

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ CUBESAT: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОРБИТЫ

О. Я. Яковлев✉, Д. В. Малыгин

ООО «Астрономикон»

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Почти 15 % всех выведенных космических аппаратов в космическое пространство за последние 25 лет относятся к формату CubeSat. В процессе проектирования будущих миссий космических аппаратов этого класса с целью проведения обзора существующих миссий и использования связанных с ними данных полезна база данных, с помощью которой можно удобно получать информацию из одного информационного источника. В работе представлена новая русскоязычная открытая база данных космических аппаратов CubeSat, которая содержит в себе информацию об их основных характеристиках, запусках, а также актуальные и исторические орбитальные параметры. Представлена классификация по семействам, конструкции и назначению аппаратов. В работе используются актуальные на осень 2025 года данные о 2783 космических аппаратах CubeSat, которые в соответствии с введенной классификацией были разделены на 896 семейств, 129 моделей и 6 классов функций, 5 областей применения. Описываются возможные способы выведения в космическое пространство, которые разделены на две группы (с борта МКС или с другого технического устройства). Определены наиболее распространенные классы орбит (солнечно-синхронные орбиты и орбиты с наклоном МКС).

Ключевые слова: CubeSat, наноспутник, сверхмалый космический аппарат, низкая околоземная орбита, база данных.

Поступила в редакцию: 14.11.2025. Принята к печати: 28.11.2025.

Введение

Более 2700 космических аппаратов класса CubeSat выведено в космическое пространство на околоземные орбиты, а также более десятка в составе межпланетных миссий на гелиоцентрические орбиты, к Марсу, Луне и астероиду. С начала существования этого формата расширилась и область их применения: от образовательных проектов до полноценных коммерческих и научных миссий.

Стандарт CubeSat определяет требования и ограничения к космическому аппарату (КА), его испытаниям и интеграции с пусковым контейнером, которые представлены в спецификации [1]. В первую очередь ограничения касаются формы корпуса (параллелепипед, размеры сторон которого кратны ≈ 10 см) и устанавливают соответствие между его размером и массой всего КА. Выполнение требований и рекомендаций спецификации упрощает процесс интеграции с ракетой-носителем (РН) и вследствие этого процесс запуска. При этом часть

этих требований может быть слабее или, наоборот, строже требований поставщика пусковых услуг, которые являются приоритетными.

Как правило, внутреннее устройство кубсатов – КА, выполненных в формате CubeSat, формируется на основе открытой архитектуры, характерной для спутниковых платформ. Она заключается в формализации требований к информационным, механическим и электрическим интерфейсам, системе энергетического обеспечения, а также во введении функционально обособленных пространств внутри аппарата (служебные системы, полезная нагрузка), каждое из которых имеет определённый фактор. Механические и электрические интерфейсы характеризуются:

1) наличием крепёжных отверстий для монтажа к корпусу КА – стандартизуются шаг, диаметр отверстий;

2) наличием общего коммуникационного разъёма – стандартизуются типоразмеры, распайка (электропитание, шина данных);

3) возможностью оперативной сборки и/или перекомпоновки аппарата в зависимости от решаемой задачи.

✉ yko-v@ya.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

С ростом количества аппаратов этого класса возрастает и потребность в систематизации данных о них, которые можно использовать при проектировании, проведении статистических исследований или для других целей. Наиболее полными и актуальными базами данных (БД) CubeSat являются Nanosats Database [2] и Gunter's Space Page [3]. В них содержится основная информация по состоявшимся, планируемым и отмененным миссиям.

Основным недостатком перечисленных БД является отсутствие в них актуальных и исторических параметров орбит. Эти данные для всех КА в формате TLE публикуются на ресурсе Space-track [4] за весь срок баллистического существования, а также вместе с информацией о космических запусках в виде последних доступных кеплеровских параметров орбит в источнике Celestrack [5]. Но в этих БД отсутствует возможность выделить отдельно кубсаты.

Таким образом, хотя в открытом доступе существует достаточно полная информация по миссиям CubeSat, представленная в перечисленных выше четырех БД, но ни одной из них не достаточно для проведения исследований характеристик кубсатов и их орбитальных параметров одновременно. Кроме того, данные из разных БД согласованы частично, а классификация не всегда строго формализована, что затрудняет анализ информации.

Для решения этих проблем нами разработана новая база данных. В ней содержится информация только о КА класса CubeSat, запуск которых состоялся, а также об их миссиях и орбитах. Описанию этой БД и разработанной классификации кубсатов посвящена настоящая работа.

Содержание и ключевые моменты разработки БД даны в разделе 1. В разделе 2 описываются основные особенности классификаций, которые представлены в следующих разделах: по семействам, конструкции и назначению КА (раздел 3), по способам выведения (раздел 4) и по параметрам рабочих орбит (раздел 5). В настоящей работе используются данные, актуальные на 01.09.2025. Равнозначно применяются понятия «КА CubeSat», «кубсат», «сверхмалый космический аппарат» (СМКА) и «наноспутник».

1. Данные

Разработанная БД основывалась на двух других открытых БД. Первая (Nanosats Database) посвящена всем наноспутникам независимо от форм-фактора, а также кубсатам объемом до 27U (массой до 40 кг) [2]. Во второй (Gunter's Space Page) содержится информация о КА всех классов, а также о запусках, ракетах-носителях, разгонных блоках и космодромах [3]. Они содержат идентификационную информацию (названия

КА, его номера в каталогах NORAD и COSPAR), аффилиации (страны, организации), формат (объем в юнитах U) и массу, его состав, описание миссии и устройства, некоторые орбитальные параметры, информацию о запуске (дата, место пуска, средства выведения), а также другие параметры.

Эти БД являются опорными, на их основе составлен список, в который вошли как запущенные (успешно или нет) СМКА, так и те, запуск которых был отменен или еще не произошел. С помощью программного скрипта (Python) с этих ресурсов была собрана основная информация о 4043 и 3279 таких аппаратах соответственно (в том числе некоторые КА других классов, связанные с кубсатами).

Путем сопоставления по дате запуска и названию СМКА установлено соответствие между опорными БД, в результате чего была получена единая таблица со всеми кубсатами и информацией о них. Далее таким же образом эта таблица была соединена с таблицами Spacetrack SatCat [5] и McDowell Launch Log [6], содержащими информацию обо всех космических запусках и КА в их составе. В результате чего были определены все запуски, в составе которых имелись кубсаты, а также получено соответствие между названиями СМКА и их уникальными номерами COSPAR ID и NORAD ID.

