

Автономная некоммерческая организация «Аналитический центр  
«АЭРОНЕТ» (АНО «ЦЕНТР «АЭРОНЕТ»)

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ СВЕРХЛЕГКОГО КЛАССА И ПОЛЕЗНЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ НИХ

Москва 2022

## **ИСПОЛНИТЕЛИ**

Яковлева А.В.  
Булат П.В.  
Абраменко Н.Г.  
Жиц Р.Ю.

## Реферат

Отчет: 26 с., 9 ч., 12 рис., 3 табл., 14 источн.

Ключевые слова: кубсат, нано, микро и малый космический аппарат, платформа малого космического аппарата, многоспутниковая группировка, ракета-носитель сверхлегкого класса, удельная стоимость вывода полезной нагрузки на низкую земную орбиту, сверхлегкая транспортная космическая система.

Объектами исследования являются нано, микро и малые космические аппараты, ракеты-носители сверхлегкого класса.

Целью работы является определение возможности создания эффективных многоспутниковых группировок, состоящих из малых космических аппаратов, и их развертывания с использованием ракет-носителей сверхлегкого класса.

В процессе работы выполнен анализ доступных источников по проблематике развертывания многоспутниковых группировок, определены требования к функциональным возможностям малых космических аппаратов для двух взаимодополняющих классов и ракет-носителей сверхлегкого класса, используемых для их выведения.

В результате работы выявлена необходимость существенно различающихся подходов к выбору основных технических решений спутников в зависимости от решаемых ими задач. При этом спутник и транспортная система будет разрабатываться как единый взаимоувязанный космический комплекс. Такой подход позволит минимизировать затраты на создание спутников и транспортной системы, а также на сам запуск, что, в конечном итоге, приведет к снижению стоимости оказываемых услуг конечному пользователю.

Степень внедрения: полученные результаты планируется использовать при разработке перспективных малых космических аппаратов и ракет-носителей сверхлегкого класса, создаваемых силами частных компаний.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	5
2. Перспективы развития космического рынка	6
3. Сегменты космического рынка	7
4. Тенденции развития сегмента по производству спутников и их составных частей	9
5. Предложения по разработке и созданию малых космических аппаратов	12
6. Аналитическое исследование конкурирующих проектов ракет носителей сверхлегкого класса (РН СЛК)	15
7. Анализ конкурентной среды существующих РН СЛК	17
7.1. Эксплуатируемые РН сверхлегкого класса	17
7.1.1. Long March 11	17
7.1.2. Astra Aerospace Rocket 3	19
8. Перспективные на этапе разработки проекты РН СЛК	20
8.1. SMILE Launcher	20
8.2. Firefly Alpha	22
8.3 Сравнение стоимости выведения группировок	23
9. Заключение	24
Перечень использованных источников	25

## 1. Введение

Предлагается разработать единую программу по разработке и созданию силами частных компаний таких сегментов космического рынка, как спутники, на базе универсальной космической платформы, и сверхлегкую транспортную космическую систему для их вывода на орбиту.

Спутники могут разрабатываться для оказания услуг (предоставление сервисов) конечному пользователю: интернета вещей, (безопасный город, умный дом и т.д.); связи (в том числе при помощи наземного сегмента); предоставления данных геоинформационных сервисов в интересах бизнеса, науки, культуры, населения на основе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); метеорологии; навигации. Проведения научно-технологических экспериментов: приборов бортовых систем и полезных грузов; обеспечения летной квалификации перспективных приборов, проверки эффективности применения разработанных в рамках «дорожных карт» национальной технологической инициативы (НТИ) технологий (вывод технологий и продукции стартапов на рынок). Разрабатываемые спутники на первом этапе (учитывая более короткие сроки создания, чем транспортная система) могут выводиться с помощью других имеющихся ракет носителей, а на следующем этапе, после создания сверхлегкой транспортной космической системы, они станут целевой полезной нагрузкой для нее.

При этом спутник и транспортная система будет разрабатываться как единый космический комплекс взаимосвязанных технических решений (возможность быстрой интеграции и адаптации).

Требования к самой космической платформе для спутника будут заложены таким образом, чтобы была обеспечена возможность масштабируемости, универсальности для адаптации с различными полезными нагрузками космического аппарата, применения отработанных проверенных решений, а также возможность мелкосерийного производства.

Такой подход позволит минимизировать затраты на создание спутников, транспортной системы, и, как следствие снижение затрат на сам запуск и в результате снижение стоимости оказываемых услуг конечному пользователю, повышения качества и надежности.

## 2. Перспективы развития космического рынка

Космический рынок можно определить как совокупность организационных, административных, юридических, финансовых, научно-исследовательских и производственных субъектов и процедур, обеспечивающих создание и реализацию "космических" товаров и услуг в интересах всех его участников при соблюдении действующих законов, международных договоренностей, правил, а также общепринятых норм морали и деловой этики.

По информации интернет-издания Юником 24, рынок космических услуг за последнее десятилетие вырос почти в 20 раз, чем привлек внимание мировых инвестиционных домов. Morgan Stanley оценил объем сегмента в \$350 млрд, а Bank of America и вовсе в \$424 млрд. Но они оба сошлись на мысли, что продажи услуг в космосе будут расти гораздо быстрее, чем вся мировая экономика. Уже к концу этого десятилетия мы можем рассчитывать, что объем космической индустрии перешагнет \$1 трлн, то есть рынок вырастет как минимум втрое.

