

УДК 629.78:338.45

DOI 10.48612/agat/space_economics/2025.04.11.06

Исследование вопросов экономической целесообразности обслуживания космических аппаратов на орбите

Research on the economic feasibility of spacecraft servicing in orbit

Данная статья посвящена рассмотрению вопросов экономической целесообразности продления срока активного существования космических аппаратов на орбите за счет ремонта с помощью обслуживающих космических аппаратов. Опираясь на мировой опыт и специфику рынка космических аппаратов России, исследуется необходимость будущей программы перехода на обслуживаемый космос в России.

This article is devoted to the consideration of the economic feasibility of extension of functional lifetime of spacecraft in orbit by repairing them with the help of servicing spacecraft. Based on the world experience and the specifics of the Russian spacecraft market, the necessity of a future program for the transition to serviced space in Russia is being investigated.

Ключевые слова: услуги на орбите, продление срока активного существования, обслуживаемый космический аппарат, экономическая целесообразность

Keywords: in-orbit services, extension of functional lifetime, serviced spacecraft, economic feasibility



СМИРНОВ ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ

Заместитель начальника управления – начальник отдела перспективных проектов
Управления ТЭО ФЦП, АО «Организация «Агат»

E-mail: SmirnovDP@agat-roskosmos.ru

SMIRNOV DMITRIY

Deputy Head of Directorate – Head of Prospective Projects
Department of Directorate of Feasibility Study of Federal Target Programs, JSC “Organization “Agat”



ДОЩАНОВА ДИАНА РУСЛАНОВНА

Главный специалист отдела бизнес-планирования и анализа
Управления перспективных программ и инвестиционного анализа,
АО «Организация «Агат»

E-mail: DoshchanovaDR@agat-roskosmos.ru

DOSCHANOVA DIANA

Chief specialist of Business Planning and Analysis Department
of Prospective Programs and Investment Analysis Directorate,
JSC “Organization “Agat”



ЖДАНОВ НИКИТА ДЕНИСОВИЧ

Ведущий специалист отдела СВ и НКИ
Управления ТЭО ФЦП, АО «Организация
«Агат»

E-mail: ZhdanovND@agat-roscoms.ru

ZHDANOV NIKITA

Leading specialist of Department of Launch Vehicles and
Ground-based Space Infrastructure of Directorate of Feasibility
Study of Federal Target Programs, JSC "Organization "Agat"

Для цитирования: Смирнов Д. П. Исследование вопросов экономической целесообразности обслуживания космических аппаратов на орбите / Д. П. Смирнов, Д. Р. Доцанова, Н. Д. Жданов // Экономика космоса. – 2025. – № 11. – С. 51–59. – DOI 10.48612/agat/space_economics/2025.04.11.06

Введение

Уже достаточно давно, почти с момента запуска первого искусственного спутника Земли, обсуждается возможность обслуживания космических аппаратов (далее – КА) на орбите. Наибольшую популярность тема обслуживания КА на орбите обрела, когда уровень технического совершенства позволил значительно увеличить срок активного существования (далее – САС) КА для решения целевых задач (рис. 1), а также были отработаны механизмы автоматической стыковки автоматических КА с обслуживающими платформами.

Иными словами, в настоящее время ряд стран обладает необходимыми знаниями и технологиями, чтобы обслуживать КА на орбите, и такие эксперименты активно проводятся во всем мире.

Ближайшим примером продления САС на орбите является работа обслуживающих аппаратов MEV (рис. 2), которые могут пристыковываться к КА и обеспечивать возможность маневрирования, не осуществляя дозаправку и ремонт самого аппарата.

Данные аппараты продлили САС геостационарным спутникам Intelsat^{1, 2}.

