

***Вахрушев Николай Владимирович***

магистрант

***Пьянков Игорь Николаевич***

магистрант

***Рязанов Михаил Николаевич***

магистрант

ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный  
технический университет им. М.Т. Калашникова»  
г. Ижевск, Республика Удмуртия

## **ОБЗОР ФОРМ-ФАКТОРА СПУТНИКОВ CUBESAT**

***Аннотация:** стандарт CubeSat дает возможность создавать наноспутники массой 1–4 килограмма за короткий период времени (1–2 года) при сравнительно низких затратах. Большая часть подобных спутников создаётся в научных и образовательных целях, однако сфера их использования постоянно расширяется. В данной статье для первичного ознакомления с устройством спутника рассмотрен его форм-фактор.*

***Ключевые слова:** CubeSat, наноспутник, форм-фактор, P-POD, PC/104-Plus.*

### *Общие сведения.*

В последнее десятилетие отмечается значительный рост числа запусков космических аппаратов, масса которых не превышает 10 кг, так называемых пикто- (до 1 кг) и наноспутников (от 1 до 10 кг) [1]. Традиционно такие спутники используются в образовательных целях и для отработки новых технологий, однако сфера их применения постоянно расширяется. Важную роль в этом направлении играет стандарт CubeSat [2], разработанный в 1999 году Калифорнийским политехническим и Стэнфордским университетами и в соответствии с которым выполнено большинство подобных спутников. Для первичного ознакомления имеет смысл рассмотреть форм-фактор спутников вышеуказанного формата.

Под форм-фактором подразумевается стандарт, задающий габаритный размер технического изделия, а также описывающий дополнительные совокупности его технических параметров, например, форму, типы дополнительных элементов, размещаемых в/на устройстве, их положение и ориентацию [3].