В последние 15 лет все большую роль здесь играют частные игроки: доля госинвестиций в мире составляет всего 25% и продолжает снижаться.

Сегменты, в которых развивается коммерческий космос:

- разработка и ракет-носителей и космических аппаратов для выведения на орбиту полезной нагрузки, пилотируемых полетов и космического туризма;
- спутники и подсистемы для них, продажа данных со спутников, спутниковый интернет;
- сервисы на основе ДЗЗ (сегмент на стыке космоса и искусственного интеллекта);
- наземный сегмент, услуги по приему данных со спутников.

Наиболее интенсивно частный бизнес развивается в США. Политика государства в отношении космоса предполагает размещение госзаказов в том числе у частных компаний.

Это стимулирует конкуренцию, способствует снижению стоимости услуг и оборудования, поиску инновационных технологических решений. Китай также поощряет частные инвестиции в космический бизнес: здесь, как и в США, есть несколько частных компаний, планирующих заниматься запуском ракет, развиваются проекты по созданию спутников и предоставлению различных услуг на основе их данных. Правда, эксперты утверждают, что китайских инвесторов в

космонавтику можно назвать частными лишь условно – большинство этих компаний так или иначе связаны с государством.

Эксперты отмечают, что Россия в процессе создания космического рынка практически не участвует, российские частные компании в космонавтике можно пересчитать по пальцам. Госкорпорация «Роскосмос» в соответствии с требованиями коммерциализации вынуждена самостоятельно конкурировать с быстрым, гибким, агрессивным частным бизнесом.

Мировой рынок частной космонавтики устроен неравномерно.

Явным лидером являются США, в России на данный момент больше преобладает госмонополия на все, что касается космоса.

На рисунке 1 представлен мировой объем инвестиций в сфере мирового частного космоса.



Рисунок 1. Объем инвестиций в частный космос

### 3. Сегменты космического рынка

Можно выделить ряд основных отраслей космического рынка, при этом условно разделить на сегменты первичного и вторичного рынка:

I : Первичный рынок-рынок услуг.

- пусковые услуги;
- спутниковые услуги (связь, дистанционное зондирование Земли, технологическая отработка, получение лётной квалификации приборов и т.п.)
- космический туризм;
- космическая добыча полезных ископаемых и энергетика.

II : Вторичный рынок-источник услуг первичного рынка (инструменты для оказания услуг).

- транспортные системы, средства выведения, движения спутников;
- производство спутников и их составных частей;
- производство наземного оборудования.

Доля мирового рынка по сегментам распределяется таким образом, что большая часть приходится на услуги (сервисы) и разработку наземного сегмента, и меньшая доля на пусковую индустрию и создание самих спутников (смотри рисунок 2).

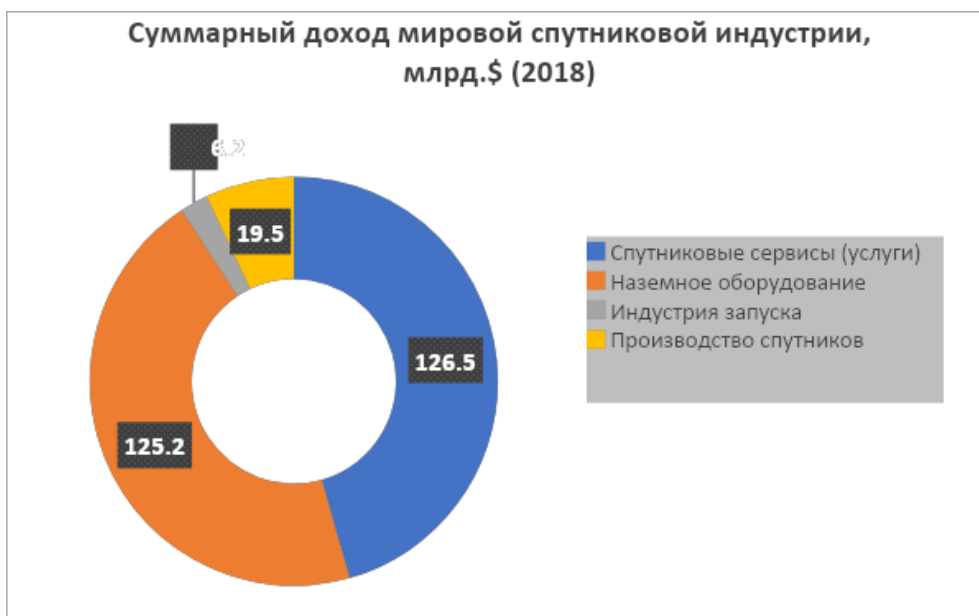


Рисунок 2. Доход спутниковой индустрии по сегментам

Но учитывая принципы построения космического рынка в целом, оказание спутниковых услуг невозможно без самих спутников и их соответствующего запуска. При такой постановке вопроса разработка спутников и разработка транспортных систем выходит на первый план.

На рисунке 3 представлены доли участников на рынке коммерческих запусков спутников с 2010-2018 года. Прослеживается тенденция снижения доли России на рынке. Это определяет необходимость создание и развитие коммерческого сегмента для оказания космических услуг.