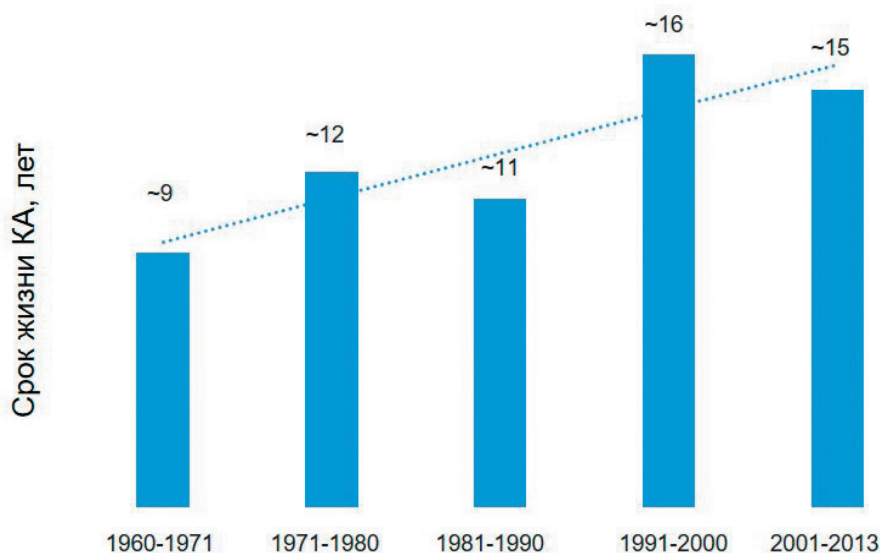


Рис. 1. Статистика фактического срока жизни КА на геостационарной орбите с момента запуска до завершения срока активного существования (все страны).

Источник: составлено авторами по результатам собственных разработок и исследований

¹ Фактический срок активного существования КА Intelsat составил 17 лет.

² "Mission Extension Vehicle 1 and Intelsat 901" [Электронный ресурс] // Intelsat: [сайт]. [2020]. URL: <https://www.intelsat.com/global-network/satellite-network/launches/intelsat-901/> (дата обращения 15.10.2024).

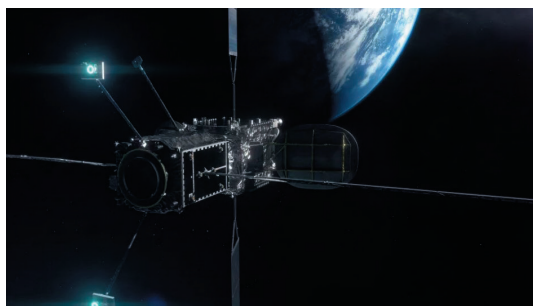


Рис. 2. Аппарат MEV, состыкованный со спутником клиента.
Источник: сетевой журнал о международной космонавтике SpaceNews³

Заявляемый эксплуатационный ресурс аппарата MEV – 15 лет [1], тогда как продлеваемый ресурс КА Intelsat 901 составил 5 лет [2], что в основном определялось моральным устареванием Intelsat 901, состоянием систем КА и экспериментальным значением миссии. Для экономической целесообразности миссии MEV ее стоимость, относимая на один КА типа Intelsat, должна быть в 3 раза меньше стоимости миссии по запуску нового КА Intelsat. При ориентировочной стоимости КА типа Intelsat в ~200 млн долл. и стоимости пуска на ракете-носителе (далее – РН) «Ариан-5»⁴ ~250 млн долл.^{5,6} стоимость миссии MEV, относимая на один КА типа Intelsat, должна составлять не более ~150 млн долл. За свой заявленный САС в 15 лет с учетом времени на перемещения КА MEV сможет обслужить два КА. Тогда общая стоимость миссии MEV не должна превышать ~300 млн долл. На основании заявки Intelsat в SEC (Комиссия по ценным бумагам и биржам США) компания будет платить ~13 млн долл. в год за услуги MEV – 1 в течение 5 лет (всего 65 млн долл.)⁷.

Такая бизнес-модель потенциально возможна для существующего парка геостационарных КА [3], если только:

- все системы обслуживаемого КА будут рассчитаны на эксплуатацию с резервом в ~30% (без увеличения стоимости КА);
- компании-оператору КА не потребуются обгонять конкурентов (которые к тому времени запустят КА, точнее отвечающие требованиям времени);
- не появятся новые, более производительные варианты реализации полезной нагрузки, позволяющие существенно увеличить экономическую эффективность КА.

Как видно из рассуждений выше, предпринимаемые попытки ремонта КА на орбите – это разовые акции, имеющие под собой много экономических «если». При такой бизнес-модели ремонт КА на орбите можно рассматривать как самокупаемые эксперименты для накопления опыта, которые могут являться промежуточным шагом к переходу на широкое использование обслуживаемых КА.

