

**СТУДЕНЧЕСКАЯ ПИКОСПУТНИКОВАЯ ПЛАТФОРМА SIBQUBE:  
РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА КОРПУСА ПИКОСПУТНИКА КЛАССА ROCKETQUB**

А. П. Кравчуновский\*, М. Н. Драганюк, Д. М. Зуев, С. А. Скоробогатов, П. В. Мовчан

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

*Приведена концепция и некоторые результаты разработки студенческого космического аппарата (КА) стандарта RocketQub, а именно, разработан прототип корпуса студенческого пикоспутника SibQube. Представлены некоторые из существующих на данный момент стандартов сверхмалых КА (СМКА), их основные различия, заключающиеся прежде всего в массогабаритных характеристиках самого аппарата и выполняемых им задачах. Приведены цели создания платформы: использование в области образования, проведение научных экспериментов в космическом пространстве. Приведены основные ведущие факторы разработки и планируемый состав служебной платформы разрабатываемого СМКА. После проведения испытаний корпуса и дальнейшей его доработки становится возможным использование его в качестве основы для линейки корпусов СМКА, предназначенных для исследования малоизученных верхних слоев атмосферы и ближнего космоса. Спроектирован и изготовлен прототип корпуса КА. Описана конструкция корпуса разрабатываемого КА стандарта RocketQub и предназначение элементов конструкции и их функциональные особенности. Выбраны материалы для изготовления прототипа, и приведены основания их выбора. Также был проведен прочностной анализ конструкции корпуса, а именно: модальный анализ, направленный на поиск собственных частот конструкции, статический анализ на воздействие линейных перегрузок до 20 g, соответствующих линейным перегрузкам, возникающим при полете ракеты-носителя «Днепр», и динамический анализ случайных воздействий. На основании результатов анализа сделаны предварительные выводы о прочности и устойчивости конструкции при воздействии рассмотренных факторов.*

*Ключевые слова: космический аппарат, PocketQub, корпус, пикоспутник.*

*Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 580–584*

**STUDENT PICOSATELLITE PLATFORM SIBQUBE:  
DEVELOPMENT OF PROTOTYPE STRUCTURE OF POCKETQUB CLASS PICOSATELLITE**

A. P. Kravchunovsky\*, M. N. Draganyuk, D. M. Zuev, S. A. Skorobogatov, P. V. Movchan

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

*The article includes the conception and several results of the development of the PocketQub student spacecraft, namely the prototype of the student satellite SibQube is designed. In the article there are some midget spacecraft standards known for today, their main distinctions which are consisted in dimensions of the satellite and its tasks. The article defines the goals of the creation of the platform: its usage in the educational sphere and running experiments in the space area. This article presents the most major factors of developing and projected constitution of the service platform of the midget spacecraft. After testing the spacecraft body and its further modifications, it is possible to use it as the base for the range of midget spacecraft bodies intended for the researching of atmosphere top layers and near-the-earth space. We designed and produced the prototype of the spacecraft body. The article describes the body construction of developing PocketQub spacecraft and usage of the structure elements of the construction and their functioning particularities in it. We defined the materials for the model producing. Besides, the article describes reasons for their choice. In addition, we have made a strength analysis of satellite structure, namely mode identification analysis to find normal frequencies, static analysis of the effects of linear accelerations within limits of 20 g, appeared during the flight of the Dnepr launch vehicle, and dynamical analysis of random influences. Based on the results of the analysis preliminary conclusions were made about the construction strength and stability when the determinants discussed above influence.*

*Keywords: spacecraft, PocketQub, structure, picosatellite.*

**Введение.** В последние 10–20 лет в космической отрасли ярко выражена тенденция миниатюризации космических платформ.

Наиболее распространенным результатом миниатюризации является стандарт КА CubeSat. Стандарт регламентирует габариты КА на уровне  $10 \times 10 \times 10$  см, 1,3 кг (базовая единица 1U), форму корпуса и набор интерфейсов [1]. Данные КА запускаются с помощью пусковых контейнеров, размещенных в качестве попутной нагрузки на ракетах-носителях, тяжелых КА и международной космической станции. КА CubeSat изначально были задуманы для образовательных целей, но также приобрели популярность в качестве научного, коммерческого и популяризаторского инструмента.

Также были разработаны более миниатюрные стандарты КА: PocketQub ( $5 \times 5 \times 5$  см, 125 г) [2], FemtoSAT ( $3 \times 3 \times 3$  см, 35 г) [3] (рис. 1), а также спрайты (Sprites), чипсаты (ChipSat) [4], которые состоят из небольшой печатной платы, на которой присутствуют солнечные батареи, передатчик, процессор и некоторый набор простых датчиков. Обычно такие КА просто транслируют записанные сообщения.