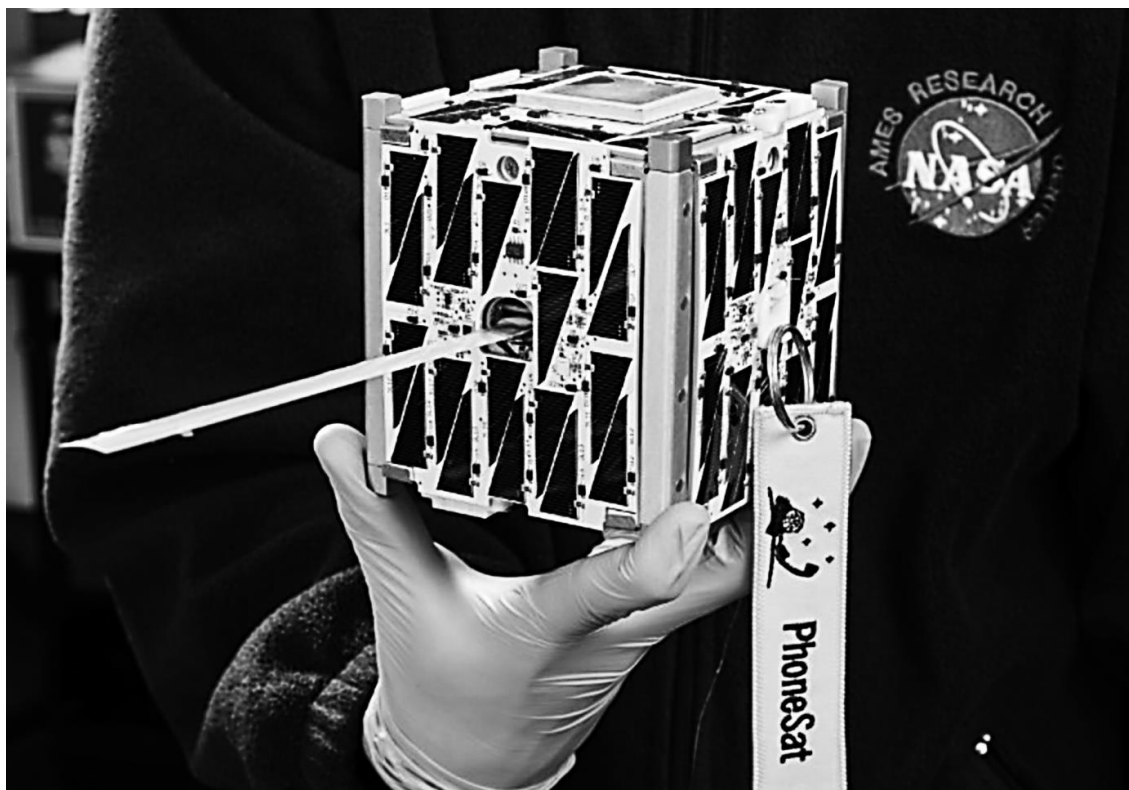


Рис. 1. Спутник PhoneSat 2.5 (<http://phonesat.org/>)

CubeSat – формат малых искусственных спутников земли для исследования космоса (рис.1), один модуль (1U) имеет объем 1 литр и массу не более 1,33 кг [4]. Стандарт допускает объединение 2 или 3 стандартных кубов (1U) в составе одного спутника (обозначаются 2U и 3U и имеют размер 100 x 100 x 200 или 100x100x300 мм). Для запуска спутников используется контейнер Poly-PicoSatellite Orbital Deployer (P-POD), он имеет размеры, достаточные для запуска трех спутников 100 x 100 x 100 мм или меньшего количества, общим размером не более 3U+. В таких спутниках обычно используется промышленная электроника, но есть и разработки использующие не стандартные подходы, например, разработчики спутника PhoneSat используют в качестве бортового компьютера современный смартфон (рис.1). Большую часть спутников CubeSat

разработали университеты, но крупные компании, например, Boeing, тоже проектировали спутники на базе CubeSat. Формат CubeSat используется также для создания частных радиолюбительских спутников.

Такие спутники путешествуют в виде необходимого для других, серьезных спутников балласта для обеспечения нужной полетной массы, что также значительно удешевляет проект. Большинство CubeSat имеют один или два научных прибора. Несколько компаний предоставляет услуги по выводу CubeSat на орбиту, в частности ISC Kosmotras и Eurokot. Множество не очень крупных задач, на которые ранее не хватало ресурсов большой космонавтики, теперь решаются.

### *Внешняя геометрия и порты.*

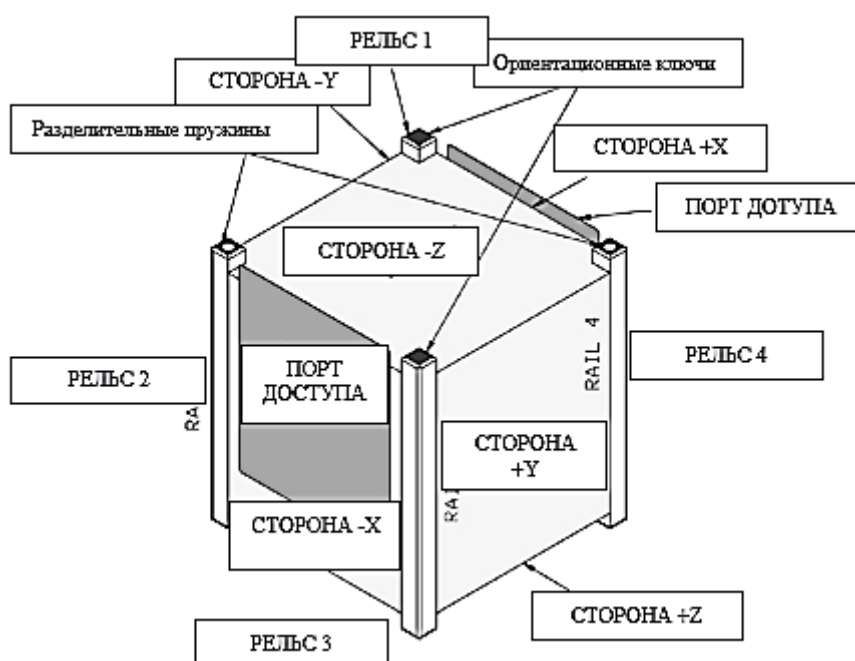


Рис. 2. Форм-фактор CubeSat (CubeSat Design Specification)