Полученная таблица содержала информацию о 2783 запущенных кубсатах. По каждому полю проводилась проверка данных с уточнением (в случае необходимости) по другим источникам, связанным с миссиями, организациями и программами (например, [7, 8]).

Для 2558 СМКА получилось определить идентификационный номер NORAD ID. По этим номерам с помощью ресурса Space-track [6] по API (Python) были загружены наборы данных TLE за промежуток времени наблюдения за ними службой NORAD (до окончания времени существования или до выгрузки данных). На основании этих данных были определены фактические орбитальные параметры за указанный срок, в том числе эксцентриситет, наклонение, большая полуось, период орбиты.

В результате нормализации БД были составлены 26 таблиц. Основная таблица «Космические аппараты» связана с таблицей, содержащей исторические орбитальные данные, и со всеми остальными, которые можно разделить на следующие группы: связанные с запуском («Запуски», «Ракеты-носители», «Космодромы»), со способом выведения («Пусковые устройства», «Попутный запуск», «Носитель», «Связь с МКС»), с классификациями по семействам, назначению и конструкции; а также вспомогательные таблицы.

Дальнейшее пополнение БД предполагается в ручном режиме на основании описанных выше

и других источников. Пополнение орбитальных параметров осуществляется регулярно автоматически раз в неделю. БД управляется с помощью системы MySQL, открытый доступ осуществляется через сайт [9].

2. Особенности классификации

С целью систематизации имеющихся данных была разработана система классификаций кубсатов по семействам, конструкции и назначению. Такая классификация позволяет структурированно описать их на разных этапах жизненного цикла и группировать их и связанные с ними объекты и события (запуски, РН, космодромы, орбиты и др.) по разным признакам, анализировать связь между ними, проводить статистические исследования. При этом учитываются следующие особенности, характерные для миссий наноспутников.

Зачастую одна организация (разработчик) разрабатывает множество одинаковых кубсатов с одним назначением. Распределение по какому-либо параметру, полученное с учетом всех таких экземпляров, может исказить представление об этом параметре. Например, если рассматривать отдельно все экземпляры, то получается, что в формате 3U выполнено в 4 раза больше, чем в 1U (около 52 % и 13 % соответственно). Однако если сгруппировать их по семействам, в которых все наноспутники мало отличаются друг от друга и выполняют одинаковые функции (обычно имеют одно название с разным номером), то значения уже будут отличаться только в 1.6 раза (37 % и 23 %). Это в основном связано с тем, что среди всех выведенных кубсатов почти четверть составляет семейство Flock формата 3U.

Результаты функционирования КА могут использоваться для решения задач из разных сфер деятельности человека. Например, один и тот же спутник дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) может использоваться одновременно для мониторинга пожаров с целью решения задач по обеспечению безопасности и для наблюдения за облачным покровом Земли с целью решения научных задач, а также может применяться в военных целях. Исходя из этого, предлагается отдельно рассматривать СМКА от миссий, в которых они участвуют.

Аналогичным образом часто используемые в опорных БД такие понятия, как «испытательный», «технологический», «образовательный», «коммерческий», при описании назначения наноспутника не раскрывают его целевого назначения и сути миссии. Благодаря разработке и эксплуатации могут достигаться образовательные цели, а результаты работы могут приносить или нет прибыль разработчику, но это не отражается на работе самого спутника. Поэтому далее миссия

характеризуется областью применения и отдельно эффектом, который оказывает она в результате проведения миссии. Независимо от этого различные кубсаты (чаще всего одного семейства) могут использоваться на разных этапах в рамках одной миссии: для испытаний или для непосредственного выполнения целевой задачи.

На основании описанных особенностей СМКА независимо классифицируются по целевой функции, которую они выполняют, и по конструкции; миссии – по области применения и по эффекту. При этом миссия может разделяться на этапы (испытательный, целевой).

Под назначением далее подразумевается сочетание функций кубсата и его области применения. Такой подход позволяет явно отделить действия, связанные напрямую с полезной нагрузкой, от области деятельности, которая связана с результатом работы СМКА и конкретной миссией, в отличие от общепринятого использования понятия назначения аппарата (например, в классификации в [10, 11]), в котором смешиваются эти категории.

3. Космические аппараты

3.1. Семейства

Используются следующие категории для характеристики СМКА: модель, серия, партия, семейство. К одной модели относятся все спутники, которые имеют одинаковый формат конструкции (учитываются объем и форма корпуса, а также конфигурация солнечных панелей в раскрытом состоянии). Подмножество одной модели, состоящее из одинаковых по составу изделий (копии друг друга), относится к одной серии. Подмножество одной серии может быть выведено в космос в ходе одного запуска, в таком случае все они относятся к одной партии. Множества КА для одной миссии объединяются в семейства. Обычно все экземпляры одного семейства имеют названия, состоящие из названия самого семейства и номера или названия модели, серии и партии, если такое деление существует. В некоторых случаях названия отличаются полностью.

База данных содержит информацию о 2783 СМКА CubeSat, которые были разделены на 896 семейств (рисунок 1). Эти семейства можно объединить в 4 соразмерные части: 600 из них содержат в составе один КА ($N = 1$); наиболее многочисленное семейство Flock содержит $N = 620$; еще 5 (Spacebee, Lemur, Sitro-ais, Dove, AeroCube) состоят из $N \in [32]$ (всего 514); а остальные 290 семейств содержат $N \in [2, 22]$ КА (всего 1049).

В качестве примера классификации можно рассмотреть семейство Spacebee, состоящее из 201 спутника (рисунок 2). Все они были разработаны одной компанией и предназначены для обеспечения двусторонней связи. Однако первые

