



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-1-43-53
УДК 629.764

Научная статья / Research article

Сравнительный анализ экономической целесообразности применения ракет-носителей сверхлегкого класса

Ю.А. Назарова*, В.А. Тихонов

Российский университет дружбы народов,
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6
*E-mail: nazarova-yua@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 19 ноября 2020 г.
Доработана: 09 февраля 2021 г.
Принята к публикации: 27 февраля 2021 г.

Аннотация. Актуальность рассматриваемого вопроса связана с эволюцией существующих технологий, благодаря которым увеличивается функционал и снижается масса полезной нагрузки, вследствие чего поднимается вопрос об использовании экономически выгодных средств выведения. Цель работы заключается в проведении сравнительного анализа целесообразности применения ракет-носителей сверхлегкого класса для оказания услуг по доставке малоразмерных космических аппаратов на низкую околоземную орбиту. Статья выдержана в рамках социально-экономических методов исследования. Ретроспективный анализ и сравнительный подход сочетаются с применением количественных методов. Теоретическая значимость исследования состоит в анализе современной эксплуатации малоразмерных космических аппаратов и состояния мировой ракетно-космической сферы, разбора существующей стратегии Госкорпорации «Роскосмос» в рамках разработки новой линейки многоразовых ракет-носителей и рассмотрении перспективных проектов отечественных частных компаний, занимающихся созданием ракет-носителей сверхлегкого класса. Практическая значимость заключается в возможности применения результатов изучения интенсивности космических запусков при принятии стратегических решений о применении ракет-носителей сверхлегкого класса. На основе оценки существующих прогнозов по разработке и созданию малоразмерных космических аппаратов сделан вывод о заинтересованности мирового космического рынка к видам спутников и классам ракет-носителей для их выведения.

Ключевые слова: ракета-носитель сверхлегкого класса, малоразмерный космический аппарат, перспективы создания, актуальность разработки, инвестиции

Для цитирования

Назарова Ю.А., Тихонов В.А. Сравнительный анализ экономической целесообразности применения ракет-носителей сверхлегкого класса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 1. С. 43–53. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-43-53>

© Назарова Ю.А., Тихонов В.А., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Comparative analysis of the economic feasibility of using ultra-small spacecrafts

Yulia A. Nazarova*, Vladimir A. Tikhonov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation
*E-mail: nazarova-yua@rudn.ru

Article history

Received: November 19, 2020

Revised: February 09, 2021

Accepted: February 27, 2021

Abstract. The relevance of the issue under consideration is associated with the evolution of existing technologies, due to which the functionality increases and the mass of the payload decreases, as a result of which the question of the use of cost-effective launch vehicles is raised. The purpose of this work is to carry out a comparative analysis of the feasibility of using ultra-light launch vehicles to provide services for the delivery of small spacecraft to low-earth orbit. The article is written within the framework of socio-economic research methods. Retrospective analysis and comparative approach are combined with the use of quantitative methods. The theoretical significance of the study consists in the analysis of the modern operation of small spacecraft and the state of the world rocket and space industry, analysis of the existing strategy of the State Corporation «Roscosmos» in the development of a new line of reusable launch vehicles and consideration of promising projects of domestic private companies involved in the creation of ultra-light launch vehicles. The practical significance lies in the possibility of using the results of studying the intensity of space launches when making strategic decisions on the use of ultra-light launch vehicles. Based on the assessment of existing forecasts for the development and creation of small-sized spacecraft, it is concluded that the world space market is interested in the types of satellites and classes of launch vehicles for their launch.

Keywords: ultralight launch vehicle, small-sized spacecraft, prospects for creation, relevance of development, investment

For citation

Nazarova YA, Tikhonov VA. Comparative analysis of the economic feasibility of using ultra-small spacecrafts. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(1):43–53. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-43-53>

Введение

Ракетно-космическая отрасль предопределяет инновационное развитие технологий в стране, позволяет решать научно-технологические задачи и успешно взаимодействовать с зарубежными странами. Сверхмалые и малые космические аппараты — одно из актуальных инновационных направлений в развитии ракетно-космической промышленности.

К сверхмалым и малым спутникам можно отнести космические аппараты, вес которых колеблется в диапазоне от 10 г до 500 кг. Одним из важных вопросов

при создании подобных космических аппаратов является выбор материалов и методов повышения весовой эффективности конструкций с учетом их назначения, силовой работы и условий эксплуатации. Авторами [1] даны рекомендации по выбору материалов комплектующих и технологии изготовления, приведены примеры создания сверхлегких конструкций и их свойств. В статье [2] рассматриваются вопросы совершенствования системы электропитания сверхмалых космических аппаратов. С развитием технологий функциональные возможности малых космических

аппаратов увеличиваются, и они находят широкое применение в различных сферах: дистанционное зондирование Земли и исследование других планет [3; 4]; космические наблюдения [5]; экологический мониторинг [6]; образование, технологическое и программно-аппаратное развитие [7]; измерение плотности термосферы и скорости ветра [8]; исследование астероидов [9; 10] и т. д.