Внешняя геометрия регулируется стандартом и показана на рис. 2. Как уже отмечалось ранее, единичный модуль (1U) CubeSat – представляет собой куб размерами 100x100x100 миллиметров. Но это лишь размеры контейнера для размещения электроники спутника, рельсы же, направляющие по которым спутник выходит из транспортного контейнера, имеют длину, превышающую эти габариты, которая составляет 113,5 мм. К тому же спецификация определяет максимальное увеличение размеров на 6,5 мм по нормали к поверхности во всех зонах, за исключением рельс. Это допущение позволяет размещать на корпусе спутника

солнечные батареи, выступающие объективы камер, антенны. Рельс имеет квадратное сечение, длина сторон которого не должна быть меньше 8,5 мм, а его кромки должны быть закруглены с радиусом 1 мм. Концы рельс могут быть скошены, но контактная площадь между рельсами не должна быть меньше чем 6,5 мм x 6,5 мм. На рельсах размещаются ключи, для правильной ориентации спутника в транспортном контейнере P-POD, и отверстия для установки разделительных пружин, для разделения спутников между собой после выхода из транспортного контейнера. Пространство, выделенное для портов доступа (на рис. 2 затемнено), обеспечивают доступ к интерфейсным портам спутника тогда, когда он уже помещен в транспортный контейнер P-POD. С увеличением размера модуля (1U, 1.5U...3U+) растет его габаритный размер по координате Z, размеры же по координатам X и Y всегда остаются неизменными. Габаритные размеры стандартизированных модулей указаны в таблице 1.

Таблица 1

Габаритные размеры стандартных модулей CubeSat

Координата\ размер	1U	1,5U	2U	3U	3U+
X, мм	100	100	100	100	100
Y, мм	100	100	100	100	100
Z, мм	113,5	170,25	227	340,5	340,5 + 36

Отдельно отметим недавно появившейся форм-фактор 3U+, в нем к стандарту U3 добавлен дополнительный цилиндрический блок диаметром 64 мм и высотой 36 мм. Следует отметить, что введенный спутники нового форм-фактора не требуют разработки нового пускового контейнера, так его получают модернизацией толкателя обычного P-POD для U3, а дополнительный блок занимает пространство внутри выталкивающей пружины (рис. 3).

Стандарт также регламентирует смещения центра масс относительно геометрического центра, необходимые данные указаны в таблице 2.

Таблица 2

## Смещение центра тяжести стандартных модулей CubeSat

Размер спутника	Смещение по осям X и Y, мм	Смещение по оси Z, мм
1U	+/- 20	+/- 20
1,5U	+/- 20	+/- 30
2U	+/- 20	+/- 45
3U/3U+	+/- 20	+/- 70

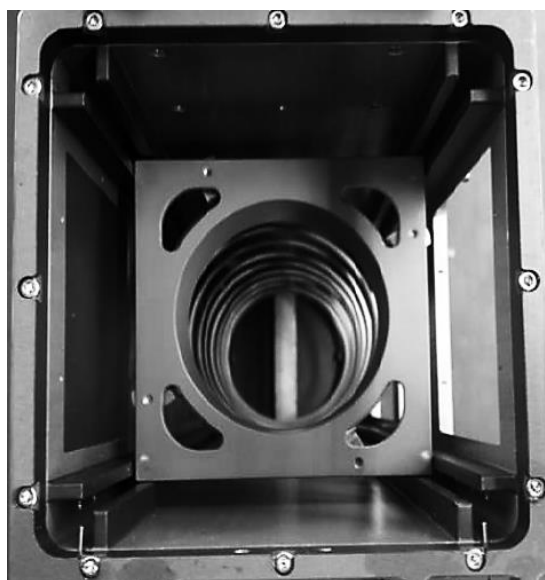


Рис. 3. Направляющие и толкатель в P-POD (CubeSat Design Specification)