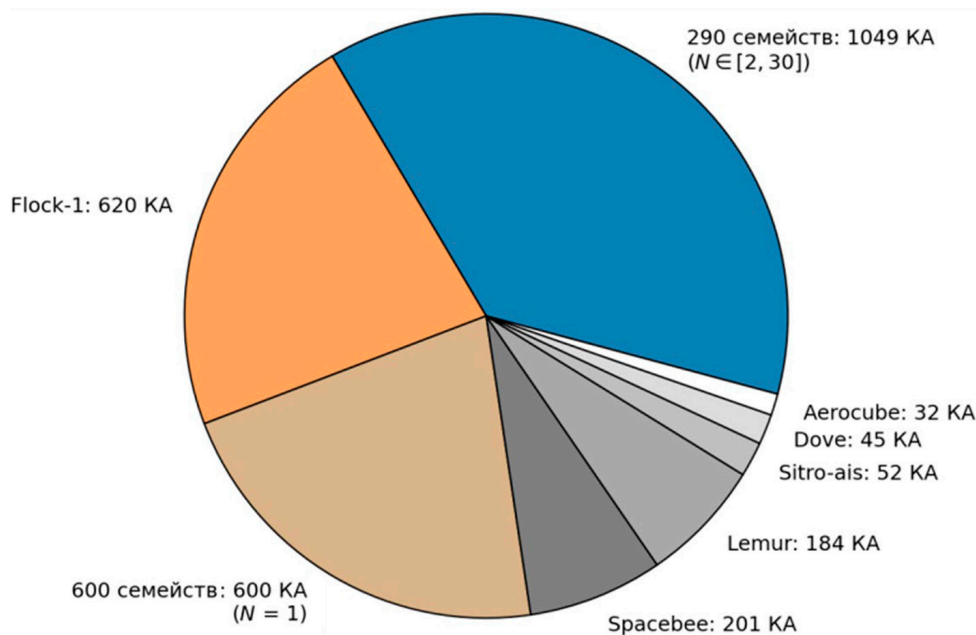


Рисунок 1. Распределение численности КА по семействам

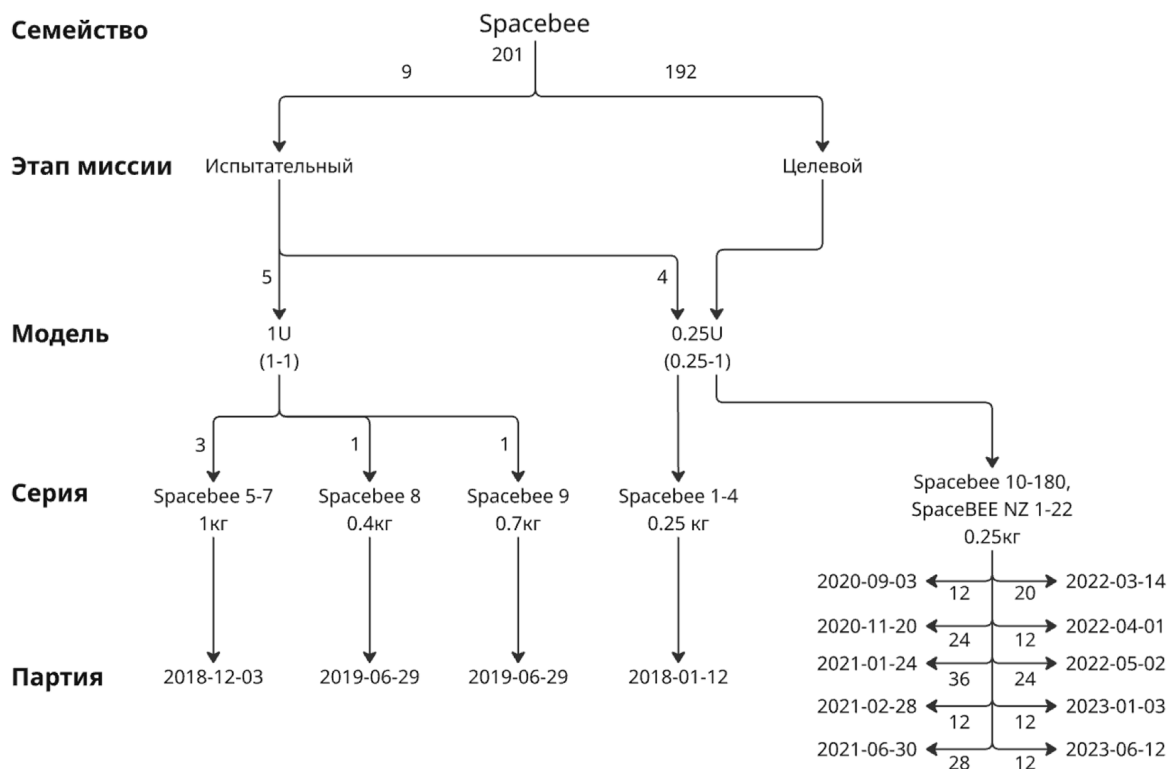


Рисунок 2. Пример общей классификации для семейства Spacebee

9 были испытательными, а остальные 192 решали целевую задачу, поэтому можно выделить два этапа миссии. При этом 4 испытательных (1–4) и все целевые кубсаты выполнены в формате 0.25U (модель 0.25–1, см. следующий раздел), а остальные пять испытательных (5–9) в формате 1U (модель 1–1). К первой модели относятся 3 серии, ко второй – две. Испытательные спутники были сгруппированы в 4 партии по 4, 3 и два одиночных аппарата соответственно по сериям, которые были

выведены в 2018–2019 годах, а целевые – в остальные 10 партий по 12, 20, 24, 28 и 36 аппаратов в течение следующих трех лет.

3.2. Конструкция

С точки зрения моделирования орбитального движения на низких околоземных орбитах важным фактором, определяющим атмосферное воздействие на КА, является коэффициент аэродинамического сопротивления, который зависит

от его массы и геометрических характеристик. Соответствие кубсата габаритам из спецификации [1] необходимо для использования пускового контейнера при выведении его на орбиту. После выведения многие из них раскрывают панели солнечных батарей (СБ) или другие элементы конструкции (антенны, парусы и пр.), а некоторые изменяют свой типоразмер. Поэтому классификация кубсатов по типу конструкции должна учитывать не только параметры используемого типоразмера при запуске, но и его конструкцию после выведения на орбиту. Таким образом, предлагается использовать следующие два признака.

Формат корпуса СМКА во время запуска приведен на рисунке 3. В спецификации [1] определены геометрические параметры и рекомендованная максимальная масса для шести основных типоразмеров CubeSat (1U, 1.5U, 2U, 3U, 6U, 12U, где 1U соответствует кубу объемом 1 л). Для трех из них также представлены форматы 3U+, 6U+, 12U+ с дополнительным блоком в виде цилиндра максимальным объемом $V \approx 0.12$ л (64x36 мм). На каждые 3 л возможно разместить один такой блок с торца (один для 3U и до четырех для 12U). Однако используются и другие типоразмеры, ко-

торых нет в спецификации. К ним отнесены малогабаритные форматы 0.25U, 0.3U, 0.5U, которые отличаются от 1U только высотой; а также 2U, 4U, 5U, 8U, 9U, 16U и 20U. Кроме того, вводится буква L (Long) для обозначения форматов того же объема, но с вытянутой вдоль одной оси формой (рисунок 3). Все имеющиеся типоразмеры были определены по имеющимся изображениям кубсатов в БД [2; 3].