Рисунок 3. Доли участников на рынке космических услуг

#### 4. Тенденции развития сегмента по производству спутников и их составных частей

В 2000-х на рынке доминировали большие спутники на геостационарной орбите от известных корпораций (Lockheed Martin, Boeing, Astrium, Thales Alenia) – каждый из них был по-своему уникален и стоил десятки, а то и сотни миллионов долларов. Но параллельно развивались «кубсаты» (CubeSat) – микроспутники для низких орбит, собирающихся, как конструктор, из кубов размером 10x10x10 см. Этот формат изобрели в 1999 году в университетах США для образовательных целей. Постепенно его преимущества оценил бизнес. Под «кубсаты» можно создавать стандартные комплектующие – батареи, платы, датчики, – что охотно взяли на себя специализированные поставщики. Разделение труда позволило радикально снизить ценник на космические «кубики» – до \$100 тыс. за аппарат «под ключ». И, как следствие, сделать их массовыми: в 2010 году на орбиту отправились 40 мини-спутников (массой до 600 кг), в 2015-м – более 160 (подсчеты SIA).

Меняется и назначение спутников. Если раньше драйвером индустрии выступало спутниковое ТВ, то теперь в этой роли осваиваются аппараты, выполняющие дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), то есть фотосъемку.

Когда-то она была востребована только военными, но теперь быстро растет гражданский сектор спутниковых данных. Крупнейшим игроком на нем является компания Planet, которой потребовалось шесть лет, чтобы нарастить собственную группировку до 230 мини-спутников Dove («Голубок»), фотографирующих всю земную поверхность с детализацией 3–5 м – не слишком четко, зато с ежедневным обновлением снимков. Конкурировать с Planet хотят Terra Bella, BlackSky Global, OmniEarth, Satellogic, Hera Systems, AxelSpace. На рисунке 4 представлено количество запущенных МКА.

В 2019 году на запуск МКА приходилось 11% массы всей выведенной полезной нагрузки транспортными системами (ракетоносителями).

В 2021 году прогнозировалось увеличение количества запускаемых МКА на 19%.



Рисунок 4. Количество запущенных МКА (факт/прогноз), [1]

Наблюдается тенденция роста запусков и использования МКА. Дальнейшее развитие космической техники связано с радикальным снижением стоимости космических услуг, повышением их доступности и расширением номенклатуры. Эта цель может быть достигнута с помощью микроминиатюризации элементной базы, бортовой аппаратуры и изделий ракетно-космической техники в целом, развертывания многоспутниковых группировок малоразмерных космических аппаратов (МКА) инфокоммуникационного назначения. Количество МКА уже в ближайшие 5-10 лет достигнет нескольких сотен и, возможно, тысяч. Наиболее высоких темпов роста ожидают от запусков космических аппаратов массой до 50 кг, относящихся по принятой классификации к нано- и микро КА (рисунок 5).

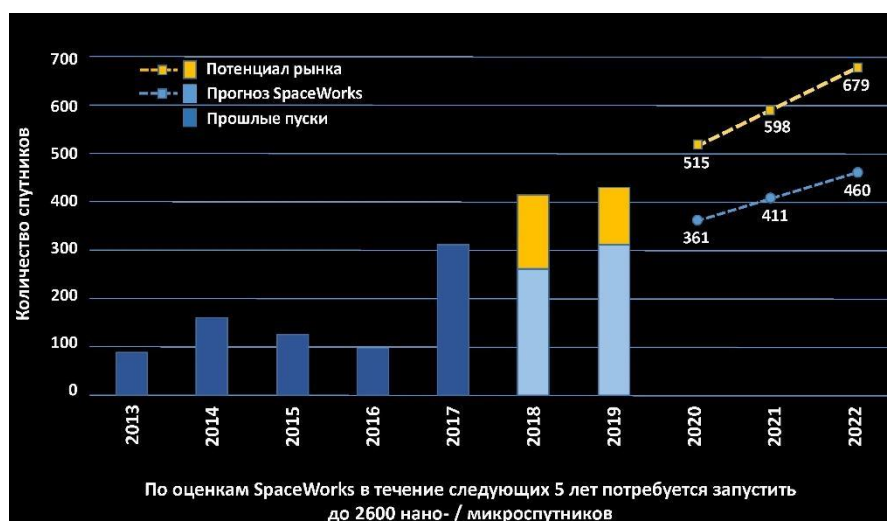


Рисунок 5. Статистика запусков и прогноз рынка нано и микроспутников (1-50 кг) по состоянию на 2018 год

Необходимо также принимать во внимание планы развертывания многоспутниковых группировок, прежде всего низкоорбитальных космических систем широкополосной связи, которые в ближайшие 10 лет могут насчитывать более 16000 малых космических аппаратов класса мини, массой до 300-400 кг (рисунок 6). Причем требуемые диапазоны высот и наклонов орбит – существенно шире используемых в настоящее время для запусков тяжелых КА.

В ближайшие шесть лет активнее всего будут развиваться спутники и все, что с ними связано: связь, интернет, обработка и передача данных. Эти услуги востребованы бизнесом — особенно с развитием интернета вещей — и госслужбами: спутниковые данные помогают вовремя оповещать о стихийных бедствиях, бороться с проблемами экологии.



Рисунок 6 - Прогноз количества спутников в многоспутниковых группировках

На втором месте — доставка грузов, затем — всевозможные испытания и только потом — полеты с экипажем или туристами.