Важно отметить наличие и других размеров модулей, выпускаемых различными компаниями, так, например, компания Pumpkin, Inc. ([www.cubesatkit.com](http://www.cubesatkit.com)) предлагает корпуса дополнительных размеров 0,5U и 6U. Что является логичным развитием, т.к. с 1999 года уровень интеграции электроники возрос и спутники выполняющие относительно простые задачи умещаются в корпусе меньшего размера, имеют меньший вес и энергопотребление с этим связано появление спутников размера 0,5U. В связи с уменьшением масса-габаритных размеров, снижаются расходы на вывод спутника на орбиту. Так же закономерно и появление спутников более большого формата U6, что позволяет размещать на таких спутниках крупногабаритные оптические приборы (рис. 4). Однако такие спутники требуют разработки собственного контейнера для транспортировки и выгрузки не отвечающего стандарту P-POD.

Масса модуля 1U не должна превышать 1,33 кг. Максимальные массы других модулей увеличиваются пропорционально увеличению объема, и составляют 2; 2,66; 4 кг для 1,5U; 2U; 3U/3U+ соответственно.



Рис. 4. Пример использования форм-фактора 6U (<http://www.isispace.nl/>)

#### *Система энергоснабжения.*

Обычно, система энергоснабжения CubeSat состоит из солнечных батарей, обеспечивающих его энергией на освещенной стороне орбиты, и аккумуляторных батарей, питающих бортовые системы на теневой стороне орбиты (примерно треть времени жизни для большинства CubeSat) и запасующих энергию солнечных батарей. Современные спутники так же часто имеют независимый источник питания микросхемы часов реального времени, которым обычно является низкопрофильная цилиндрическая батарея («таблетка»). Спутники, программа исследований которых рассчитана на короткий период времени обычно имеют только аккумуляторные батареи (Libertad-1[5]). В одиночных (1U) CubeSat используются солнечные элементы различных типов (Si, GaAs, а также CIGSэлементы [6], размещенные на корпусе спутника. На тройных CubeSat часто используются также раскрывающиеся панели солнечных батарей [7].

*Размещение оборудования внутри корпуса CubeSat.*

В такой отрасли как космическая промышленность, к аппаратным средствам управления предъявляются высокие требования в отношении возможности их надёжной работы при действии различных дестабилизирующих факторов (повышенная вибрация, ударные нагрузки, широкий диапазон изменения температур и др.).

Форм-фактор печатных плат CubeSat не регламентирован спецификацией, оставляя простор для инженерного творчества. Встречаются самые различные варианты исполнения и крепления плат внутри спутника. Как наиболее стандартизированный вариант можно выделить использование плат стандарта PC/104-Plus (рис.5). Платы такого формата активно использует фирма Pumpkin, Inc. в своём проекте CubeSat Kit ([www.cubesatkit.com](http://www.cubesatkit.com)).

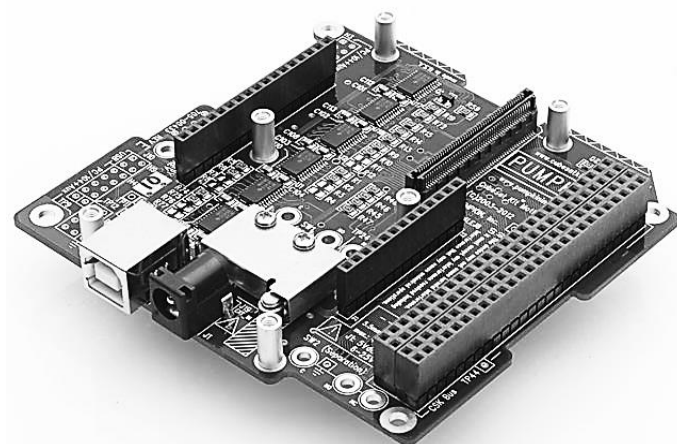


Рис. 5. Одноплатный бортовой компьютер, форм-фактор PC/104-Plus  
([www.cubesatkit.com](http://www.cubesatkit.com))