Конфигурация панелей СБ во время полета представлена на рисунке 4. Панели СБ являются наиболее распространенными раскрываемыми элементами, которые после раскрытия могут значительно изменять площадь поверхности спутника, а значит, и влиять на его орбитальное движение. При этом существует ограниченное число вариантов их конструктивного исполнения, т.е. они удобно поддаются классификации. Кроме того, площадь панели СБ в большинстве случаев кратна площади какой-либо из сторон СМКА. Исходя из перечисленных факторов, на втором уровне классификации кубсаты были разделены в зависимости от конфигурации панелей СБ.

Наиболее распространенными являются форматы 3U, 6U и 1U: 1402, 364 и 347 кубсатов, ко-

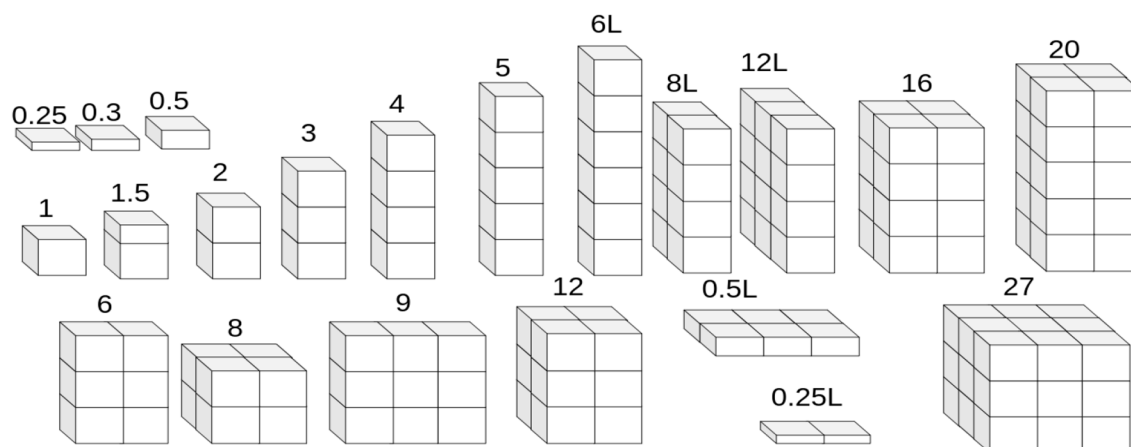


Рисунок 3. Варианты форматов корпусов кубсатов

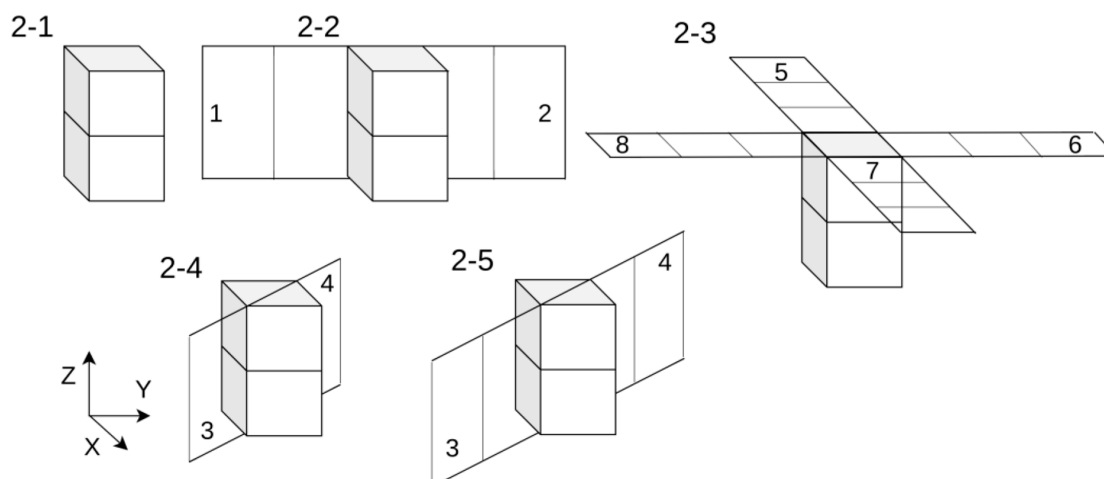


Рисунок 4. Варианты исполнения некоторых конфигураций панелей солнечных батарей на примере 2U

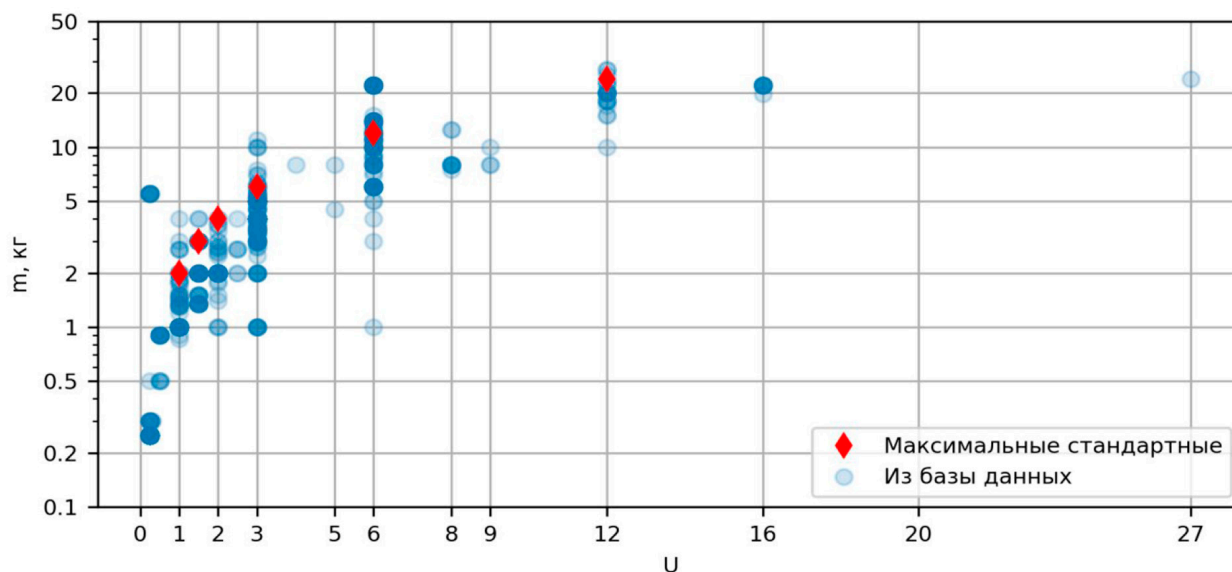


Рисунок 5. Зависимость от объема (U) массы (кг): максимальной стандартной в спецификации CubeSat [1] (ромбы) и по базе данных (круги)

которые принадлежат 356, 181 и 222 семействам соответственно. Согласно рисунку 5, их масса составляет от 0.25 до 27 кг. Причем все аппараты объемом 3U и меньше, кроме четырех 3U, имеют массу менее 10 кг. Всего 123 кубсата с массой более 10 кг, в основном размерностью 6U и 12U (69 и 21 соответственно).

