов и подсистем КА (солнечные батареи, двигательные установки, маховики системы ориентации, бортовой вычислительный комплекс и т.д.) которые подвержены деградации вследствие длительного функционирования или воздействия факторов космического пространства, причём эта деградация может быть только оценена, но не измерена;

– достаточность наземной экспериментальной отработки КА, подтверждающей заданные уровни надёжности оборудования, которая физически не может охватить все возможные режимы функционирования аппаратуры и опирается на определённую модель надёжности.

Вышеперечисленные факторы говорят о том, что, каким бы ни был надёжным и качественно изготовленным космический аппарат, вероятность его аварийного выхода из строя тем выше, чем дольше он эксплуатируется на орбите. А значит, существует опасность перевода его из активно управляемого аппарата в объект космического мусора.

Выводы

Несмотря на достигнутый прогресс в области защиты геостационарной орбиты от космического мусора искусственного происхождения, текущий уровень технологий, и в первую очередь надёжность космических платформ, не позволяет гарантировать 100% эффективность удаления закончивших активное функционирование КА из защищаемой области космического пространства. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры по принудительному изменению орбит тех КА, которые вышли из строя в результате аварии либо ошибок в расчёте скорости деградации технических характеристик систем, составляющих платформу КА. Одним из возможных решений может стать сервисный КА, осуществляющий стыковку с неактивными КА на ГСО и увод их на орбиту захоронения при помощи собственной двигательной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Space operations. Space debris: The ESA approach BR-336 // официальный интернет-портал ESA, март 2017. URL:
2. Space operations. Space debris: Active debris removal // официальный интернет-портал ESA, март 2017. URL:
3. ГОСТ Р 52925-2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. Введ. 2009-01-01. М., 7 с.
4. IADC Space Debris Mitigation Guidelines // Inter-agency Space Debris Coordination Committee site. IADC-02-01, 2007. URL: <http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-2002->

01,%20IADC%Space%20Debris%20

Guidelines,%20Revision%201.pdf (дата обращения: 13.06.2018)

5. *Klinkrad H.* «Space Debris – Models and Risk Analysis», ISBN 3-540-25448-X, Springer Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2006

6. ESA Space Debris Office. Classification of geosynchronous objects. Issue 2.0. GEN-DB-LOG-00239-OPS-GR, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany.

7. ESA Space Debris Office. ESA's Annual space environment report. Issue 2.0. GEN-DB-LOG-00239-OPS-GR, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany.

8. *Николаев Д.С.*, Проекты АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва» // доклад в рамках VIII Международной конференции «Авиационное и космическое страхование в России», март 2017. URL: http://www.raaks.ru/docs/doc20170315_019.pdf (дата обращения 20.06.18)

THE RATIONALE FOR THE USE OF THE SERVICE SPACECRAFT FOR REMOVAL OF SPACE DEBRIS IN GEO

Vnukov A.¹, Balandina T.²

¹*vnukovalx@ya.ru*

*(¹Research and Production Center Small Satellites, LLC,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk krai;*

*²JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk krai)*

The paper deals with the main causes of space debris in the geostationary orbit, analyzed the requirements of Russian and international standards for the limitation of near-earth space debris. The reasons for non-compliance with the mitigation requirements of standards are investigated, on the basis of this study the need for the use of service spacecraft for the active removal of space debris is justified.