## 5. Предложения по разработке и созданию малых космических аппаратов

Предлагается рассмотреть возможность создания малых космических аппаратов (МКА) двух классов. С одной стороны это позволит решать прикладные задачи - оказания услуг и предоставления сервисов конечным пользователям в наиболее крупном сегменте космического рынка, с другой стороны создаст основы для развития сегмента по созданию ракет носителей (транспортных систем). Малые космические аппараты будут являться полезной нагрузкой для ракет носителей, которые обеспечат вывод их на орбиту для выполнения своей целевой функции.

Основными задачами перспективных космических систем на основе МКА являются следующие:

- обеспечение различных видов связи;
- сбор данных о космическом пространстве и наблюдение за объектами естественного и искусственного происхождения в космосе;
- дистанционное зондирование Земли;
- обеспечение потребителей навигационной информацией;
- проведение научных и экспериментальных работ;
- образовательные программы.

Таблица 1. Характеристики рекомендованных к созданию МКА

Параметр	МКА массой до 100 кг платформа (без полезной нагрузки) до 50 кг	МКА массой до 250 кг платформа (без полезной нагрузки) до 150 кг
Цели создания	<p><u>Оказание услуг (предоставление сервисов):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-интернета вещей, (безопасный город, умный дом и т.д.);</li> <li>-связи;</li> <li>-предоставления данных геоинформационных сервисов в интересах бизнеса, науки, культуры, населения на основе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).</li> </ul> <p><i>Потенциальные клиенты: строительная и нефтегазовая отрасли, сельское и лесное хозяйство, речное и морское судоходство, органы федерального и регионального надзора и чрезвычайных ситуаций, операторы предоставления услуг и т. д.</i></p> <p><u>Проведение научно-технологических экспериментов:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- обеспечение летной квалификации перспективной многофункциональной негерметичной платформы для спутников массой до 100 кг, приборов бортовых систем и полезных нагрузок;</li> <li>- отработка технологии выведения на рабочую орбиту с помощью новой разрабатываемой транспортной системы;</li> <li>- обеспечение летной квалификации перспективных приборов, проверка эффективности применения разработанных в рамках «дорожных карт» НТИ технологий</li> </ul> <p><i>Потенциальные клиенты: научные и образовательные организации, стартапы, промышленные предприятия, операторы предоставления услуг</i></p>	<p><u>Оказание услуг (предоставление сервисов):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-интернета вещей, (безопасный город, умный дом и т.д.);</li> <li>-связи (в том числе при помощи созданных комбинированных систем с применением БПЛА и наземного сегмента);</li> <li>-предоставления данных геоинформационных сервисов в интересах бизнеса, науки, культуры, населения на основе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);</li> <li>-метеорологии;</li> <li>-навигации.</li> </ul> <p><i>Потенциальные клиенты: строительная и нефтегазовая отрасли, сельское и лесное хозяйство, речное и морское судоходство, органы федерального и регионального надзора и чрезвычайных ситуаций, операторы предоставления услуг и т. д.</i></p> <p><u>Проведение научно-технологических экспериментов:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- обеспечение летной квалификации перспективной многофункциональной негерметичной платформы для спутников массой до 250 кг приборов бортовых систем и полезных нагрузок;</li> <li>- отработка технологии выведения на рабочую орбиту с помощью новой разрабатываемой транспортной системы;</li> <li>- обеспечение летной квалификации перспективных приборов, проверка эффективности применения разработанных в рамках «дорожных карт» НТИ технологий</li> </ul> <p><i>Потенциальные клиенты: научные и образовательные организации, стартапы, промышленные предприятия, операторы предоставления услуг</i></p>

Параметр	МКА массой до 100 кг платформа (без полезной нагрузки) до 50 кг	МКА массой до 250 кг платформа (без полезной нагрузки) до 150 кг
Количество МКА	От одного	От одного
Высота орбиты	от 500 до 1500	от 500 до 7000
Энергетическая мощность	до 100 Вт (пиковая)	до 3500 Вт (пиковая)

Космическая связь является одной из наиболее динамично развивающихся областей применения космической техники. Одним из перспективных направлений развития космических систем связи является широкое использование наряду с геостационарными КА низкоорбитальных КА на круговых орбитах высотой от 500 до 1500 км, объединенных в многоспутниковые системы (МСС), состоящие из нескольких десятков КА. Технические возможности для создания всех элементов МСС на основе МКА имеются уже сегодня. По оценкам специалистов, МКА, реализующий режимы непосредственной ретрансляции и электронной почты, при использовании современных конструктивных решений могут иметь массу от 50 до 250 кг. Режим межспутниковой ретрансляции при существующих технологических возможностях может быть реализован на МКА массой 250-400 кг, а в перспективе, возможно, и на МКА меньшей массы.

Наиболее перспективным способом решения подобных задач может стать построение комбинированных систем связи с использованием в своем составе различных технических средств наземного и аэрокосмического сегментов: спутники, беспилотные-летательные аппараты (БПЛА), наземные станции.

Варианты создания космических аппаратов, функции, решаемые задачи представлены в таблице 1.

## 6. Аналитическое исследование конкурирующих проектов ракет-носителей сверхлегкого класса (РН СЛК)

Потребность в создании РН СЛК в настоящее время обусловлена стремительным ростом числа малых и сверхмалых космических аппаратов. На момент подготовки настоящего исследования в мире существует несколько десятков относительно проработанных проектов сверхлегких РН, в целом число предложений превышает сотню. Однако до летного образца пока доведены лишь единицы.