На втором уровне классификации внутри каждого формата предлагается разделять в зависимости от конструкции панелей СБ после их полного раскрытия. Для этого выделяются основные плоскости, в которых они располагаются: совпадающие с гранями аппарата, а также другие некоторые часто используемые плоскости (диагональные или параллельные основным). И определяется направление – задается полуплоскость. Для определения размера за единицу площади принята площадь грани, лежащей в рассматриваемой полуплоскости длиной ~ 10 см (соразмерно с 1U). Во многих случаях достаточно этих двух параметров, чтобы задать конструкцию панелей СБ, такие модели считаются типовыми.

Все остальные модели, конструкции которых отличаются от описанных выше (типовых) моделей, помечаются как специальные в зависимости от наличия следующих элементов: парус, тонкостенная надувная или раскладываемая конструкция, крупногабаритная антенна, двигательная установка, дополнительные панели, цилиндрические блоки, бленда, крышка, дополнительные или отсутствующие панели СБ (по сравнению с типовыми конфигурациями), гравитационная штанга, тросовая система (трос или лента), возможность трансформации, наличие механической связи с другими СМКА.

В соответствии с классификацией вводится обозначение вида N -х, где N обозначает фор-

мат (1U, 3U и т.д.), а x – номер модели формата N . Модели без раскрывающихся солнечных панелей обозначаются N -1. Рассмотрим в качестве примера классификации по конфигурации панелей СБ формат 2U (рисунок 4), к которому относятся 82 семейства, представленные 10 моделями, из которых для примера рассмотрим 5. Всего можно выделить 8 полуплоскостей, в которых располагаются панели СБ типовых моделей площадью от 1 до 3 единиц: YZ (№ 1, 2 на рисунке 4), диагональная плоскость d (№ 3, 4) и XY (№ 5, 6, 7, 8). Первая модель (2–1) соответствует формату 2U (без панелей). Модели 2–4 и 2–5 отличаются только размером панелей (1U, 2U), 2–2 и 2–5 – плоскостью, в которой они расположены.

Такая классификация не определяет полностью положение плоскости в пространстве (не учитывает, например, расположение плоскости XY по оси Z на рисунке 4). Кроме того, никак не определен способ раскладывания панелей. Эти признаки будут важны при более подробной классификации кубсатов по их устройству в дальнейшем. Описанной выше двухуровневой классификации достаточно для исследования орбитального движения спутника.

Среди 896 рассматриваемых семейств кубсатов 852 получилось классифицировать по конструкции: выделены 21 формат (рисунок 3) и 129 моделей. Из них 458 семейств (54 %) не имеют раскрывающихся панелей СБ или других элементов и систем, влияющих на орбитальное движение (перечислены выше для специальных моделей), из которых наиболее популярны форматы 3U, 1U, 2U, 6U (186, 162, 61, 29 семейств соответственно). Среди моделей с панелями СБ наиболее распространены две модели 3U с панелями в полуплоскостях 1, 2 (рисунок 3) длиной в 1U и 2U, а так-

же модели 6U с панелями в полуплоскостях 5, 7 (рисунок 3) длиной 3U (23, 20, 19 семейств соответственно). Наибольшее количество типовых моделей соответствуют форматам 6U (32) и 3U (30).

3.3. Назначение

Целевая функция СМКА определяется характеристиками его полезной нагрузки. Выделяются 6 функций, которые автономно классифицируются в зависимости от целевого объекта, свойств взаимодействия с ним, а также по другим признакам (см. в таблице). Все кубсаты из БД можно отнести к одной из перечисленных групп. При этом один

Исключением являются одиночные запуски девяти СМКА: TRICOM (1, 1R), Lingque 1B, Palisade, Noor (1–3), Prefire (1, 2).

Можно выделить две группы способов выведения СМКА:

1. С борта МКС:

а) с помощью пусковых устройств Nanoracks CubeSat Deployer и JEM Small Satellite Orbital Deployer;

б) космонавтами во время выхода в открытый космос.

2. В составе другого технического устройства:

а) адаптеры PH: NLAS и др.;

Таблица

Классификация функций CubeSat

| № | Класс функций | Определение | Классификация |
|---|-------------------------|--|---|
| 1 | Наблюдения и измерение | Регистрация электромагнитного излучения и заряженных частиц | Объекты: Земля, небесные тела Солнечной системы, дальний космос, окружающая среда орбиты, другие КА Диапазон: радио, оптический, рентген |
| 2 | Связь | Передача информации | Роль: передатчик, приемник, приемопередатчик Направление: на объект, всенаправленное Объект: наземная станция, самолет, судно, другие КА Диапазон: радио, оптический |
| 3 | Космическая лаборатория | Обеспечение космических условий | Объект: система/технология КА, земная технология, организм Фактор: общие условия, микрогравитация, вакуум, радиация, температура |
| 4 | Транспорт | Перемещение полезной нагрузки и других объектов в космическом пространстве | |
| 5 | Эталон | Обеспечение характерных физических параметров | Параметр: масса, аэродинамический коэффициент, отражательная способность |
| 6 | Символ | Функции отсутствуют | |

аппарат может иметь несколько функций.

Можно выделить 5 областей применения результатов работы миссий, в которых участвовали CubeSat: гражданская (ДЗЗ, связь, погода, реклама), научная (геофизика, астрономия, физика космоса, науки о жизни), космическая, культурная и военная. Дополнительно выделяются 3 типа эффектов, которые могут оказываться в результате проведения миссий: образовательный, коммерческий и научный.

4. Выведение на орбиту

Всего с 2003–06–30 по 2025–07–25 было осуществлено 282 запуска (рисунок 6) с кубсатами на ракетах-носителях (РН) 42 семейств с 27 космодромов и 56 пусковых площадок. Из них 262 прошли успешно (93 %). Почти все СМКА были запущены в качестве попутной полезной нагрузки на РН в количестве от трех до 123 за один запуск.

б) разгонного блока (РБ): Фрегат, Центавр и др.;

с) более крупного КА: Sygnus, Prox-1, Bevo, Vigoride, LDPE и др.;

д) межорбитального буксира (МОБ): UNISAT, Fossa и др.