Разработка технологий для создания стандартов сверхмалых космических аппаратов (СМКА) позволяет некоторым странам (США, Россия, Китай, Германия, Индия, Япония и др.) и частным компаниям (PlanetLabs, Hera Systems, Karten Space, Спутник, Даурия и др.) выходить на серийное производство, открывая возможности в удовлетворении потребностей заказчиков не только в штучном варианте какого-либо аппарата, но и в обеспечении развертывания орбитальной группировки за небольшое время.

По сравнению с крупногабаритными космическими аппаратами у малых космических аппаратов (МКА) и СМКА можно выделить как преимущества, так и недостатки [11; 12]. Среди недостатков можно отметить:

- небольшой срок использования;
- функциональные ограничения;
- слабая защита от воздействия внешнего фактора.

Отмеченные недостатки компенсируются преимуществами:

- массовость;
- возможность перераспределения ролей в миссиях [13].

С одной стороны, массовый запуск СМКА на низкую околоземную орбиту (НОО) обуславливает повышение уровня загрязнения космического пространства, что приводит к недовольству мировой общественности, которая разрабатывает различные рекомендационные меры для сохранения космического пространства будущим поколениям¹. Проблеме космического мусора также посвящены многочисленные исследования, что указывает на важность данного вопроса [14; 15]. С другой стороны, для применения средств и отработки технологий по очистке орбиты необходима ракета-носитель (РН), которая будет осуществлять попутную доставку или с возможностью ее отдельного использования [12; 16; 17].

Для решения задач подобного рода целесообразнее будет разрабатывать СМКА с корректирующей двигательной установкой (КДУ), которая позволит не только выводить и поддерживать аппарат на целевой орбите, но и уводить его с орбиты в случае завершения эксплуатации [18]. Применение КДУ серьезным образом повлияет на стоимость аппаратов и их тактико-технические характеристики, однако позволит отработать технологии, которые в дальнейшем будут совершенствоваться и применяться не только для МКА, но и более крупных КА.

Другой же вариант — это использование космического буксира для тех СМКА (МКА), которые не могут выйти на необходимую орбиту самостоятельно (примером может выступать космический тягач «Vigoride» от компании Momentus Space или «Strannik» от компании Success Rockets). Для определения рентабельности каждого варианта следует проводить отдельное сравнение, но однозначно можно сказать одно — каждому аппарату необходима такая РН, которая способна вывести на целевую орбиту с минимальным расходом и высоким коэффициентом надежности, показывающим отношение числа аварийных запусков к общему их числу, осуществленному РН определенного класса.

1. Цель

В данной статье рассматривается целесообразность использования РН сверхлегкого класса (СЛК) на фоне других классов по оказанию услуг в выведении МКА на НОО с учетом тенденции использования СМКА, а также на основе анализа динамики выведения СМКА и информации по запускам РН СЛК, представленного на международной конференции «Инженерные системы — 2020» [19], делаются собственные прогнозы на будущий период (до 2023 г.).

2. Методы

В рамках работы над настоящей статьей была собрана и проанализирована информация из открытых баз данных по выведенным наноспутникам, а также отчеты о космических запусках.

¹ Руководящие принципы Комитета по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/space_debris.shtml (дата обращения 23.09.2020).

На основе ретроспективного анализа сопоставляются данные по динамике выведенных КА и запусков РН за период 2017—2020 гг., что позволило оценить заинтересованность мирового космического сообщества в видах КА для решения определенного круга задач (дистанционное зондирование Земли, навигация, связь и др.) и РН, осуществляющих их выведение.

Для отображения результатов проведенного сравнительного анализа используются графические методы с комментариями.

На основе проведенного исследования выполнены собственные прогнозы дальнейшего использования мировым сообществом СМКА, а также сделаны выводы о возможных перспективных тенденциях использования РН СЛК и динамике космических запусков для трех ведущих держав (РФ, США и КНР).

3. Результаты

Исходя из существующих прогнозов интерес в использовании СМКА (с размерностью нано 10—1 кг и менее) будет увеличиваться. На рис. 1 представлены фактические показатели успешно выведенных КА, отдельно выделено количество запущенных СМКА за период с 2017 по 2020 г. и прогнозы SpaceWorks до 2023 г.

Как видно из графиков рис. 1 с 2017 г. происходит увеличение общего числа запущенных наноспутников

(в данной статистике приведены как удачные запуски, так и аварийные), однако их запуски с РН стали сокращаться — это связано с тем, что часть подобных аппаратов выводится на орбиту с борта международной космической станции (МКС), следовательно, их доставка осуществляется на борту космических кораблей (КК) [7; 16; 17; 20].

В целом наблюдается мировой рост запусков аппаратов различного типа за исключением кризисного периода в 2020 г., когда из-за эпидемиологической обстановки произошел заметный спад. Общее количество запущенных объектов с РН за 2020 г. (по состоянию на октябрь) составляет 1037 аппаратов, 780 из которых являются аппаратами Starlink (массой равной 227—260 кг) компании SpaceX (США), предназначенными для формирования глобальной спутниковой системы, для обеспечения высокоскоростным интернетом на большей части земной поверхности. По некоторым оценкам, за 2019 г. выведение КА в 2020 г. мировым сообществом (без учета США) сократилось на 22 %.

