

# Анализ экономической эффективности удаления космического мусора с геостационарной орбиты с использованием сервисного космического аппарата

В.Е. Чеботарев<sup>1</sup>, А.А. Внуков<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> ООО «Научно-производственный центр «Малые космические аппараты»  
Российская Федерация, 662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Школьная, 33-25

<sup>2</sup> ООО «Научно-производственный центр «Малые космические аппараты»  
Российская Федерация, 662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Школьная, 33-25

\*e-mail: [vnukovalx@ya.ru](mailto:vnukovalx@ya.ru)

*Разработана модель расчета экономической эффективности космического аппарата связи, сформированы показатели экономической эффективности: индекс доходности и срок окупаемости проекта. Эта модель модифицирована для расчета экономической эффективности сервисного космического аппарата и на ее основе сформирован обобщенный показатель эффективности проекта, обеспечивающий минимизацию перерывов в использовании системной точки на геостационарной орбите.*

*Проведен анализ условий эффективного применения сервисного космического аппарата для активного удаления космического мусора с геостационарной орбиты и сформированы рекомендации по его эксплуатационным характеристикам.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, космический мусор, геостационарная орбита, системная точка, сервисный космический аппарат для активного удаления космического мусора, экономическая эффективность.

## Введение

В настоящее время космические технологии нашли широкое применение во многих областях человеческой деятельности во всех регионах Земли и околоземном пространстве, как воздушном, так и космическом. Современная жизнь немыслима без использования спутниковой междугородней и международной связи, централизованного и непосредственного телевидения, спутниковой навигации и т.д. Это обстоятельство определило роль спутниковых космических систем информационного обеспечения как стратегического средства обеспечения национальной безопасности и экономической независимости любого государства [1, 2].

Растущие потребности в использовании космических систем информационного обеспечения во многом реализуются с помощью космических аппаратов связи (КА), размещаемых на геостационарной орбите

(ГСО). Ввиду привлекательности ГСО международным сообществом между государствами распределены точки стояния геостационарных КА, а также определены требования по точности удержания КА в этих точках ( $\pm 0,05^\circ$  по долготе и наклонению). В настоящее время район геосинхронной орбиты является наиболее насыщенным как работающими, так и отработавшими КА. Поэтому международным сообществом (Межагентским координационным комитетом по космическому мусору, IADC) определены защищаемые зоны околоземного космического пространства (рисунок 1) и выработаны рекомендации по уводу отработавших КА на достаточное расстояние от рабочей ГСО с тем, чтобы они не мешали работающим КА [1].

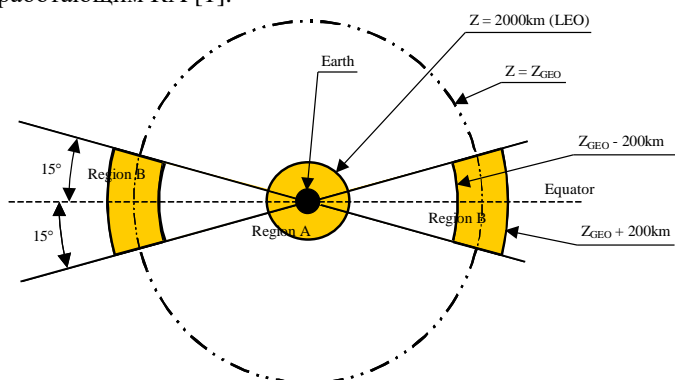


Рисунок 1 – Защищаемые зоны околоземного космического пространства

Высота (над ГСО) орбиты захоронения космического мусора определена в документе «IADC Space Debris Mitigation Guidelines» и разработанных на основе этого документа национальных стандартах, и определяется по формуле [3, 4]:

$$H_{O3} = 235 + 1000 \cdot \frac{C_R A}{m}, \quad (1)$$

где  $H_{O3}$  – высота орбиты захоронения над ГСО (км),  $C_R$  – коэффициент давления солнечного излучения,  $A$  – площадь миделевого сечения КА,  $m$  – сухая масса КА.

Однако статистика отказов КА показывает, что КА во многих случаях становится неуправляемым, т. е.

его организованный вывод не представляется возможным. В связи с этим становятся актуальными исследования по выбору средств активного перевода не рабочих КА на орбиту захоронения, например, с помощью сервисного КА (СКА), и разработки моделей оценки экономической эффективности применения СКА.

## 1 Экономическая модель создания и эксплуатации космического аппарата связи

Жизненный цикл космического аппарата (КА) характеризуется наличием следующих укрупненных этапов [1]:

- проведение опытно-конструкторских работ (ОКР);
- эксплуатация  $t_{\text{Э}}$  в пределах гарантированного срока  $t_{\text{ГС}}$  ( $t_{\text{Э}} \leq t_{\text{ГС}}$ );
- вывод из эксплуатации.