Целью обзора является оценка конкурентной среды, формирующей предложения на рынке коммерческих РН СЛК, способных выводить полезную нагрузку общей массой в диапазоне от 50 кг до 250 кг на НОО, а также перспективы развития достаточно нишевых решений с выводом полезной нагрузки до 1 т на НОО.альной стоимости и высокой оперативности пуска, простоты подготовки к пуску и надежности, широкого диапазона высот и наклонений целевых орбит. Размеры отсека ПН рассмотренных РН СЛК в общем случае совместимы со стандартами креплений PAS 381S, PAS 432S, системами отстыковки спутников CubeSat подобных P-POD [2] и перспективным стандартом МКА Launch Unit (Launch-U).

Перспективность молодых компаний, еще не продемонстрировавших

Рассмотренные РН СЛК отвечают требованиям миним успешности своих разработок можно оценить по объему их финансирования и по имеющемуся у них технологическому заделу. Перспективными инновационными технологиями при разработке РН СЛК, способными повысить эффективность и надёжность ракеты, а также снизить стоимость ее запуска, являются использование многоразовых ступеней, автоматизация подготовки к запуску, использование 3D-печати при изготовлении ракетных двигателей и их компонентов, использование облегченных материалов, использование экологически чистого топлива и др.

Настоящий обзор может быть использован в дальнейших работах (при условиях актуализации информации) по проектированию, конструированию и созданию отечественной ракеты-носителя сверхлегкого класса.

Таблица 2 - Прогноз рынка восполнения группировок при цене выведения, 45 тыс.\$/кг	
Общее число МКА	1 800 – 2 500 шт.
Оценочная надежность МКА	от 95 до 99%

Потребность в замене МКА в год	20 – 100 шт.
Количество запусков МКА для НИОКР	5– 10
Потребных пусков РН СЛК в год	25
Рынок	125 млн.\$

В таблице 2 приведен прогноз минимального рынка, основанного на статистике выбытия МКА из спутниковых группировок.

Прогноз размера рынка сильно зависит от стоимости выведения 1 кг полезной нагрузки. При уменьшении стоимости выведения вдвое, рынок увеличивается в два с лишним раза (рис.7)

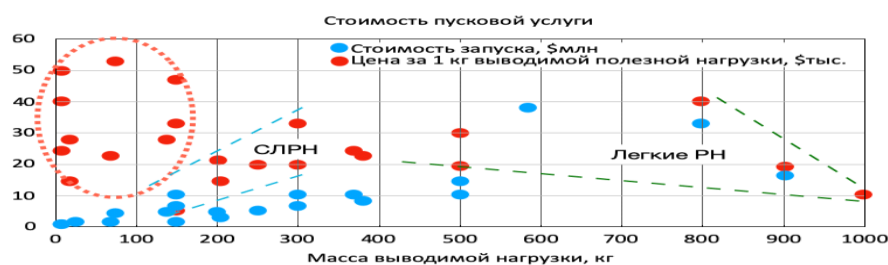


Рисунок 7. Проектная стоимость выведения РН СЛК

Для массового перехода от групповых запусков легкими ракетами к индивидуальным запускам при помощи РН СЛК требуется уменьшение стоимости выведения до уровня 10-12 тыс.\$/кг. При этом стоимость одного запуска должна быть меньше 3 млн.\$.

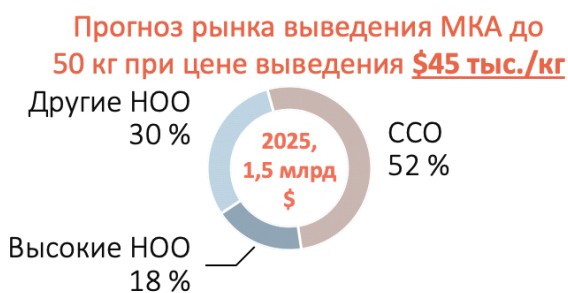




Рисунок 8. Сравнение рынка при текущей стоимости выведения (а) и при прогнозной стоимости выведения в 2026 г (б)

## 7. Анализ конкурентной среды существующих РН СЛК

В настоящий момент разработкой РН СЛК для вывода на орбиту небольших спутников занимается множество компаний, стартапов и государственных учреждений. Большинство начинающих участников рынка не имеют необходимого финансирования для успешного завершения проектов. В данном исследовании были рассмотрены успешные проекты государственных компаний, коммерческие проекты, успешно совершившие 1 или более запусков, а также перспективные коммерческие проекты, еще не совершившие запусков, но обладающие необходимым финансированием и технологическими наработками.

Для конкурентной среды РН СЛК основными параметрами является конечная стоимость вывода 1 кг ПН на низкую опорную орбиту и оперативность подготовки к старту. Способность нести сверхлегкий межорбитальный буксир значительно расширяет доступные орбиты вывода основного МКА, при этом возможно сопутствующее выведение КА формата CubeSat и меньше (нано-, пико-, фемто-спутники и т.д).