Основная доля СМКА, запущенных с поверхности Земли, осуществлялась в виде попутного запуска с более крупными аппаратами на РН средних или тяжелых классов (СК и ТК). Лишь малая часть была доставлена НОО на РН СЛК кластерным видом, вывод которых можно выделить в основном как успешные. Практически 85 % выведенных СМКА научно-технологические

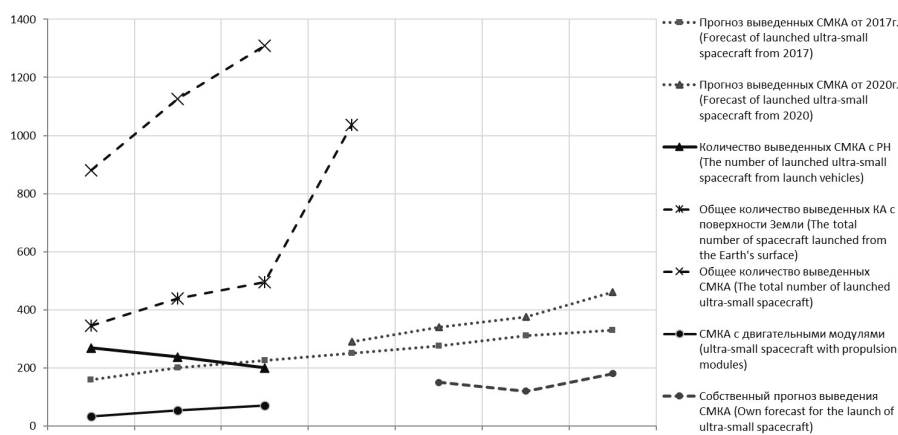


Рис. 1. Запуски КА и СМКА за период 2017—2020 гг. с прогнозами до 2023 г.

Figure 1. Launches of spacecraft and ultra-small spacecraft for the period from 2017—2020 with forecasts up to 2023¹

¹ Nanosats Database. URL: <https://www.nanosats.eu/> (дата обращения 06.10.2020).

и исследовательско-образовательные, разработанные и созданные в основном компаниями (50 %) и университетами (35 %). Данные цифры показывают, что в мире активно привлекаются учебные заведения для реализации программ, позволяющих решать вопросы по разработке, созданию и запуску КА различного типа. Так, например, российские университеты (МГУ им. М.В. Ломоносова, МАИ и др.) принимают участие в программах бесплатного запуска собственных аппаратов на отечественных РН.

Рассматривая прогнозы, составленные SpaceWorks и представленные Nanosats Database (рис. 1), можно заметить корректировку статистики общего количества запусков СМКА, что повлияло на актуализацию прогноза в 2020 г. по сравнению с прогнозом 2017 г. Учитывая чувствительность рынка и экономик мира к кризисным потрясениям, мы сделали предположение с собственным прогнозом на три года. По причине серьезных ограничений, связанных с эпидемиологической обстановкой 2020 г., будет происходить спад запусков СМКА. Восстановление показателей запусков на уровне 2019 г. можно ожидать через 2—3 года при условии улучшения эпидемиологической обстановки и спада ограничительных мер. Это связано с откликом проблем, которые отразятся в будущем на финансовом состоянии многих коммерческих и учебных заведений, заставляя их сокращать свой бюджет и избегать излишних затрат.

За период с 2017 по 2020 г. мировым сообществом было осуществлено 392 запуска, из которых

доля аварийных составляет 5,8 %. Лидерами по запускам являются три государства: КНР, США и РФ, на которые приходится 76 % всех осуществленных запусков (рис. 2).

Основным средством выведения полезной нагрузки (ПН) на орбиту является СК (рис. 2). В зависимости от поставленных задач, целью которых является выведение груза на определенные орбиты, приоритеты в основном ставятся на дорогостоящие аппараты, масса которых превышает 500 кг. Кроме того, это основной класс, который осуществляет вывод КК как для РФ, так и КНР. Для РН ТК основной задачей является выведение полезной нагрузки на высокую орбиту или кластерный запуск массивных аппаратов, а также данный класс будет использоваться при выведении перспективных частично многоразовых КК, которые находятся на проектной стадии разработки у некоторых стран.

С недавнего времени можно наблюдать тенденцию использования РН СЛК (рис. 3), однако в основном это исходит со стороны американской частной компании, которая имеет свое дочернее подразделение и реализует пуски в Новой Зеландии. Некоторые страны, например такие, как КНР и Япония, также используют РН данного класса, но на текущий момент без коммерческой составляющей. Для РН легкого класса (ЛК) забронирована своя ниша по выведению аппаратов массой 500—1500 кг на НОО или солнечно-синхронную орбиту (ССО).