Этап ОКР охватывает период времени от принятия решения о начале работ (выпуск технического задания, заключение контракта) до завершения ввода КА в целевое использование, после выведения КА на орбиту в рабочую точку с предъявлением его Заказчику по результатам положительных предварительных проверок и связан с большими разовыми затратами. На этапе эксплуатации КА за счет целевого использования (информационное обеспечение) возникает доход, суммарная величина которого, для получения Заказчиком прибыли от эксплуатации КА, должна превысить в конце срока  $t_{\text{ГС}}$  затраты на ОКР.

Базовые затраты на проведение опытно-конструкторских работ включают в себя затраты на разработку, изготовление спутника и его составных частей, подготовку и запуск КА на рабочую орбиту.

Общая модель получения текущего чистого дохода от проекта (КА) по аналогии с инвестиционным проектом определяется уравнением [5-7]

$$C_{\text{м.ч.д}} = (C_{\text{у.д}} - C_{\text{у.р}}) \cdot t_{\text{Э}} - C_{\text{ОКР.б}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{у.д}}$ ,  $C_{\text{у.р}}$  – удельные доходы и удельные расходы;  $C_{\text{ОКР.б}}$  – базовые затраты на проведение ОКР.

Слагаемые в уравнении (2) принимаются, в первом приближении, не зависящими от гарантированного срока эксплуатации ( $t_{\text{ГС}}$ ).

Приведенная функциональная зависимость текущего чистого дохода от времени является знакопеременной: на начальном этапе создания спутника она отрицательная, а с появлением дохода она со временем становится положительной и в конце эксплуатации ( $t_{\text{Э}} = t_{\text{ГС}}$ ) превращается в суммарный чистый доход

$$C_{\text{с.ч.д}} = (C_{\text{у.д}} - C_{\text{у.р}}) \cdot t_{\text{ГС}} - C_{\text{ОКР.б}}. \quad (3)$$

Из общей модели получения текущего чистого дохода от проекта (2) можно определить срок окупаемости базовых затрат  $t_{\text{о.б}}$  на проведение ОКР, полагая  $C_{\text{м.ч.д}} = 0$ .

$$t_{\text{о.б}} = \frac{C_{\text{ОКР.б}}}{C_{\text{у.д}} - C_{\text{у.р}}} \quad (4)$$

Подставляя в уравнение суммарного чистого дохода от эксплуатации спутника  $C_{\text{с.ч.д}}$  (3) выражение для срока окупаемости базовых затрат  $t_{\text{о.б}}$  (4) получим

$$C_{\text{с.ч.д}} = C_{\text{ОКР.б}} \cdot \left( \frac{t_{\text{ГС}}}{t_{\text{о.б}}} - 1 \right), \quad t_{\text{о.б}} < t_{\text{ГС}}. \quad (5)$$

На основании формулы (5) определим выражение для расчета относительного безразмерного показателя экономической эффективности создаваемого проекта, т. н. индекс доходности проекта [5-7]:

$$K_{\text{у.д}} = \frac{C_{\text{с.ч.д}}}{C_{\text{ОКР.б}}} = \frac{t_{\text{ГС}}}{t_{\text{о.б}}} - 1. \quad (6)$$

Исходя из условия  $K_{\text{у.д}} \geq 1$  (гарантированный возврат затрат на ОКР), находим по формуле (6) верхнюю границу срока окупаемости базовых затрат  $t_{\text{о.б}} \leq 0,5 t_{\text{ГС}}$ .

## 2 Экономическая модель создания и эксплуатации сервисного КА

Основной целью для СКА являются КА информационного обеспечения на ГСО, управление которыми нарушено в результате каких-либо аномалий природного (повреждение КА метеороидным потоком или воздействие высокомоощного импульса электромагнитного излучения) или техногенного (отказ одной или нескольких систем КА в результате нарушения технологии изготовления или эксплуатации за пределами расчётных режимов) характера.

Жизненный цикл сервисного КА подобен жизненному циклу КА связи и характеризуется наличием следующих укрупненных этапов [1]:

- проведение опытно-конструкторских работ (ОКР);
- эксплуатация  $t_{\text{Э}}$  в пределах гарантированного срока  $t_{\text{ГС}}$  ( $t_{\text{Э}} \leq t_{\text{ГС}}$ );
- вывод из эксплуатации.

Этап ОКР охватывает период времени от принятия решения о начале работ (выпуск технического задания, заключение контракта) до завершения ввода КА в целевое использование, после выведения СКА на орбиту с высотой на 300 км больше высоты ГСО.