### 7.1. Эксплуатируемые РН сверхлегкого класса

#### 7.1.1. Long March 11

Семейство ракет Long March включает в себя более десятка аппаратов различных размеров и назначений. Long March 11 является самым легким носителем семейства. Эта ракета была разработана Китайским Исследовательским Институтом Ракетной Техники и ее первый запуск состоялся в 2015 году. Она основана на китайской твердотопливной межконтинентальной баллистической ракете DF-31 и разрабатывалась с упором на возможность быстрого запуска с различных типов пусковых площадок, в том числе с кораблей и мобильных сухопутных установок [3].

Long March 11 (рис.8) представляет собой четырехступенчатую ракету высотой в 20.8 м, диаметром в 2 м и общей массой, равной 58,000 кг. Все четыре ступени ракеты оснащены твердотопливными двигателями, что позволяет осуществлять запуск со сравнительно небольшой предварительной подготовкой. На старте ракета развивает тягу до 1100 кН [4]. РН СЛК для вывода на орбиту

небольших спутников занимается множество компаний, стартапов и государственных учреждений. Большинство начинающих участников рынка не имеют необходимого финансирования для успешного завершения проектов. В данном исследовании были рассмотрены успешные проекты государственных компаний, коммерческие проекты, успешно совершившие 1 или более запусков, а также перспективные коммерческие проекты, еще не совершившие запусков, но обладающие необходимым финансированием и технологическими наработками.



Рисунок 8. Легкая ракета-носитель Long March 11

Ракета способна доставлять до 700 кг полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту и до 500 кг на солнечно-синхронную орбиту. Ракета может включать в себя обтекатель с полезной нагрузкой диаметром в 1.6 м или в 2 метра и длиной в 2 метра.

Согласно исследованию [5], стоимость одного запуска Long March 11 составляет около 6.09 млн. долл. США, что соответствует цене в 8,700 долларов США за 1 кг полезной нагрузки. Всего, с 2015 года, было осуществлено 9 запусков этой ракеты, все успешные.

В настоящее время в Китае существует несколько проектов (ZhuQue-1, Kuaizhou), разработанных китайскими государственными компаниями, использующие модифицированные баллистические ракеты для запуска полезной нагрузки на орбиту. Эти проекты во многом схожи между собой и, по

официальной информации, имеют стоимость запуска в районе 9-10 тыс. долл. за 1 кг. Недостатком подобных проектов является использование МБР в качестве базы, что существенно ограничивает расширение производства подобных РН вне государственных компаний.

Однако, ракеты, построенные на базе МБР наследуют важную для РН СЛК технологию – возможность запуска с мобильной платформы, перспективную к внедрению в полностью коммерческие образцы.

### 7.1.2. Astra Aerospace Rocket 3

Американская компания Astra Aerospace разрабатывает легкую ракету-носитель для коммерческих запусков. Компания была основана в 2016 году и привлекла 100 млн. долл. США в качестве финансирования от ряда венчурных инвесторов, таких, как ACME Capital, Airbus Ventures, Innovation Endeavors и др. В июле 2018 года компанией был произведен первый запуск испытательной суборбитальной ракеты Rocket 1.0, который завершился успехом, несмотря на некоторые неизвестные неполадки.

В настоящий момент компания работает над разработкой своего основного продукта Rocket 3, предназначенного для вывода полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту. В марте 2020 года была произведена первая попытка запуска этой ракеты в рамках DARPA Launch Challenge, которая, однако, завершилась неудачей. Следующие плановые запуски запланированы на август и октябрь 2020 года.



Рисунок 9. Astra Rocket 3 перед запуском на космодроме Кадьяк, Аляска

Rocket 3 представляет собой двухступенчатую ракету высотой в 11.6 м и диаметром в 1.32 м. Первая ступень ракеты использует пять жидкостных двигателей Delphin, создающих по 28 кН тяги каждый. В качестве топлива используется смесь керосина и сжиженного кислорода [6].

Вторая ступень использует двигатель, получивший название Aether, создающий 3.1 кН тяги и способный работать в условиях вакуума [7]. Ракета разрабатывается из расчета на возможность доставлять до 200 кг полезной нагрузки на высоту до 500 км с оценочной стоимостью вывода грузов равной \$12,255 за 1 кг [8, 9].

Примечательной особенностью проекта является использование относительно небольшого объема наземной инфраструктуры, что позволит быстро разворачивать пусковые площадки.

## **8. Перспективные на этапе разработки проекты РН СЛК**

### **8.1. SMILE Launcher**

Проект SMILE (SMall Innovative Launcher for Europe) представляет собой консорциум из 14 различных компаний и организаций, объединившихся в рамках программы Horizon 2020 для создания легкой ракеты-носителя, способной выводить на орбиту легкие спутники массой до 50 кг с использованием ряда инновационных технологий для повышения эффективности и снижения стоимости космических запусков.

На данный момент компании-участники изучают и моделируют различные конфигурации будущей ракеты-носителя. Рассматриваются варианты использования гибридных или жидкостных двигателей, структуры компонентов ракеты, авионики и т.д.

В качестве гибридного двигателя (рис.10) рассматривается использование двигателя, разработанного компанией Nammo, в котором используется полибутадиен с гидроксильными концевыми группами (НТРВ) в качестве твердого топлива и  $H_2O_2$  в качестве окислителя. Преимуществами таких двигателей по сравнению с двигателями других типов являются самовоспламенение топлива, высокая эффективность сгорания топлива (до 98%), простота и дешевизна конструкции. Существующий на сегодняшний день гибридный двигатель Nammo способен развивать тягу до 30 кН и обладает общей массой, равной 560 кг вместе с топливом.