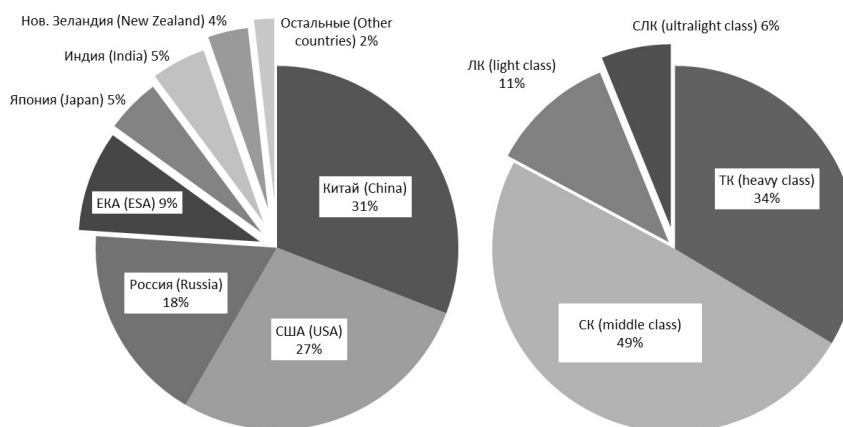


Рис. 2. Доля космических запусков мировым сообществом и средств выведения за период 2017–2020 гг. [19]

Figure 2. Share of space launches by the world community and launch vehicles for the period 2017–2020 [19]

Исходя из условий, сложившихся в 2020 г., прогнозируем увеличение кластерных запусков на фоне общего снижения количества запусков, что связано со стремлением заказчика сохранить финансовые ресурсы до нор-

мализации состояния мировой экономики и выведения КА экономически целесообразными способами.

Рассматривая динамику запусков за 10 лет, можно отметить сохранение позиции РФ в тройке лидеров космических держав (рис. 4).

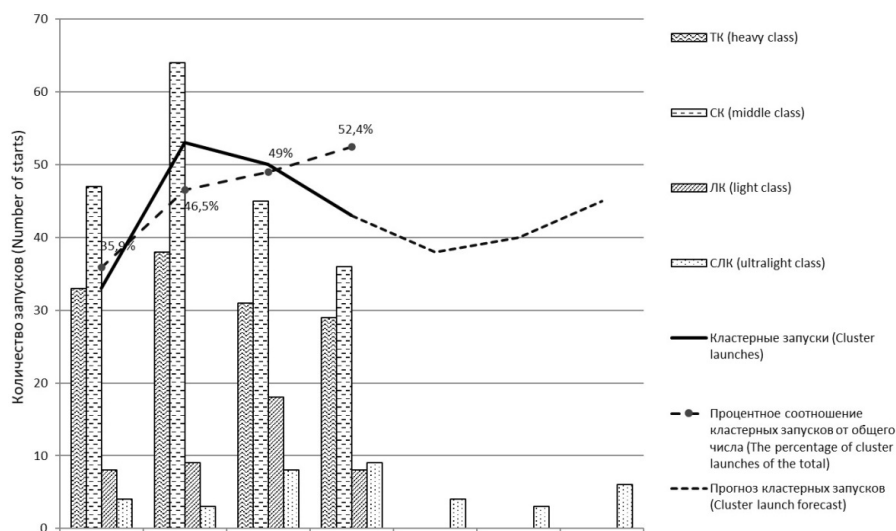


Рис. 3. Тенденция использования РН СЛК в 2018-2023 гг.
 Figure 3. Trend in the use of ultralight launch vehicles, 2018-2023

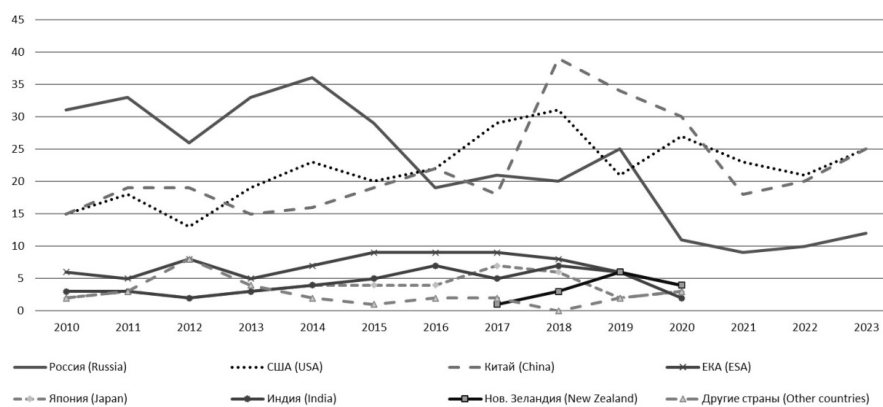


Рис. 4. Динамика космических запусков за 10 лет с прогнозом на период до 2023 г.
 Figure 4. Dynamics of space launches over 10 years with a forecast for the period up to 2023

Также наблюдается чувствительность мирового космического рынка к карантинным и ограничительным мерам перед угрозой COVID-19. На графике (см. рис. 4) с 2016 г. видно появление нового игрока — компания SpaceX (США), которая активно конкурирует с существующими компаниями, что отразилось в том

числе на коммерческих запусках в РФ. По нашим предположениям, динамика запусков снизится в 2021 г., с последующим медленным ростом, однако стоит обратить внимание на два факта:

1. На данный момент у компании SpaceX действует программа по выведению группировки Starlink,

находящейся на первой фазе, из этого следует, что динамика запусков может сохраниться в целях выполнения программы.

2. КНР имеет большую экономическую силу, с помощью которой способна держать количество запусков на уровне 2019 г., но, учитывая мировое состояние из-за ограничительных мер и в связи с этим их влияние на мировую торговлю, будут проявляться действия с целью экономии бюджета.