Сегодня более 100 фирм во всём мире предлагают выполненные в стандарте PC/104-Plus процессорные платы, платы дискретного и аналогового ввода-вывода, коммуникационные платы, источники питания, корпуса и дополнительные аксессуары.

Сам форм-фактор PC/104 был принят в 1992 году в ответ на требования об уменьшении габаритных размеров и энергопотребления компьютерных систем.

Каждая из этих целей была достигнута без ущерба для аппаратной и программной совместимости с популярными компьютерными стандартами. Спецификация PC/104 предлагает полную архитектурную, аппаратную и программную совместимость с компьютерными стандартами в компактных размерах плат (90х96 мм). Название стандарта получено за применение 104-контактного разъема шины ISA, расположенного в нижней части платы. PC/104-Pluse – этот форм-фактор получился путем добавления шины PCI с помощью 120-контактного разъема в верхней части платы. Данная спецификация была принята в 1997 году. Применение шины PCI позволило расширить функциональные возможности систем за счёт PCI совместимых функций: видео, Ethernet и прочих коммуникационных функций [8].

Одной из главных особенностей стандарта PC/104, заложенной с момента его разработки, является ударо- и виброустойчивая модульная конструкция. Передача информации осуществляется по шинам данных, выполненным в виде разъемов. Такое решение позволяет располагать платы одну над другой с соединением через эти разъемы (рис. 6), расстояние между платами определенное стандартом и равно 15 мм [9]. Как видно из рис. 6, это позволяет разметить в корпусе 1U до пяти плат. Кроме того, соединение плат осуществляется с помощью дополнительного 4х-точечного крепления, что в результате формирует защищенный от механических воздействий конструктив. Таким образом, за механическую прочность конструкции PC/104 отвечают и сами шинные разъемы, и 4х-точечное жёсткое крепление плат между собой. Система с такой конструкцией способна работать при высокой вибрации и ударных нагрузках.



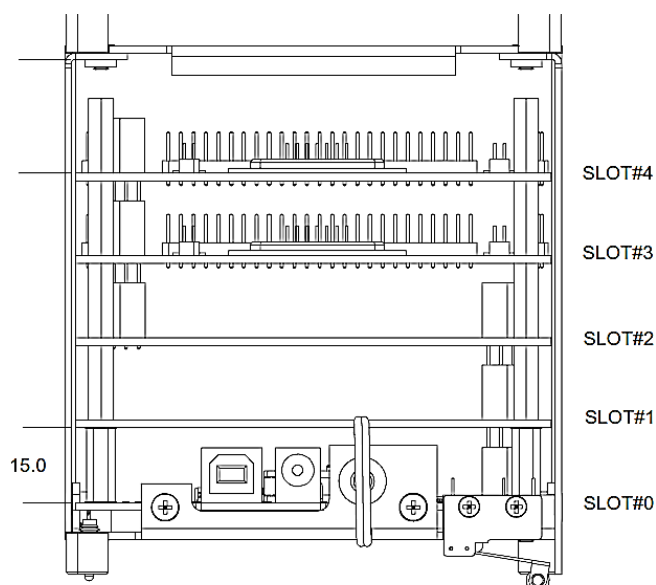


Рис. 6. Размещение плат PC/104-Plus внутри корпуса CubeSat  
(UM-3 Pumpkin CubeSat Kit User Manual)

Платы в формате PC/104, как правило, предназначенные для эксплуатации в расширенном температурном диапазоне от  $-50$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ .