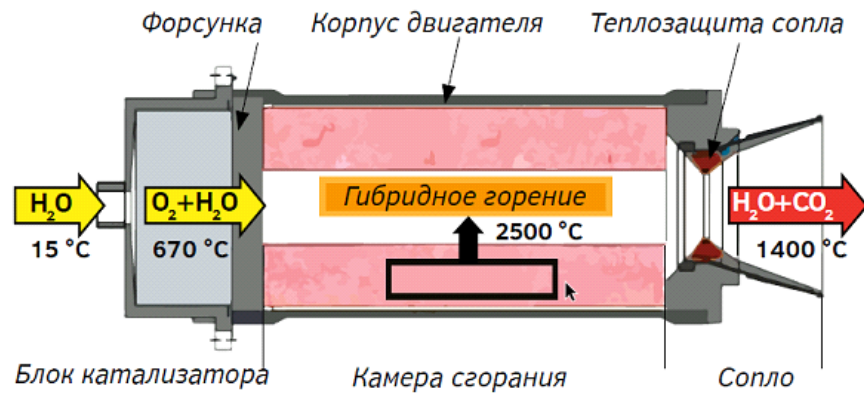


Рисунок 10. Принцип действия гибридного двигателя Nammo, потенциально используемого в проекте SMILE

Консорциумом рассматривается конфигурация ракеты, использующая гибридные двигатели на всех трех ступенях. В этом варианте ракета будет иметь взлетную массу около 20 тонн и сможет выводить до 70 кг полезной нагрузки на высоту в 600 км.

Вторая рассматриваемая конфигурация предполагает использование жидкостных двигателей, работающих на смеси сжиженного кислорода и керосина (рис.11). Этот подход имеет свои преимущества, в основном связанные с повышенной возможностью повторного использования двигателей ввиду их меньшего повреждения в процессе работы.

На первой ступени предполагается использовать клиновоздушный ракетный двигатель с турбонасосной подачей топлива и 36 отдельными камерами сгорания. На второй и третьей ступенях рассматривается использование вытеснительной подачи топлива. В этой конфигурации взлетная масса ракеты составит 16 тонн, тяга на взлёте – 225 кН [10].

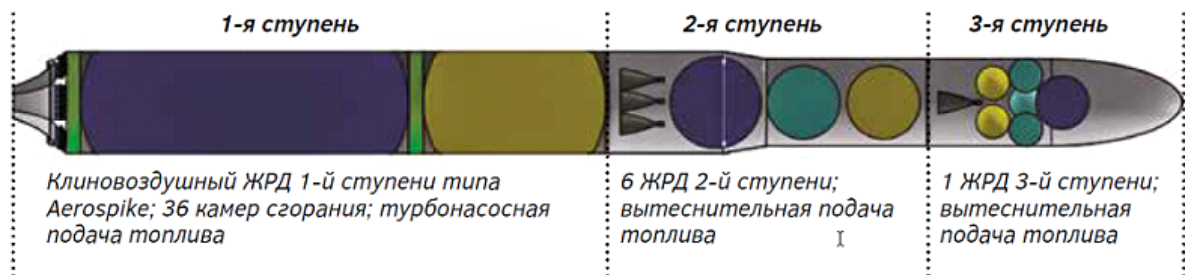


Рисунок 11. Конфигурация ракеты-носителя SMILE с использованием жидкостных двигателей.

На сегодняшний день ожидаемая стоимость запуска разрабатываемой в рамках проекта ракеты остается неизвестной. Бюджет исследовательской работы составил около 4 млн. Евро [11].

## 8.2 Firefly Alpha

Компания Firefly Aerospace берет свое начало в 2014 году в Техасе, когда несколько соучредителей с небольшой группой инженеров основали компанию Firefly Space Systems на собственные средства. Компания начала разработку ракетного двигателя, предназначенного для легких ракет-носителей, однако в декабре 2016 года обанкротилась в связи со спорами относительно интеллектуальной собственности с Virgin Galactic.

В 2017 году компания была приобретена венчурным фондом Noosphere Ventures, который предоставил ей финансирование в объеме 75-100 млн. долл. США [12]. На сегодняшний день компания имеет более 300 сотрудников в своих представительствах в США и Украине и активно работает над созданием своей основной ракеты Firefly Alpha.

Alpha представляет собой двухступенчатую ракету высотой в 29.7 м и диаметром – 1.82 м и общей массой, равной 54,000 кг. Первая ступень, высотой в 18.8 м включает в себя 4 жидкостных ракетных двигателя собственного производства компании, названные “Reaver” (рис. 12).



Рисунок 12. Наземное испытание ракетного двигателя “Reaver”.

Эти двигатели способны в сумме развивать тягу до 736.1 кН и обладают суммарным удельным импульсом, равным 295.6 с. Двигатели работают на смеси керосина и сжиженного кислорода, подаваемой при помощи ТНА. Первые проектные образцы 2015 года предполагали использование клиновоздушных ракетных двигателей на первой ступени РН, однако по состоянию на

сегодняшний день первая ступень этой РН использует ЖРД “Reaver” с классическим соплом.