Отдельно следует проанализировать долю запусков стран-лидеров, проведенных за счет зарубежных заказчиков или совместно с ними. Так, за период 2017-2020 гг. доля запусков за счет зарубежных заказчиков составляет: в РФ — 31 %, США — 36 %, КНР — 11 %. Если разобрать отдельно общее число запусков РФ, то только 33 % были осуществлены с целью доставки космонавтов и грузов на МКС, государственные и коммерческие заказы — 20 % и заказы министерства обороны РФ — 16 %.

Помимо конкурентов в лице США существуют и другие: Европейское космическое агентство (ЕКА) с их РН ТК «Ариан-5» и ЛК «Вега», Индия с РН «PSLV» (класс в зависимости от модификации) и Япония с РН СК «Н-11» и ЛК «Epsilon». Свою нишу стала занимать компания Rocket Lab, используя РН СЛК «Electron», кото-

рая с 2017 года не имеет конкуренции в доставке ПН сверхлегким классом. Со стороны РФ открывается возможность в обновлении существующих КК «Союз» и «Прогресс» новым перспективным транспортным кораблем «Орел» с возможностью в дальнейшем использовать его к полетам на Луну, а для его выведения будет использоваться РН «Ангара» версии «А5П» [21].

Однако для оценки серьезности представленной конкуренции для отечественной космической деятельности, а именно Госкорпорации Роскосмос, проведен сравнительный анализ рентабельности различных классов РН, которые используются мировым сообществом. Выборка осуществлялась на основе частоты применения РН страной, с приоритетом выделения РН СЛК для выявления их рентабельности [22]. На рис. 5 представлен график, на котором оценивается четыре класса по минимальным затратам на стоимость запуска и выведения 1 кг ПН на НОО. Следует учитывать, что в данный анализ не входят РН СЛК, запуск которых не выполняется с поверхности Земли (морские, авиационные и аэростатные запуски).

Для РН «Шавит-2» и «SS-520—4» стоимость выведения 1 кг ПН на НОО составляет 57 142 долл. США и 875 000 долл. соответственно. Основная проблема в рентабельности РН СЛК заключается в высокой

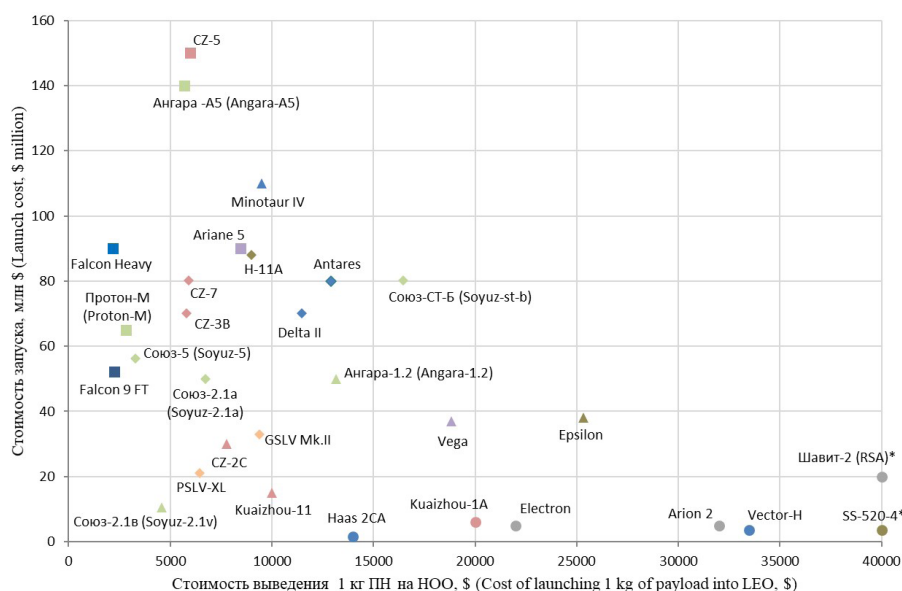


Рис. 5. Показатель минимальной стоимости для четырех классов РН

Figure 5. Minimum cost indicator for four classes of launch vehicles

цене выведения 1 кг ПН на НОО, однако показатель стоимости запуска выглядит достаточно привлекательным. Для данного класса нет повышенных требований в организации запуска в сравнении с более тяжелыми классами, благодаря габаритам и относительной простоте в производстве.

Выделяются основные преимущественные показатели в оперативности и мобильности запусков. Так например, для РН СЛК можно создать передвижной мобильный стартовый комплекс, в расчет которого будет входить вся обслуживающая и управляющая техника [23]. Формирование подобных комплексов применяется в ракетных вооруженных силах некоторых стран.

Появление новых игроков со своими предложениями по современным видам РН заставляет РФ принимать форсированную политику по удержанию лидирующих позиций на космической арене. Конечно, опираясь на колоссальный научно-технический опыт РФ, можно с уверенностью говорить о больших возможностях, которые ограничены только недостатком инвестиций. Однако механизмы привлечения сторонних инвестиций в ракетно-космическую промышленность существуют и вполне возможны для реализации [24; 25]. Это приведет к появлению эффектов значимых для отрасли:

- приток новых кадров (технических, научных, управленческих);
- оптимизация производственных процессов в отрасли;
- повышение производительности труда;
- реализация инновационно-инвестиционных проектов коммерческой направленности;
- привлечение внешнего финансирования, позволяющего снизить бюджетную нагрузку;
- расширение сфер деятельности корпорации;
- распределение рисков и угроз при разработке и выводе на рынок новых продуктов и услуг.