Эксплуатация СКА заключается в многократной реализации сближения с объектами космического мусора (ОКМ) и вывода ОКМ с рабочей орбиты (ГСО) на орбиту

захоронения. Максимальное число объектов, транспортируемых одним СКА за срок его активного существования  $t_{ГС}$ , определяется уравнением

$$n_{ТО} = \frac{t_{ГС}}{t_{ув}} \leq n_{ТС}, \quad n_{ТС} = \frac{2\pi}{\Delta\lambda}, \quad (7)$$

где  $t_{ув}$  – длительность цикла увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения;  $n_{ТО}$  – число транспортируемых объектов;  $n_{ТС}$  – общее число точек стояния на ГСО;  $\Delta\lambda$  – диапазон по долготе, выделенный под точку стояния (точность удержания геостационарного КА в точке стояния).

Если КА на ГСО выходит из строя, некоторое время остаётся в своей точке стояния, а затем начинает дрейфовать вдоль ГСО. То есть сначала негативных эффект наличия неисправного КА на ГСО заключается в невозможности замены этого КА новым, рабочим КА (если у оператора такой есть на орбите или в состоянии стартовой готовности на Земле), а затем – в возникновении риска столкновения с другими КА на ГСО. Таким образом, убытки, вызванные аварийной потерей управления КА на ГСО, можно разделить на три категории:

- расходы, связанные с изготовлением (при отсутствии резервного КА) и запуском на орбиту спутника для замены аварийного КА;
- убытки от невозможности эксплуатировать рабочую точку на ГСО;
- снижение доходности работоспособных КА в других рабочих точках на ГСО вследствие сокращения времени их активного функционирования из-за необходимости дополнительного маневрирования.

Первая категория убытков может отсутствовать, если у оператора спутника связи не предусмотрена замена аварийного КА, или если вышедший из строя аппарат заменяется другим КА этого оператора путём перевода действующего КА в рабочую точку аварийного КА.

Вторая категория убытков связана как с потерей абонентской платы клиентов, которым не может быть предоставлена услуга, так и с необходимостью арендовать рабочую точку на ГСО (кроме случая, когда оператор является компанией в собственности государства с закреплённым на международном уровне перечнем рабочих точек в собственности).

Третья категория убытков образуется в результате дополнительного расхода рабочего тела активных КА, вынужденных совершать манёвры уклонения от столкновения с ОКМ. Поскольку необходимый запас рабочего тела является определяющим фактором для продления эксплуатации КА за пределами гарантийного срока активного существования, дополнительное маневрирование снижает возможный доход оператора

спутниковой связи, что в данной ситуации можно отнести к потенциальным убыткам. В случае, если дополнительное маневрирование в будущем гарантированно приведёт к нехватке рабочего тела системы коррекции КА для удержания в рабочей точке на ГСО в течение всего срока активного существования, необходимость такого маневрирования будет являться прямыми убытками для спутникового оператора.

Доход от эксплуатации СКА заключается в сокращении времени запрета  $t_{П}$  на использование точки стояния на ГСО по целевому назначению (отсутствие информационного обеспечения):

$$t_{П} = \begin{cases} t_{неп} - \text{нет СКА} \\ t_{ув} - \text{есть СКА} \end{cases}, \quad (8)$$

где  $t_{неп}$  – максимальное время перерыва в замене отказавшего КА.

Из выражения (8) видно, что время запрета на использование точки стояния соответствует времени, необходимому для запуска резервного КА на орбиту (и, при необходимости, изготовления этого резервного КА) или времени, затрачиваемому сервисным КА на сближение с отказавшим КА и увод его на безопасное расстояние.

Полагаем, что при сокращении времени запрета на использование точки стояния получим дополнительный доход от целевого использования КА в этой точке:

$$C_{дон} = (C_{y.d} - C_{y.p}) \cdot (t_{неп} - t_{ув}) = C_{ОКР.КА} \frac{t_{неп} - t_{ув}}{t_{o.б}}. \quad (9)$$

В результате суммарный чистый доход от применения СКА может быть представлен в следующем виде

$$C_{СКА} = C_{дон} \cdot n_{ТО} \cdot K_{заг} - C_{ОКР.СКА}, \quad (10)$$

где  $K_{заг}$  – коэффициент загрузки СКА по обслуживанию ГСО.

Для повышения дохода от эксплуатации СКА необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициент загрузки был максимальным, то есть новая цель для увода на орбиту захоронения должна быть известна ещё до окончания этапа увода предыдущей цели.

На основании формулы (10) определим выражение для расчета относительного безразмерного показателя экономической эффективности создаваемого проекта, т. н. индекс доходности проекта по созданию СКА:

$$K_{ид.СКА} = \frac{C_{СКА}}{C_{ОКР.СКА}} = n_{ТО} \cdot K_{заг} \frac{t_{неп} - t_{ув}}{t_{o.б}} \cdot \frac{C_{ОКР.КА}}{C_{ОКР.СКА}} - 1. \quad (11)$$

Из выражения (11) видно, что индекс доходности проекта по созданию СКА, в отличие от индекса доходности создания КА связи, зависит не только от времени эксплуатации СКА, но и от затрат на изготовление КА связи.