Для запуска с борта МКС СМКА доставляется на станцию с помощью грузовых аппаратов, после чего либо помещается в контейнере в пусковое устройство с последующим отделением, либо отбрасывается космонавтами при выходе в открытый космос (11 кубсатов). В случаях 2.а-2.с контейнер со спутником помещается в пусковое устройство, которое закрепляется на элементах конструкции носителя, а в последнем варианте непосредственно помещается в пусковое устройство МОБ без контейнера. Кроме того, СМКА может закрепляться без контейнера к верхней ступени ракеты (например, TRICOM 1, 1R в составе РН легкого класса SS-520). Подробнее о способах выведения см. в [12, 13].

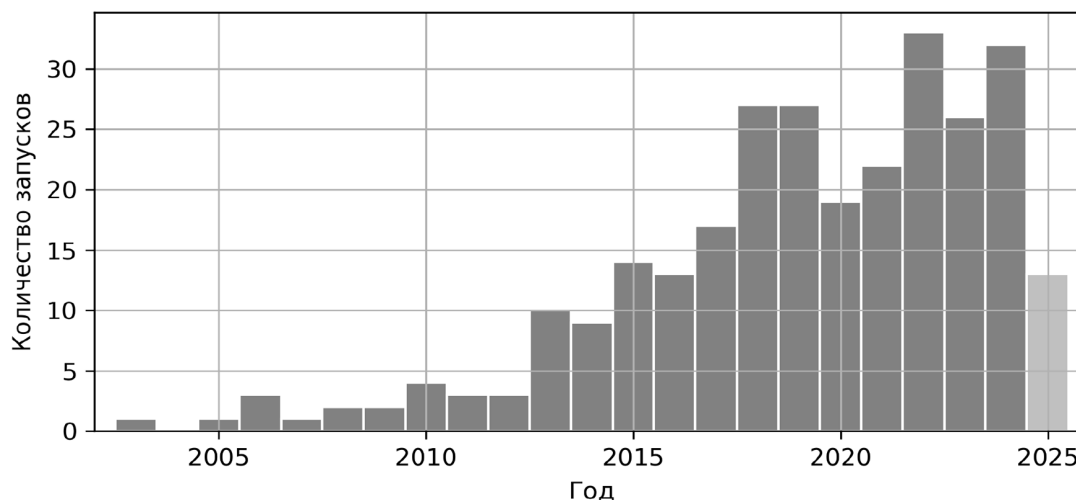


Рисунок 6. Распределение запусков РН с кубсатами в составе для запусков до 01.09.2025

5. Орбиты

Из 2783 кубсатов БД только 18 участвовали в межпланетных миссиях, в том числе 2 (Juventas и Milani) в настоящее время находятся на борту межпланетной станции Нера, которые должны достичь астероида Дидимос в 2027 году. Первыми кубсатами, функционирующими вне околоземного пространства, являются Marco-A, Marco-B в рамках миссии к Марсу Insight. 2022–11–16 запущено еще 8 к Луне (LunaH-Map, Lunar-IceCube, NEA-Scout, LunIR, Equuleus, Omotenashi, ArgoMoon, Miles) и 2 на гелиоцентрическую орбиту (BioSentinel, CuSP) в рамках миссии Artemis. Отдельно 4 к Луне: Liciacube (2021–11–24), Capstone (2022–06–28), Lunar-flashlight (2022–12–11), EagleCam (2024–02–15). Далее рассматриваются только околоземные орбиты.

Стремление к упрощению разработки, выведения на орбиту и функционирования СМКА является центральной идеей в концепции CubeSat. Вследствие этого диапазоны орбитальных параметров и наиболее распространенные классы рабочих орбит ограничиваются следующими факторами.

В основном используется коммерческая элементная база (COTS), которая отвечает требованиям радиационной стойкости только на низких околоземных орбитах. С точки зрения температурного режима предпочтительны орбиты, на которых тепловые условия будут как можно более стабильны. К таким орбитам относятся солнечно-синхронные орбиты.

Выведение на орбиту совершается попутным способом, поэтому параметры орбит спутников сильно зависят от способа выведения: все из одной группы выведения имеют близкие по начальным параметрам орбиты.

У большинства кубсатов нет возможности ухода на орбиту захоронения, и они имеют неболь-

шой срок функционирования (до нескольких лет), поэтому для уменьшения их срока баллистического существования также наилучшим образом подходят низкие орбиты.

В большинстве случаев (95 %) кубсаты функционируют на низких околоземных околокруговых орбитах, т.е. высотой $H < 1000$ км с эксцентриситетом $e < 0.01$ (рисунок 7а). Перечисленными выше факторами обусловлены два наиболее распространенных для них класса орбит: солнечно-синхронные орбиты (ССО) с наклоном $i \in [95.3, 99.5]^\circ$ высотой $H \in [347, 1015]$ км (рисунок 7б) и орбиты с наклоном МКС $I \in [51.62, 51.72]^\circ$ высотой $H \in [175, 504]$ км (рисунок 7в). К этим двум классам относятся 87 % орбит кубсатов от общего числа (1473 ССО и 410 с наклоном МКС). Поэтому по наклону наиболее распространены полярные орбиты $I \in [81, 102]^\circ$ и орбиты средних широт с $i \in [24, 75]^\circ$ (и $i \in [120, 125]^\circ$).

ССО характеризуется равенством скорости прецессии восходящего узла орбиты и средней угловой скорости движения Земли по орбите, что выполняется при задании высоты и наклоне орбиты спутника, отвечающих зависимости между ними, изображенной на рисунках 7а, 7б [14]. На орбитах, близких к ССО, условия освещенности орбиты СМКА и подспутниковой точки изменяются мало с течением времени. Поэтому, во-первых, ССО обеспечивает сезонную стабильность тепловых условий, что важно для функционирования кубсатов, так как зачастую средства обеспечения теплового режима весьма ограничены [15]. Во-вторых, ССО выгодно использовать при решении задач съемки поверхности Земли, что является одной из наиболее распространенных задач для CubeSat.