Если решать эту задачу системно, то организация обслуживания КА на орбите подразумевала бы создание необходимой инфраструктуры на Земле, на орбитах, создание единых требований/стандартов к составным частям КА, к обслуживанию на орбите, а также перепроектированию существующих КА с целью сделать их обслуживаемыми. Каким-то одним проектом решить такую задачу, как было показано выше, пока не получается – необходима долгосрочная программа, обеспечивающая переход на обслуживаемые КА («обслуживаемый космос»). Так как основным владельцем КА в Российской Федерации (и, соответственно, основным потенциальным заказчиком данной программы) является государство, то и обоснование возможной будущей программы перехода на обслуживаемый космос предполагаем строить в отношении государства.

В данном цикле статей мы попробуем заложить технико-экономический фундамент (системную идеологию) и провести анализ условий целесообразности перехода на обслуживаемый космос, в том числе попытаемся сформулировать необходимые технико-экономические требования для такого перехода.

Цели и задачи обслуживания КА на орбите

В дальнейшем наши рассуждения будут строиться

³ «Intelsat продлевает контракты на продление срока службы спутников» [Электронный ресурс] // SpaceNews: [сайт]. [2024]. URL: <https://spacenews.com/intelsat-extends-satellite-life-extension-contracts/> (дата обращения: 15.10.2024).

⁴ Европейская ракета-носитель семейства «Ариан» тяжелого класса, использовавшаяся с 1996 по 2023 год.

⁵ Стоимость, приведенная в ценах 2024 г.

⁶ «Arianespace ставит перед собой высокие цели в Азиатско-Тихоокеанском регионе» [Электронный ресурс] // Flight Global: [сайт]. [2016]. URL: <https://www.flightglobal.com/arianespace-aims-high-in-asia-pacific/120757.article> (дата обращения: 15.10.2024).

⁷ «Еще одна миссия по спасению MEV» [Электронный ресурс] // Bcsatellite: [сайт]. [2020]. URL: <https://www.bcsatellite.net/blog/another-mev-rescue-mission/> (дата обращения: 15.10.2024).

для гражданского космоса, так как для военных задач экономика далеко не всегда стоит на первых местах и принятие решения о работах по обслуживаемому космосу часто формируется из других приоритетов.

Основную цель обслуживания КА на орбите формулируют как снижение затрат на создание и поддержание орбитальных группировок [4].

Если обратить внимание на ставки страхования космических миссий, то можно предположить, что строить обоснование большой программы системного перехода на обслуживаемый космос только на ремонте «сломавшихся» КА может быть экономически невыгодно, так как поломки КА хоть и имеют место, но не часто, на системном уровне эта проблема в целом решена, а затраты на общий переход к «обслуживаемому космосу» очень существенные.

Сама по себе транспортировка КА в космосе – интересная, но уже успешно решенная инженерная задача. Получаемая в настоящее время стоимость транспортировки («своим ходом» на высокие орбиты и при помощи атмосферы/гравитации Земли при спуске)⁸ в целом устраивает специалистов и заказчиков космической техники.

Простое продление САС КА в отдельных случаях может быть целесообразно, например, как в случае с миссией MEV, но при распространении на все КА может привести к ситуации, когда продление сроков эксплуатации мораль-

но устаревшего оборудования с неактуальным уровнем производительности, стандартов передачи данных и других параметров не будет оправданным. Можно привести аналогию, когда перевозить грузы на автомобиле ГАЗ-АА («полторка») в 21 веке конечно можно, но это будет выглядеть несколько странно.

Взгляд на целесообразность обслуживания начинает меняться, если посмотреть на укрупненную структуру стоимости и массы «условно-серийных» КА на орбите. Все КА могут быть условно разделены на две основные составные части (рис. 3):

1. Модуль полезной нагрузки КА (далее – МПН КА), который содержит научные приборы, приборы ДЗЗ и прочее оборудование, которое выполняет основные целевые функции.
2. Служебная платформа КА, включающая в себя элементы и системы, необходимые для функционирования спутника: систему электропитания, двигательную установку, датчики ориентации и др.

Как видно из рис. 3, платформа КА занимает значительную часть стоимости и массы КА. И если под увеличением САС КА подразумевать замену модуля (элементов модуля) ПН КА и условно-заменяемых составных частей (далее – СЧ) платформы КА, то при определенных условиях такая операция становится экономически оправдана (для значительной части группировок КА), если это решает проблему морального устаревания ПН, описанную выше.