В настоящее время в России существует три частные компании, которые занимаются разработкой и созданием РН СЛК. Организации в основном используют частные инвестиции и на данный момент находятся на проектном этапе разработок.

Компания ООО «Лин Индастриал» совместно с «КБ ЛАРОС» ведут работы по созданию орбитальной ракеты «Таймыр». Предполагаемая удельная

стоимость доставки 1 кг ПН — 25 000 долл. США. Другая российская частная компания ООО «НСТР Ракетные Технологии» провела успешные испытания жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) малой тяги на закиси азота и керосине. Компания Success Rockets предлагает проект трехступенчатой твердотопливной РН «Stalker», которая способна вывести на ССО до 150 кг ПН с предполагаемой стоимостью в 18 000 долл. США за 1 кг ПН.

4. Обсуждение

Для расширения понимания перспективности разработки и эксплуатации РН СЛК необходимо углубленное изучение потребностей международного космического рынка и прогноз относительно динамики выведения СМКА. При получении дополнительной информации, позволяющей оценить в полной мере востребованность данного класса, следует акцентировать внимание на изучении международного опыта, анализе существующей научной литературы и на основе имеющихся данных сделать прогноз по рентабельности РН СЛК.

Подробного изучения требуют и другие темы, затронутые в настоящей статье. Например, проблема финансирования проектов в РКК и вопросы повышения конкурентоспособности России на мировом космическом рынке.

Заключение

Увеличение заинтересованности в использовании мировым сообществом СМКА говорит об их доступности и простоте в разработке, позволяющих компаниям и учебным заведениям выполнять локально-демонстративные работы, с целью отработки технологий использования данных аппаратов или выполнения краткосрочных целевых задач на НОО. Ограничительные технические и функциональные возможности СМКА не позволяют в полной мере удовлетворить потребности заказчика в сравнении с более крупными КА, однако их ценовая категория открывает возможность выполнения НИОКР для привлечения инвесторов на более важные проекты. Для заказчиков, которые уже имеют в своем распоряжении орбитальную группировку, открывается возможность бюджетного варианта

экстренного решения проблемы аварийности одного или нескольких спутников с использованием СМКА, которые хотя и будут функционировать с ограниченными возможностями, но позволят сохранить связь группировки. Оперативность запуска таких аппаратов способен обеспечить РН СЛК.

Экономическую эффективность использования РН СЛК для выведения МКА и СМКА можно считать сомнительной по сравнению с более тяжелыми классами, так как доставка 1 кг ПН на НОО будет варьироваться в пределах 15 000—35 000 долл. США, а у некоторых зарубежных представителей она достигает 875 000 долл. Конечно, следует принимать во внимание период экспериментальной отработки для РН с подобной стоимостью, которые позиционируют себя как демонстрант новых технологий. Следует также отметить, что средняя стоимость запуска РН СЛК на порядок ниже, чем у ЛК, СК и ТК (15 000—110 000 долл. США, 25 000—90 000 долл., 50 000—150 000 долл. соответственно, в зависимости от модификации и поставленных задач), и составляет примерно 6 млн долл. Благодаря низким требованиям к наземной инфраструктуре, которая позволит обеспечить малое время подготовки к пуску, данный класс может осуществлять оперативное выведение КА, что для некоторых заказчиков может быть важным в случае необходимости. Ко всему прочему данный класс идеально подходит в роли демонстранта новых технологий, которые в дальнейшем могут использоваться в разработках и созданиях более крупных и дорогих РН.