Наноспутники, выведенные непосредственно с МКС или с обеспечивающих МКС транспортных грузовых кораблей, формируют второй распро-

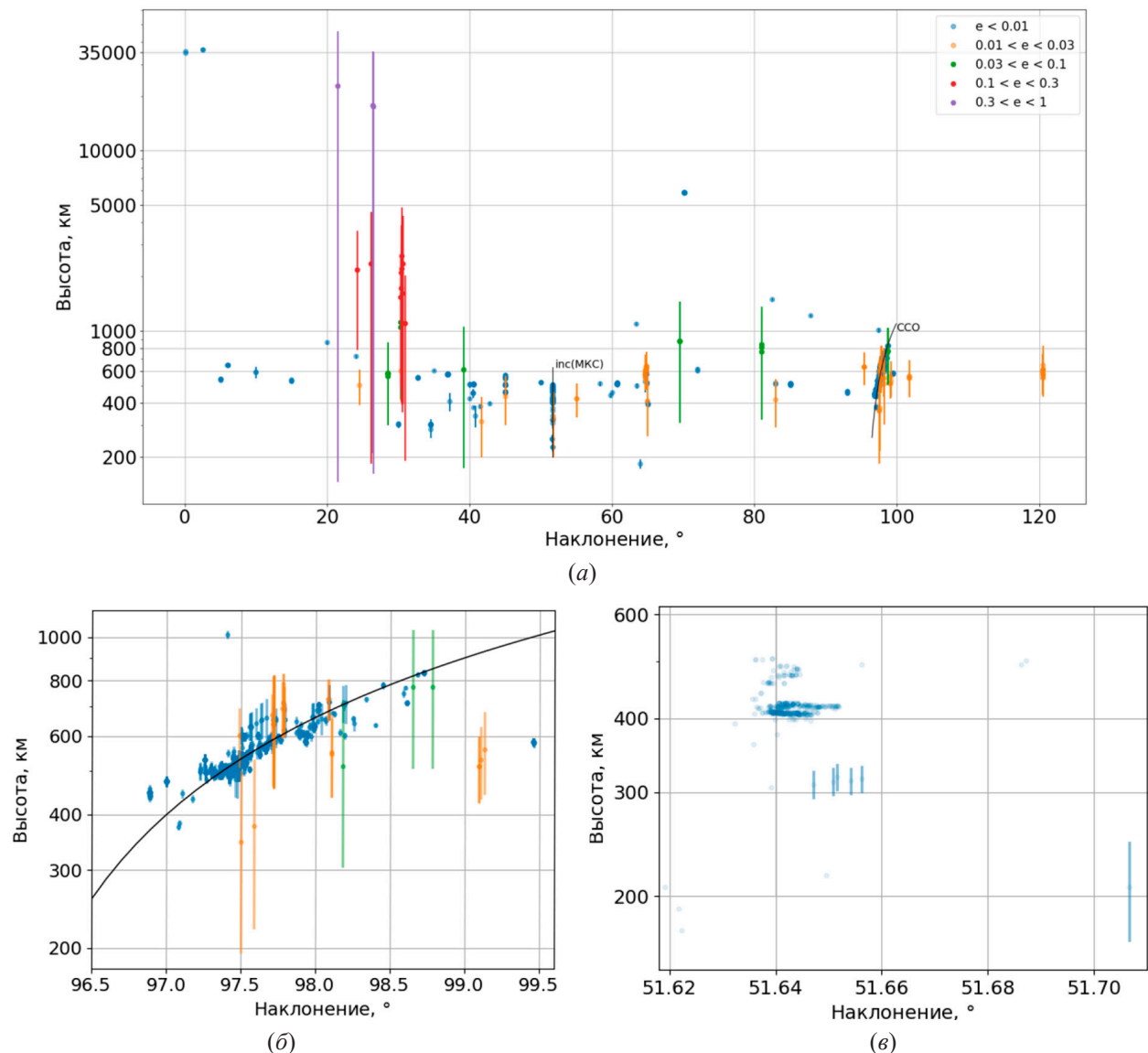


Рисунок 7. Начальные параметры высота (в логарифмическом масштабе (а), наклонение и эксцентриситет) околоземных орбит кубсатов: (а) – все, (б) – солнечно-синхронные орбиты и (в) – орбиты с наклонением МКС. На графике точками показана средняя высота орбиты, а вертикальные прямые соответствуют диапазону высот от перигея до апогея (чем длиннее линия, тем более вытянута орбита для данной высоты). Для орбит МКС (в) эти прямые показаны только орбиты с $e > 0.002$. Линией показана (а, б) зависимость высоты от наклонения для ССО

страненный класс орбит – орбиты с наклонением МКС. Все они были выведены на околокруговые орбиты (рисунок 7в). Кроме того, четыре СМКА выведены на геостационарные орбиты (ГСО) с наклонением $i \in [0.08, 2.62]^\circ$ высотой $H \in [34651, 36138]$ км.

Для 2475 кубсатов на основании данных в формате TLE были определены орбитальные параметры (высота, наклонение, эксцентриситет орбиты и эпоха и др.) на протяжении всего срока баллистического существования или до момента обращения к данным (если полет продолжается). Пример зависимости высоты орбиты от времени для 120 кубсатов одного запуска представлен на рисунке 8.

С помощью полученных данных возможно провести исследование зависимости срока баллистического существования от различных параметров СМКА (в первую очередь от типоразмера и высоты орбиты), которое будет представлено в другой работе.

Заключение

В результате проведенной работы была создана база данных выведенных в космическое пространство космических аппаратов формата CubeSat на основе открытых данных. Она содержит как общую информацию об аппаратах, запусках, способах выведения, так и орбитальные

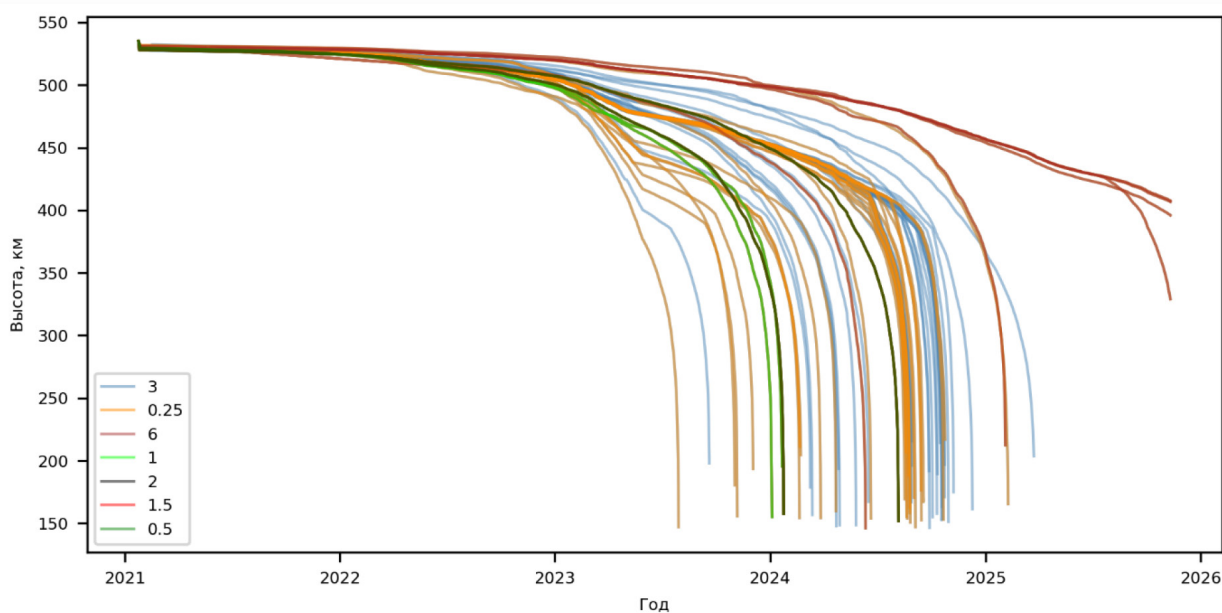


Рисунок 8. Зависимость высоты орбиты от времени для CubeSat, запущенных 2021–01–24 в ходе запуска № 2021–006. Различным цветом показаны зависимости для разных типоразмеров (от 0.25U до 6U)

параметры за весь срок баллистического существования.