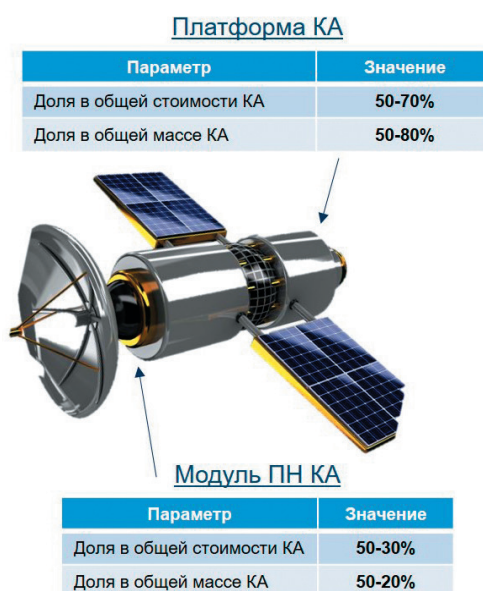


Рис. 3. Укрупненная структура стоимости и массы КА.

Источник: составлено авторами по результатам собственных разработок и исследований

⁸ Равна стоимости доставки на орбиту дополнительного топлива для электроракетной двигательной установки, которое «загружается» в КА перед стартом.

Устоявшиеся сроки морального устаревания ПН КА и платформы КА показаны на рис. 4.

Из-за того, что САС условно-заменяемых СЧ (см. ниже) определяется САС МПН, то в качестве дополнительных опций предложенного выше варианта продления САС должна быть рассмотрена возможная крупно-узловая замена СЧ служебной платформы и дозаправки служебной платформы КА. При этом время проведения операций замены СЧ платформы КА не обязано совпадать со временем проведения операций замены МПН. В качестве примера САС отдельных СЧ КА можно привести:

- солнечные батареи КА – до 15,5 лет¹⁰;
- никель-водородные аккумуляторные батареи – 15 лет [5];

- бортовой радиотехнический комплекс (БРТК) для гидрометеорологических космических аппаратов на ГСО – 10 лет¹¹;
- бортовая навигационная аппаратура системы траекторных измерений для ГЛОНАСС – не менее 5 лет¹²;
- многозональный сканирующий комплекс для оперативного гидрометеорологического наблюдения Земли с геостационарной орбиты – 10 лет¹³.

В рамках предлагаемой модели обслуживаемого космоса САС КА будет уже определяться балансом между стоимостью создания условно-заменяемых СЧ («расходники») и временем морального устаревания МПН КА. Оценочный САС основных СЧ КА приведен на рис. 5.

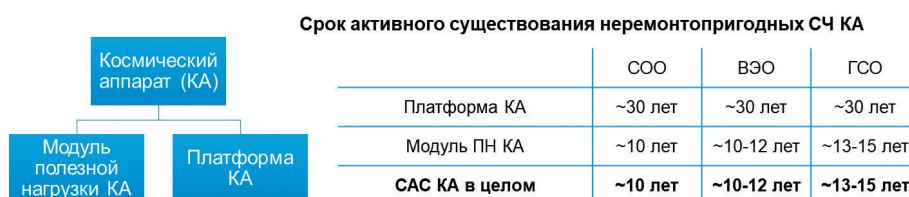


Рис. 4. Устоявшиеся сроки морального устаревания основных СЧ КА, где СОО – средняя околоземная орбита, ВЭО – высокая эллиптическая орбита, ГСО – геостационарная орбита⁹.

Источник: составлено авторами по результатам собственных разработок и исследований