Список литературы

1. *Kamalieva R.N., Charkviani R.V.* Creation of ultralight spacecraft structures from composite materials // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 185. P. 90—197.
2. *Santoni F., Piergentili F., Candini G.P., Perelli M., Negri A., Marino M.* An orientable solar panel system for nanospacecraft // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 101. P. 120—128.
3. *Notaro V., Benedetto M., Colasurdo G. et al.* A small spacecraft to probe the interior of the Jovian moon Europa: Europa Tomography Probe (ETP) system design // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 166. P. 137—146.
4. *Salmin V.V., Tkachenko S.I., Volocuev V. V., Kaurov I.V.* Improving the efficiency of Earth monitoring missions by equipping small Aist-2 spacecraft with an electric motor // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 185. P. 198—204.
5. *Kang J, Zhu Z.H.* Dynamics and control of de-spinning giant asteroids by small tethered spacecraft // *Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 94. 105394. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105394>
6. *Kozlov D.I., Anshakov G.P., Antonov Y.G., Makarov V.P., Somov D.I.* Precision Control Systems of Motion on Russian Spacecraft for Ecological Remote Sensing // *IFAC Proceedings Volumes*. 1999. Vol. 31. P. 27—38.
7. *Гансвинд И.Н.* Малые космические аппараты – новое направление космической деятельности // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. № 12-2(78). С. 84—91.
8. *Felicetti L., Piergentili F., Santoni F.* Thermosphere density and wind measurements in the equatorial region using a constellation of drag balance nanospacecraft // *Advances in Space Research*. 2014. Vol. 54. P. 546—553.
9. *Iakubivskiy I., Mačiulis L., Janhunen P., Dalbins J., Noorma M., Slavinskis A.* Aspects of nanospacecraft design for main-belt sailing voyage // *Advances in Space Research*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.023>
10. *Grundmann J.T., Bauer W., Biele J. et al.* Capabilities of Gossamer-1 derived small spacecraft solar sails carrying Mascot-derived nanolandings for in-situ surveying of NEAs // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 156. P. 330—362. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.03.019>
11. *Skvortsov Yu.V., Glushkov S.V., Chernyakin S.A.* Space Factors Influence on the Size Stability of Small Spacecraft Structure Elements // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 185. P. 105—109.
12. *Клюшников В.Ю., Кузнецов И.И., Осадченко А.С.* Методы обеспечения отказоустойчивости малых космических аппаратов и сверхлегких средств выведения их на орбиту // 2-я научно-техническая конференции с международным участием «Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Проблемы создания служебных и научных систем». 2017. С. 317—328.
13. *Badawy A., McInnes C.R.* Small spacecraft formation using potential functions // *Acta Astronautica*. 2009. Vol. 65. P. 1783—1788.
14. *Rhatigan J.L., Lan W.* Drag-enhancing deorbit devices for spacecraft self-disposal: A review of progress and opportunities // *Journal of Space Safety Engineering*. 2020. Vol. 7. P. 340—344.
15. *Baranov A.A., Grishko D.A., Shcheglov G.A., Sholmin A.S., Stognii M.V., Kamenev N.D.* Feasibility analysis of LEO and GEO large space debris de/re-orbiting taking into account launch mass of spacecraft-collector and its configuration layout // *Advances in Space Research*. 2021. Vol. 67. P. 371—383.
16. *Шамардина О.В., Лысков К.В., Глушко В.О., Разумова Ю.В., Виштак К.О., Закирничная Е.Е.* Развитие малых космических аппаратов и систем деорбитинга: обзор исслед-

дований в области формирования рынка // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11, № 1. С. 45.

17. Студников П.Е. Особенности развертывания орбитальной группировки малых космических аппаратов // Инновации и инвестиции. 2020. № 3. С. 240—242.

18. Левандович А.В., Мосин Д.А., Северенко А.В., Уртминцев И.А. Методика определения параметров корректирующей двигательной установки для малого космического аппарата // Труды Военно-космической академии А.Ф. Можайского. 2018. № 661. С.176—184.

19. Назарова Ю.А., Тихонов В.А. Перспективы разработки и создания ракет-носителей сверхлегкого класса // Инженерные исследования: труды научно-практической конференции с международным участием. 2020. С. 42—50.

20. Наумочкин Д.В., Петухов А.И., Полуян М.М. Анализ тенденций развития сверхмалых космических аппаратов // Вооружение и экономика. 2019. № 4 (50). С. 37–43.

21. Микрин Е.А. Отечественная космонавтика: впереди Луна? // Русский космос. 2019. № 2. С. 3–7.

22. Ключников В.Ю. Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 3 (100). С. 58—71.

23. Космодемьянский Е.В., Нагиев А.В., Изратов Д.Ю., Кирпичев В.А., Давыдов П.А. и др. Проект космического ракетного комплекса на базе ракеты-носителя сверхлегкого класса // Онтология проектирования. 2018. Т. 8. № 4 (30). С. 523—539.

24. Бауэр В.П., Ковков Дж.В., Московский А.М., Сенчагов В.К. Состояние и механизмы развития ракетно-космической промышленности России / Аналитический доклад Институт экономики Российской академии наук. Сер. Научные доклады Института экономики РАН. 2012.

25. Сопилко Н.Ю., Навроцкая Н.А., Мясникова О.Ю. Тенденции развития мировых производственных связей в технологичных секторах экономики // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т.13. № 8 (353). С. 1532—1544.

References

1. Kamaliev RN, Charkviani RV. Creation of ultralight spacecraft structures from composite materials. *Procedia Engineering*. 2017;185:90—197.

2. Santoni F, Piergentili F, Candini GP, Perelli M, Negri A, Marino M. An orientable solar panel system for nanospacecraft. *Acta Astronautica*. 2014;101:120—128.

3. Notaro V, Benedetto M, Colasurdo G, et al. A small spacecraft to probe the interior of the Jovian moon Europa:

Europa Tomography Probe (ETP) system design. *Acta Astronautica*. 2020;166:137—146.

4. Salmin VV, Tkachenko SI, Volocuev VV, Kaurov IV. Improving the efficiency of Earth monitoring missions by equipping small Aist-2 spacecraft with an electric motor. *Procedia Engineering*. 2017;185:198—204.

5. Kang J, Zhu ZH. Dynamics and control of de-spinning giant asteroids by small tethered spacecraft. *Aerospace Science and Technology*. 2019; 94: 105394. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105394>

6. Kozlov DI, Anshakov GP, Antonov Y G, Makarov VP, Somov DI. Precision Control Systems of Motion on Russian Spacecraft for Ecological Remote Sensing. *IFAC Proceedings Volumes*. 1998;31:27—38.