Разработана классификация космических аппаратов по конструкции и назначению. Последняя мо-

жет применяться для спутников любых других классов. Всего найдена и верифицирована информация о 2783 космических аппаратах CubeSat, из которых для 2475 определены параметры орбиты.

Список литературы

- [1] CubeSat Design Specification Rev. 14.1., California Polytechnic State University. 2014, p. 34.
- [2] Gunter's Space Page CubeSat [Электронный ресурс]. URL: space.skyrocket.de/doc_sat/cubesat.htm (дата обращения: 01.09.2025).
- [3] Nanosats Database [Электронный ресурс]. URL: www.nanosats.eu/database (дата обращения: 01.09.2025).
- [4] Space-Track.org [Электронный ресурс]. URL: www.space-track.org (дата обращения: 10.11.2025).
- [5] CelesTrak [Электронный ресурс]. URL: celestrak.org (дата обращения: 11.11.2025).
- [6] McDowell J. Launch Log [Электронный ресурс]. URL: planet4589.org/space/log/launchlog.txt (дата обращения: 01.09.2025).
- [7] Спутники проекта SpacePI [Электронный ресурс]. URL: spacepi.space/satellites/ (дата обращения: 01.09.2025).
- [8] EO Portal Satellite Missions [Электронный ресурс]. URL: www.eoportal.org/satellite-missions (дата обращения: 01.09.2025).
- [9] ProtoS CubeSat Database [Электронный ресурс]. URL: 209.38.196.124:8000/ (дата обращения: 11.11.2025).
- [10] Никольский В. В. Проектирование космических аппаратов. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2003. 107 с.
- [11] Абламейко С. В. Малые космические аппараты. БГУ, Минск, 2012. 159 с.
- [12] Прокопьев В. Ю. Малые космические аппараты стандарта CubeSat. Современные средства выведения // Вестник науки Сибири. 2014. № 2. С. 71–80.
- [13] Handbook on Small Satellites. ITU-R, 2023. 212 с.
- [14] Чернов А. А., Чернявский Г. М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Радио и связь, 2004. 310 с.
- [15] State-of-the-Art Small Spacecraft Technology. NASA, 2024. 441 с.

CUBESATS: MAIN CHARACTERISTICS AND ORBITS

O. Ya. Yakovlev, D. V. Malygin

LLC Astronomikon

St. Petersburg, Russian Federation

Over the past 25 years, CubeSats have accounted for nearly 15 % of all spacecraft launched into orbit. To support a comprehensive review of existing CubeSat missions and to enable the use of related data for planning and developing future missions, a unified and easily accessible information source is required. This paper presents a new open-access Russian-language database of CubeSats, which compiles information on their principal design characteristics as well as both current and historical orbital parameters. A classification scheme is presented that organizes CubeSats by family, structural design, and mission purpose. The study uses data current as of autumn 2025 for 2,783 CubeSats, which, according to the proposed classification, are grouped into 896 families, 129 models, six functional classes, and five application domains. The work also describes the possible deployment methods, which are divided into two categories: deployment from the ISS or deployment from other launch or carrier systems. The most common orbital classes for CubeSats are identified, namely Sun-synchronous orbits and ISS-inclination orbits.

Keywords: CubeSat, nanosatellite, near-Earth orbit, database.

Submitted: 14.11.2025. Accepted: 28.11.2025.

References

- [1] CubeSat Design Specification. Rev. 14.1. California Polytechnic State University, 2014, 34 p.
- [2] Gunter's Space Page: CubeSat. Available at: space.skyrocket.de/doc_sat/cubesat.htm (accessed 01.09.2025).
- [3] Nanosats Database. Available at: www.nanosats.eu/database (accessed 01.09.2025).
- [4] Space-Track.org. Available at: www.space-track.org (accessed 10.11.2025).
- [5] Celestrak. Available at: celestrak.org (accessed 11.11.2025).
- [6] McDowell J. Launch Log. Available at: planet4589.org/space/log/launchlog.txt (accessed 01.09.2025).
- [7] SpacePI Satellite Catalog. Available at: spacepi.space/satellites/ (accessed 01.09.2025).
- [8] EO Portal Satellite Missions. Available at: www.eoportal.org/satellite-missions (accessed 01.09.2025).
- [9] ProtoS CubeSat Database. Available at: 209.38.196.124:8000/ (accessed 11.11.2025).
- [10] Nikolsky V.V. Spacecraft Design. St. Petersburg: Baltic State Technical University, 2003, 107 p.
- [11] Ablameyko S. V. Small Spacecraft. Minsk: Belarusian State University, 2012, 159 p.
- [12] Prokopyev V. Yu. CubeSat Standard Small Spacecraft // Siberian Journal of Science, 2014, no. 2, pp. 71–80.
- [13] Handbook on Small Satellites. ITU-R, 2023, 212 p.
- [14] Chernov A. A., Chernyavsky G. M. Orbits of Earth Remote Sensing Satellites. Moscow, Radio i Svyaz, 2004, 310 p.
- [15] State-of-the-Art Small Spacecraft Technology. NASA, 2024, 441 p.

Сведения об авторах

Яковлев Олег Яковлевич – инженер-исследователь ООО «Астрономикон». Окончил Московский государственный университет в 2021 году. Область научных интересов: моделирование орбитального движения и функционирования сверхмалых космических аппаратов.

Малыгин Денис Владимирович – кандидат технических наук, главный конструктор ООО «Астрономикон». Окончил Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2011 году. Область научных интересов: мехатроника и робототехника, системная инженерия космического приборостроения, продуктовый менеджмент аэрокосмической деятельности, форсайт и техноброкерство сверхмалых космических аппаратов, разработка, производство и коммерциализация сложной наукоемкой продукции.