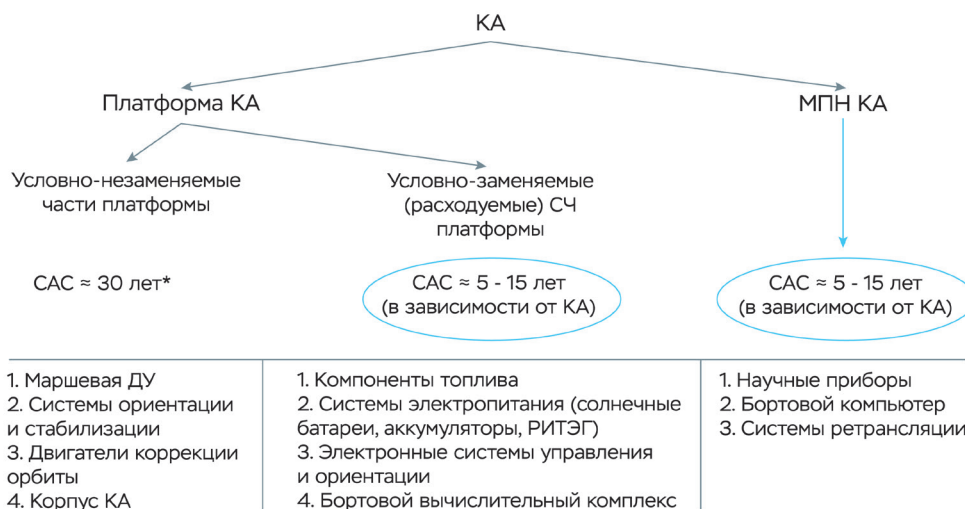


Рис. 5. Оценка САС СЧ КА, где ДУ – двигательная установка, РИТЭГ – радиоизотопный термоэлектрический генератор. Источник: составлено авторами по результатам собственных разработок и исследований

Примечание: * – экспертная оценка АО «Организация «Агат» для всех КА, принятая как ограничение морального устаревания платформы и определяемая общим уровнем технологического развития страны.

⁹ В настоящее время срок активного существования КА на высоких орбитах определяется по минимальному сроку морального устаревания его основных составных частей (платформы КА и/или МПН КА).

¹⁰ «Российские спутники станут долгожителями: ученые увеличили срок службы солнечных батарей» [Электронный ресурс] // МК: [сайт]. [2017]. URL: <https://www.mk.ru/science/2017/02/09/rossiyskie-sputniki-stanut-dolgozhitelyami-uchenye-velichili-srok-sluzhby-solnechnykh-batarey.html> (дата обращения: 15.10.2024).

¹¹ Бортовая аппаратура [Электронный ресурс] // РКС: [сайт]. [2024]. URL: <https://russianspacesystems.ru/bussines/cosmostroy/bortovaya-apparatura/> (дата обращения: 15.10.2024).

¹² Там же.

¹³ Там же.

Если КА изначально проектируются как обслуживаемые, то продление САС КА в 2–3 раза за счет замены ПН (что позволяет избежать быстрого морального устаревания КА), которая весит ~50% от массы КА (что потенциально в два раза снижает стоимость доставки ПН), становится экономически интересным. В этом случае обслуживание на орбите может включать цели, приведенные в табл. 1.

При этом в рамках программы перехода на «обслуживаемый космос» помимо экономической целесообразности остро встают и смежные вопросы [8]:

- унификации и стандартизации электрических и механических стыковочных интерфейсов, габаритов СЧ КА, требований к платформе КА с учетом ее более длительного использования и т.д.;
- технических ограничений реализации концепции «обслуживаемого космоса», так как из-за таких ограничений не для всех КА и орбит это экономически оправдано;
- создания инфраструктуры «обслуживаемого космоса» как на орбите, так и на Земле;
- учета современных тенденций и сроков развития ракетной техники;

- новой индустриальной модели отрасли производства КА, так как снижение количества изготавливаемых СЧ КА приведет к снижению выручки предприятий ракетно-космической отрасли;
- появления новых возможностей и новых рынков в космической деятельности;
- корректировки парадигмы освоения космического пространства.

Экономическая целесообразность обслуживания КА на орбите

АО «Организация «Агат» разработало проект модели оценки эффективности перехода на «обслуживаемый космос». В рамках данной модели вывод об экономической целесообразности делается на основе сравнения первоначальных затрат на создание системы «обслуживаемого космоса» и полученной экономии затрат.