7. Gadsvind IN. Small spacecraft – a new area of space activity. *International research journal*. 2018;12–2(78):84—91. (In Russ.)

8. Felicetti L, Piergentili F, Santoni F. Thermosphere density and wind measurements in the equatorial region using a constellation of drag balance nanospacecraft. *Advances in Space Research*. 2014;54:546—553.

9. Iakubivskiy I, Mačiulis L, Janhunen P, Dalbins J, Noorma M, Slavinskis A. Aspects of nanospacecraft design for main-belt sailing voyage. *Advances in Space Research*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.023>

10. Grundmann JT, Bauer W, Biele J, et al. Capabilities of Gossamer-1 derived small spacecraft solar sails carrying Mascot-derived nanolandings for in-situ surveying of NEAs. *Acta Astronautica*. 2019;156:330—362.

11. Skvortsov YuV, Glushkov SV, Chernyakin SA. Space Factors Influence on the Size Stability of Small Spacecraft Structure Elements. *Procedia Engineering*. 2017;185:105—109.

12. Klyushnikov VY, Kuznetsov II, Osadchenko AS. Methods for ensuring the fault tolerance of small spacecraft and ultralight means of launching them into orbit. *2nd scientific and technical conference with international participation “Innovative automatic spacecraft for fundamental and applied scientific research. Problems of creating service and scientific systems”*. 2017:317—328. (In Russ.)

13. Badawy A, McInnes CR. Small spacecraft formation using potential functions. *Acta Astronautica*. 2009;65:1783—1788.

14. Rhatigan JL, Lan W. Drag-enhancing deorbit devices for spacecraft self-disposal: A review of progress and opportunities. *Journal of Space Safety Engineering*. 2020;7:340—344.

15. Baranov AA, Grishko DA, Shcheglov GA, Sholmin AS, Stognii MV, Kamenev ND. Feasibility analysis of LEO and GEO large space debris de/re-orbiting taking into account launch mass of spacecraft-collector and its configuration layout. *Advances in Space Research*. 2021;67:371—383.

16. Shamardina OV, Liskov KV, Glushko VO, Razumova YV, Vishtak KO, Zakirnichnaia EE. Development of small spacecraft and deorbiting systems: a review of market formation research. *Bulletin of Eurasian science*. 2019;1:45. (In Russ.)
17. Studnikov PE. Features of deployment of an orbital grouping of small spacecraft. *Innovation and investment*. 2020;3:240—242. (In Russ.)
18. Levandovich AV, Mosin DA, Severenko AV, Ertminceva IA. Method for determining the parameters of the corrective propulsion system for a small spacecraft. *Proceedings of the military space Academy of A. F. Mozhaisky*. 2018;611:176—184. (In Russ.)
19. Nazarova YuA, Tikhonov VA. Prospects for the development and creation of ultralight launch vehicles. *International Conference Engineering Systems – 2020*. 2020:42—50. (In Russ.)
20. Naumochkin DV, Petuhov AI, Poluian MM. Analysis of trends in the development of ultra-small spacecraft. *Armament and economy*. 2019;4(50):37—43. (In Russ.)
21. Mikrin EA. Domestic cosmonautics: is the Moon ahead? *Russian space*. 2019;2:3—7. (In Russ.)
22. Kliushnikov VY. Ultralight launch vehicles: a niche in the launch services market and promising projects. *Aerospace sphere*. 2019;3(100):58—71. (In Russ.)
23. Kosmodemianskii EV, Nagiev AV, Izratov DY, Kirpichev VA, Davidov PA, et al. Space rocket complex project on the basis of a super-light class rocket-carrier. *Ontology of designing*. 2018; 4 (30):523—539. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-4-523-539>
24. Bauer VP, Kovkov DV, Moskovskii AM, Senchagov VK. *State and mechanisms of development of the Russian rocket and space industry*. Institute of Economics RAS. 2012:29—49. (In Russ.)
25. Sopilko NY, Navrotskaia NA, Miasnikova OY. Development trend of global production ties in technological sectors of the economy. *National interests: priorities and security*. 2017;13, Is. 8(353):1532—1544. (In Russ.) <https://doi.org/10.24891/ni.13.8.1532>

Сведения об авторах

Назарова Юлия Александровна, доцент департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности инженерной академии РУДН, кандидат экономических наук; ORCID: 0000-0002-5017-0281, eLIBRARY SPIN-код 8702-4283; e-mail: nazarova-yua@rudn.ru

Тихонов Владимир Андреевич, магистрант департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности инженерной академии РУДН; e-mail: tihon_94@mail.ru.

About the authors

Yulia A. Nazarova, Associate Professor of the Department of Management of Innovation in the Engineering Business, Engineering Academy, RUDN University, Cand. of Sci. (Economic); ORCID: 0000-0002-5017-0281, eLIBRARY SPIN-code 8702-4283; e-mail: nazarova-yua@rudn.ru

Vladimir A. Tikhonov, Student of the Department of Management of Innovation in the Engineering Business, Engineering Academy, RUDN University; e-mail: tihon_94@mail.ru