### 3 Анализ разработанных моделей

Исходя из условия  $K_{u.o} \geq 1$  (гарантированный возврат затрат на ОКР) находим по формуле (11) верхнюю границу окупаемости базовых затрат

$$K_{u.o.CKA} \geq 1, \quad \frac{C_{KP.CKA}}{C_{OKP.KA}} \leq 0,5 \cdot n_{TO} \cdot K_{zag} \frac{t_{nep} - t_{ys}}{t_{GC}} \cdot \frac{t_{GC}}{t_{o.b}}. \quad (12)$$

Полагая  $t_{o.b} \leq 0,5t_{GC}$  и подставляя в формулу (12), получим

$$\frac{C_{KP.CKA}}{C_{OKP.KA}} \leq \left( \frac{t_{nep}}{t_{ys}} - 1 \right) \cdot K_{zag}. \quad (13)$$

Из неравенства (13) видно, что в случае, если  $t_{nep} < t_{ys}$ , то есть когда время сближения СКА с ОКМ и увода его на безопасное расстояние больше, чем время, затрачиваемое оператором на ввод в эксплуатацию нового КА, отношение  $\frac{C_{OKP.CKA}}{C_{OKP.KA}}$  становится меньше нуля, и применение СКА нецелесообразно. При равенстве времени перерыва и времени увода оба способа восстановить эксплуатацию рабочей точки равнозначны. Таким образом, применение СКА для сокращения убытков спутниковых операторов целесообразно только в случае, когда время увода аварийного КА на безопасное расстояние от рабочей точки меньше времени ввода в эксплуатацию в этой же точке нового КА.

Для случая, когда затраты на ОКР по созданию СКА составляют долю от затрат на ОКР по созданию КА, появляется ограничение на соотношение временных характеристик при различных значениях загрузки

$$\delta C_{OKP} = \frac{C_{KP.CKA}}{C_{OKP.KA}} \cdot \frac{t_{nep}}{t_{ys}} \leq 1 + \frac{\delta C_{OKP}}{K_{zag}}. \quad (14)$$

Полученная система уравнений и неравенств позволяет определить область эффективного применения СКА и сформулировать ряд требований к его техническим параметрам исходя из ограничений по затратам на ОКР по его созданию.

#### Выводы

1. Определены цели и задачи удаления космического мусора с геостационарной орбиты, рассмотрены технические особенности размещения аварийный КА на орбите захоронения.

2. Разработана модель расчета экономической эффективности КА связи, позволяющая оценить срок окупаемости проекта по известным затратам на ОКР и удельным экономическим показателям эксплуатации КА на орбите. На основе этой модели произведена оценка индекса доходности проекта, который зависит только от времени эксплуатации КА по целевому назначению.

3. Разработана модель расчета экономической эффективности СКА и на ее основе

сформирован обобщенный показатель эффективности проекта, обеспечивающий минимизацию перерывов в использовании системной точки на геостационарной орбите. Убытки от выхода из строя КА связи на ГСО разделены на три категории: расходы, связанные с заменой аварийного КА рабочим; убытки от невозможности эксплуатировать рабочую точку; снижение доходности работоспособных КА в других точках геостационарной орбиты. Также выявлена прямая зависимость дохода от эксплуатации СКА с коэффициентом его загрузки.

4. Проведен анализ условий эффективного применения СКА. Обозначен критерий целесообразности применения СКА для снижения убытков операторов связи от вышедших из строя КА: время увода аварийного КА на орбиту захоронения должно быть меньше, чем время, необходимое оператору для восполнения орбитальной группировки.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований по теме «Разработка концепции сервисного космического аппарата для очистки области геостационарной орбиты (ГСО) от объектов космического мусора техногенной природы» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57617X0093.

#### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / В. Е. Чеботарев, В. Е. Косенко; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с. [24] с. ил.
2. Макаров В. В. Телекоммуникации России: состояние, тенденции и пути развития: монография. – М.: ИПАС, 2007. 286 с.
3. 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%20Space%20Debris%20Guidelines,%20Revision%201.pdf> (дата обращения: 30.05.2018)
4. 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.
5. Титов В. И. Экономика предприятия: учебник / М.; Эксмо, 2008. 416 с.
6. Лукашин Ю.П. Финансовая математика: Учебно-методический комплекс/ М: Изд. центр ЕАОИ, 2008. 200 с.
7. Нормирование показателей экономической эффективности спутников связи / В.Е. Чеботарев, В.В. Попов и др. // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2013. № 6 (52). С.60-64.