Первоначальные затраты на создание системы «обслуживаемого космоса» будут рассчитываться по формуле:

$$C_{\text{перв}} = C_{\text{ОКР}}^{\text{ун.пл.}} + C_{\text{ОКР}}^{\text{модуль ПН}} + C_{\text{ОКР}}^{\text{обсл.КА}}, \quad (1)$$

Основные цели обслуживания		
	Модернизация	Продление САС КА путем проведения модернизации обслуживаемых КА на орбите, позволяющее заменить отдельные компоненты (ПН) на более современные
Второстепенные цели обслуживаемого космоса		
	Техническое обслуживание и ремонт	Выполнение ремонтных работ непосредственно на орбите, замена вышедших из строя компонентов, проведение регулировки и калибровки систем
	Перемещение КА / СЧ КА	Довыведение КА / модуля ПН, ЗИП (запасные части, инструменты и принадлежности), топлива на целевые орбиты
	Дозаправка	Проведение дозаправки топливом, замена/зарядка других источников энергии обслуживаемых КА на орбите
	Диагностика и мониторинг	Проведение всесторонней диагностики состояния обслуживаемых КА на орбите высокоточными сенсорами и системами телеметрии

Табл. 1. Цели обслуживаемого космоса [6–7].

Источник: составлено авторами по результатам собственных разработок и исследований

где

$C_{перв}$ – сумма первоначальных затрат;

$C_{ОКР}^{(ун.пл.)}$ – стоимость опытно-конструкторских работ (далее – ОКР) на разработку (доработку) служебной платформы для возможности ее замены;

$C_{ОКР}^{(модуль ПН)}$ – стоимость ОКР на разработку (доработку) модулей полезной нагрузки для возможности их замены;

$C_{ОКР}^{(обсл.КА)}$ – стоимость ОКР на создание обслуживающих КА (включая затраты на выведение).

Для расчета экономии затрат сравниваются затраты на первоначальное выведение и поддержание орбитальной группировки при ныне используемой модели (базовый сценарий) и затраты при использовании модели «обслуживаемого космоса» (инвестиционный сценарий).

Стоимость первоначального выведения группировки в базовом сценарии:

$$C_{вывед}^{базов} = C_{изг}^{КА} + C_{вывед}^{КА} \quad (2)$$

где

$C_{изг}^{КА}$ – стоимость изготовления группировки КА;

$C_{вывед}^{КА}$ – стоимость выведения группировки КА.

Стоимость первоначального выведения группировки при использовании модели «обслуживаемого космоса»:

$$C_{вывед}^{инвест} = C_{изг}^{ремонт.КА} + C_{изг}^{обсл.КА} + C_{вывед}^{КА} + C_{вывед}^{обсл.КА} \quad (3)$$

где

$C_{изг}^{(ремонт.КА)}$ – стоимость изготовления группировки обслуживаемых КА;

$C_{изг}^{(обсл.КА)}$ – стоимость изготовления обслуживающих КА;

$C_{вывед}^{КА}$ – стоимость выведения группировки КА;

$C_{вывед}^{(обсл.КА)}$ – стоимость выведения обслуживающих КА.

При этом стоимость изготовления группировки обслуживаемых КА будет рассчитываться следующим образом:

$$C_{изг}^{обсл.КА} = C_{изг}^{КА} * k \quad (4)$$

где

k – коэффициент, учитывающий удорожание изготовления обслуживаемого КА по сравнению с КА, для которого не предусмотрена возможность обслуживания.

Стоимость поддержания группировки в базовом сценарии рассчитывается так же, как и стоимость первоначального выведения группировки КА (2).

Стоимость поддержания группировки в модели «обслуживаемого космоса» рассчитывается следующим образом:

$$C_{поддерж}^{инвест} = C_{изг}^{служ.модуль} + C_{изг}^{ЗИП и топливо} + C_{обсл.КА}^{обесп.} + C_{вывед}^{ПН и расх.} \quad (5)$$

где

$C_{изг}^{(служ.модуль)}$ – стоимость изготовления служебной платформы (модуля ПН КА);

$C_{изг}^{(ЗИП и топливо)}$ – стоимость изготовления ЗИП и топлива для обслуживаемого КА;

$C_{(обесп.)}^{(обсл.КА)}$ – стоимость изготовления ЗИП, топлива и затрат на эксплуатацию для обслуживаемых КА;

$C_{вывед}^{(ПН и расх.)}$ – стоимость выведения ПН КА и расходных материалов (ЗИП и топливо для КА).

Предварительные расчеты по представленным выше формулам показывают, что экономия затрат на выведение и поддержание группировки КА при использовании модели «обслуживаемого космоса» может составить от десятков до сотен млрд руб. в ценах 2024 г. в зависимости от орбиты орбитальной группировки и сроков реализации проекта.