#### *Контейнеры для транспортировки спутников CubeSat.*

Контейнер для разворачивания спутников P-POD является стандартом для транспортировки спутников CubeSat. Он может вместить в себя три стандартных модуля CubeSat 1U и служит интерфейсом между спутником и ракетоносителем. P-POD, представляет из себя контейнер с люком и пружинным механизмом (рис. 6, рис. 7). На боковых стенках контейнера P-POD располагаются люки для доступа к интерфейсам спутников уже загруженных в контейнер. Одним из путей открывания P-PODa, является сигнал, посылаемый с ракеты-носителя, торсионные пружины откидывают люк устройства и CubeSat выталкивается при помощи основной пружины скользя по направляющим. P-POD, совместим с любыми спутниками соответствующими спецификации CubeSat. Так же стоит отметить компанию ISIS выпускающую контейнеры ISIPOD, по мимо основной модификации 3U они выпускают контейнеры длиной от 0,5U до 5U, а также контейнеры размерами 6U [10].

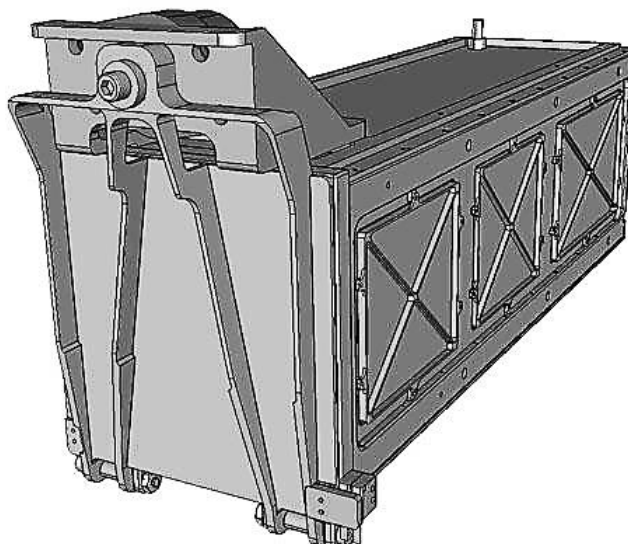


Рис. 7. Внешний вид контейнера P-POD (CubeSat Design Specification)

#### *Заключение.*

Использование форм-фактора CubeSat удобно для проектирования наноспутников. Не менее, чем относительно низкая стоимость, важен факт наличия стандартного интерфейса для установки в ракетоноситель P-PODa, а также возможность размещения внутри корпуса плат форм-фактора PC/104-Pluse.

#### *Список литературы*

1. Малые спутник // Википедия-свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Малые\\_спутники](http://ru.wikipedia.org/wiki/Малые_спутники) (дата обращения: 02.06.2016).
2. Puig-Suari J., Twiggs B., CubeSat Design Specification Rev. 13. Cal Poly SLO. – 2014. – 42 с.
3. Форм-фактор (техника) // Википедия-свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Форм-фактор\\_\(техника\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Форм-фактор_(техника)) (дата обращения: 02.06.2016).
4. Puig-Suari J., Twiggs B., CubeSat Design Specification Rev. 13. – С. 5.
5. Michael's List of Cubesat Satellite Missions // denMike's tiny page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mtech.dk/thomsen/index.php> (дата обращения: 02.06.2016).

6. Power Supply Unit // AAU CubeSat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.space.aau.dk/cubesat/psu.html> (дата обращения: 02.06.2016).
7. History & Performance of Pumpkin's Products in Space // CubeSat Kit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cubesatkit.com/content/space.html> (дата обращения: 02.06.2016).
8. Пятницких А. РС/104 – стандарт для жёстких условий эксплуатации. – СТА-Пресс: СТА №1, 2011. – С. 22–28.
9. РС/104-Pluse Specification v. 2.0. – 2003. – 28 с.
10. Launch Adapters // CubeSatShop [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cubesatshop.com/index.php?option=com\\_virtuemart&Itemid=73](http://www.cubesatshop.com/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=73) (дата обращения: 02.06.2016).