Вторая ступень оснащена одним двигателем схожей конструкции с тягой в 70 кН и удельным импульсом в вакууме, равным 322 с. В верхней части ракеты расположен отсек для полезной нагрузки высотой в 5 м и диаметром в 2 м [13]. Также, в качестве третьей ступени ракеты может выступать межорбитальный буксир на солнечной батарее, способный выводить полезные нагрузки на конечные траектории и удерживать их там сроком до пяти лет [14].

Согласно плану разработчиков, ракета Firefly Alpha будет способна выводить до 1000 кг. полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту (200 км) и до 600 кг – на солнечно-синхронную орбиту (600 км). Цена запуска ракеты оценивается в 15 млн. долл. США, что составляет 15 тыс. долл. за 1 килограмм полезной нагрузки.

Первый запуск Firefly Alpha произошел 3 сентября 2021 года и был неудачным, вследствие проблем с работой ЖРД первой ступени. Согласно плану, ракета должна будет вывести на низкую околоземную орбиту несколько исследовательских спутников.

### 8.3 Сравнение стоимости выведения группировок

Таблица 3. Бюджет выведения группировок спутников

Название проекта	Масса МКА	Количество в группировке	Масса группировки, кг	Общее финансирование	Стоимость выведения			
					Electron 20к\$/кг	Hyperbola 16600\$/кг	Astra 12200\$/кг	Firefly Alpha 15000\$/кг
HawkEye 360	15	30	450	99.3M	9M	7.47M	5.49M	6.75M
Kineis (CLS)	26	25	650	112M	13M	10.79M	7.93M	9.75M
Satelloptic	37	90	3300	79M	66.6M	54.7M	40.26M	49.5M
BlackSky	44	60	2640	253.5M	52.8M	43.82M	32.2M	39.6M
OneWeb*	125	648	81000	3.4B	1.62B	1.34B	988M	1.21B

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В аналитической работе были рассмотрены РН сверхлегкого класса, способные к выводу МКА массой от 150 до 250 кг на низкую околоземную орбиту и от 50 до 150 кг на солнечно-синхронную орбиту. По состоянию на настоящий момент существует ряд успешных проектов РН СЛК, созданных различными государственными компаниями, как правило, на основе существующих военных баллистических ракет. Такие РН СЛК как правило, являются достаточно тяжелыми, используют устаревшие технологические решения и недоступны для коммерческих запусков, в следствии чего эти проекты не являются первоочередными конкурентами разработок частных компаний.

Наиболее коммерчески успешным на сегодняшний день проектом является ракета Electron компании Rocket Lab, которая совершила 11 успешных запусков за последние три года. По сравнению с разработками компании Northrop Grumman (Pegasus, Minotaur V) эта ракета обладает сравнительно низкой стоимостью запуска, равной \$20,000/кг. Большинство компаний, стремящихся выйти на этот рынок рассматривают Electron в качестве основного конкурента и стремятся достичь меньшей стоимости запуска. Лишь несколько частных компаний в этом сегменте совершили успешные запуски на сегодняшний день. Основными коммерческими компаниями, осуществившими успешные запуски РН СЛК (или вплотную приблизившиеся к ним) являются Rocket Lab (Electron), i-Space (Hyperbola-1), Astra (Rocket 3.0) и Firefly Aerospace (Alpha).



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Catapult Satellite Applications, Bryce Space and Technology.
2. CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers [Электронный ресурс] – [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa\\_csli\\_cubesat\\_101\\_508.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf)
3. Gunter's Space Page - CZ-11 [Электронный ресурс] – [https://space.skyrocket.de/doc\\_lau/cz-11.htm](https://space.skyrocket.de/doc_lau/cz-11.htm) .
4. The Diplomat [Электронный ресурс] – <https://thediplomat.com/2019/06/why-chinas-long-march-11-launch-matters/>.
5. Xu Q., Hollingsworth P., Smith K., Launch Cost Analysis and Optimization Based on Analysis of Space System Characteristics // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. Vol. 62(4) pp. 175–183, 2019.
6. Gunter's Space Page - Astra Rocket [Электронный ресурс] – [https://space.skyrocket.de/doc\\_lau/astra.htm](https://space.skyrocket.de/doc_lau/astra.htm) .
7. Space Launch Report: Astra Rocket [Электронный ресурс] – <https://www.spacelaunchreport.com/astra.html> .
8. Bloomberg [Электронный ресурс] – <https://www.bloomberg.com/features/2020-astra-rocket/> .
9. SpaceFund Launch Database [Электронный ресурс] – <https://spacefund.com/launch-database/> .
10. <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-600.pdf> .
11. European Commission [Электронный ресурс] – <https://cordis.europa.eu/project/id/687242>.
12. Ars Technica [Электронный ресурс] – <https://arstechnica.com/science/2019/02/firefly-returns-from-the-dead-with-a-larger-rocket-and-lunar-aspirations/> .
13. Firefly Aerospace Payload User's Guide [Электронный ресурс] – [https://firefly.com/wp-content/themes/firefly\\_aerospace/files/Alpha\\_PUG\\_2019-08-30\\_v2.pdf](https://firefly.com/wp-content/themes/firefly_aerospace/files/Alpha_PUG_2019-08-30_v2.pdf)
14. Orbital Transfer Vehicle Payload User's Guide [Электронный ресурс] – [https://firefly.com/wp-content/themes/firefly\\_aerospace/files/OTV\\_PUG.pdf](https://firefly.com/wp-content/themes/firefly_aerospace/files/OTV_PUG.pdf) .