Заключение

В первой статье цикла рассмотрена возможная идеология подхода к организации обслуживания КА на орбите, которая может быть положена в основу будущей программы перехода на «обслуживаемый космос». Также представлена укрупненная модель оценки экономической эффективности перехода на «обслуживаемый космос».

В последующих статьях будет сделана оценка экономического эффекта от перехода на «обслуживаемый космос» для различных типов орбитальных группировок КА и их целевого назначения, а также будут рассмотрены пути решения открытых вопросов, сформулированных в настоящей статье.

Список литературы

1. Каткалов В. Б. Обслуживаемый космос. Новые достижения и перспективы / В. Б. Каткалов, М. Л. Морозова. – Текст: непосредственный // Инновации космической отрасли. – 2022. – Т. 6, № 3 (41). – С. 207–217.
2. Каткалов В. Б. Перспективы развития спутниковых услуг / В. Б. Каткалов. – Текст: непосредственный // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2020. – № 1. – С. 24–31.
3. Белоножка П. П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденция развития. Аналитический обзор / П. П. Белоножка. – Текст: непосредственный // Наука и образование. – 2016. – № 12. – С. 110–153.
4. Азаренко Л. Г. Космические услуги: экономика и управление / Л. Г. Азаренко – Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 252 с.; ISBN 978-5-9729-0197-5. – Текст: непосредственный.
5. Галкин В. В. Солнечные и аккумуляторные батареи ОАО «Сатурн» на космических аппаратах с электронными двигателями / В. В. Галкин. – Текст: непосредственный // Труды МАИ. – 2012. – № 60. – С. 100–110.
6. Иванов М. В. Основные положения концепции орбитального обслуживания перспективных автоматических космических аппаратов / М. В. Иванов. – Текст: непосредственный // Вестник Московского космического института. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 15–27.
7. Силантьев С. Роботы на орбите / С. Силантьев, И. Фоминов, С. Королев. – Текст: непосредственный // Воздушно-космическая сфера. – 2016. – № 2 (87). – С. 118–123.
8. Буланов В. В. Автоматический космический аппарат обслуживания и ремонта / В. В. Буланов, В. И. Лукьященко, Г. Р. Успенский, В. М. Иванов, В. И. Миронов, Г. В. Малышев. – Текст: непосредственный // Российский космический бюллетень. – 1997. – Т. 4, № 2. – С. 111–120.

List of literature

1. Katkalov V. B. Serviced space. New achievements and prospects / V. B. Katkalov, M. L. Morozova. – Text: direct // Innovations of the space industry. – 2022. – Vol. 6, № 3 (41). – pp. 207–217.
2. Katkalov V. B. Prospects for the development of satellite services / V. B. Katkalov. – Text: direct // Intelligent technologies in transport. – 2020. – № 1. – pp. 24–31.
3. Belonozhka P. P. Space robotics. Current state, promising tasks, development trend. Analytical review / P. P. Belonozhka. – Text: direct // Science and Education. – 2016. – № 12. – pp. 110–153.
4. Azarenko L. G. Space services: economics and management / L. G. Azarenko – Vologda: Infra-Engineering, 2018. – 252 p.; ISBN 978-5-9729-0197-5. – Text: direct.
5. Galkin V. V. Solar and rechargeable batteries of Saturn OJSC on spacecraft with electronic engines / V. V. Galkin. – Text: direct // Proceedings of MAI. – 2012. – № 60. – pp. 100–110.
6. Ivanov M. V. Basic provisions of the concept of orbital maintenance of advanced automated spacecraft / M. V. Ivanov. – Text: direct // Bulletin of the Moscow Space Institute. – 2008. – Vol. 15, № 3. – pp. 15–27.
7. Silantyev S. Robots in orbit / S. Silantyev, I. Fominov, S. Korolev. – Text: direct // Aerospace sphere. – 2016. – № 2 (87). – pp. 118–123.
8. Bulanov V. V. Automatic spacecraft for maintenance and repair / V. V. Bulanov, V. I. Lukyashenko, G. R. Uspensky, V. M. Ivanov, V. I. Mironov, G. V. Malyshev. – Text: direct // Russian Space Bulletin. – 1997. – Vol. 4, № 2. – pp. 111–120.

Рукопись получена: 19.11.2024

Рукопись одобрена: 17.03.2025