**Стандарт PocketQub.** Данный стандарт регламентирует внешние габариты КА  $5 \times 5 \times 5$  см и массу 125 г, что соответствует формату 1р. Стандарт предусматривает различные компоновки от 1р до 8р. Существует возможность запуска КА данного класса с использованием уже существующих контейнеров для КА класса CubeSat. Кроме массогабаритного стандарта существует также стандарт PQ60 [7], который регламентирует размеры печатных плат, типы межплатных электроинформационных разъемов и их распиновку.

Изначально стандарт разрабатывался в рамках концепции 50\$Sat – низкобюджетных спутников для широкого доступа в космос. Стандарт был разработан профессором Бобом Твиггсом совместно с Государственным университетом Морхеда [8].

На данный момент запущено четыре космических аппарата подобного класса: \$50Sat [9], Wren [10], Qubescout S1 [11], T-LogoQube [12]. Данные КА были запущены в составе миссии UniSat-5 с использованием ракеты-носителя «Днепр» в ноябре 2013 г.

**Разрабатываемый сверхмалый космический аппарат SibQube.** В Сибирском государственном университете науки и технологий разрабатывается студенческая спутниковая платформа SibQube, отно-

сящаяся к классу пикоспутников (рис. 2). Внешний вид КА представлен на рис. 2, а.

Целью разработки является создание платформы-конструктора с низкой стоимостью для образовательных и научных целей. Основными потребителями будут являться научные организации, университеты, школы и организации дополнительного образования.

Платформа может быть применима для следующих задач:

- образовательные программы для студентов и школьников;
- выполнение технологических экспериментов;
- построение группировок КА для изучения параметров верхней атмосферы.

На данный момент стоит задача разработки служебной платформы. В базовом составе платформа должна включать в себя следующие системы: конструкции корпуса; механизм зачекочки антенн; бортовой комплекс управления; система электропитания; система приема и передачи данных (полнодуплексная); набор сенсоров.

В связи с малыми габаритами КА существует проблема энергообеспечения, связанная с малой площадью солнечных батарей. Таким образом, одним из важных факторов разработки является обеспечение высокого уровня энергосбережения. Другим важным фактором разработки является обеспечение итоговой низкой стоимости платформы, чтобы сделать ее доступной широкому кругу потребителей [13].

**Конструкции корпуса.** Корпус представляет собой сборную алюминиевую конструкцию (с возможностью масштабирования до размеров 2р, 3р без принципиальных изменений в конструкции). Конструкционная целостность достигается за счет винтового соединения. В качестве материала был выбран сплав Д16, так как он имеет подходящие механические свойства. В конструкции корпуса используются гнутые детали из листового металла из-за низкой стоимости производства и особенностей сборки (рис. 2, б) [14]. Основой корпуса служит стандартизированная алюминиевая пластина Base plate. Она удерживает КА в пусковом контейнере, а также обеспечивает возможность перемещения КА по направляющим в контейнере при выведении аппарата из контейнера. Микропереключатели обеспечивают переход КА из спящего в активный режим при выходе аппарата из контейнера.

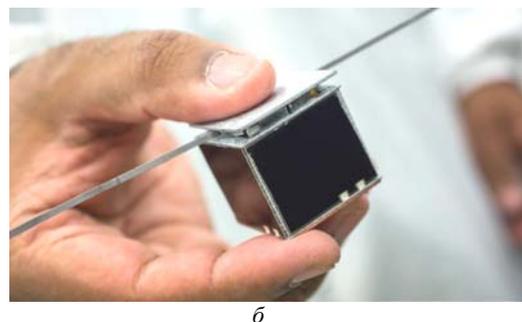
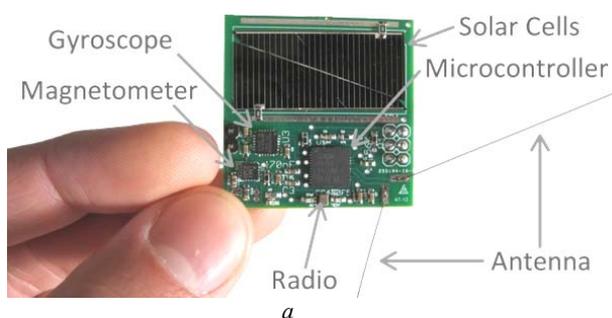


Рис. 1. Устройство космического аппарата: а – класса KickSat [5]; б – стандарта FemtoSAT [6]

Fig. 1. Structure of spacecraft: а – KickSat class [5]; б – FemtoSAT standard [6]

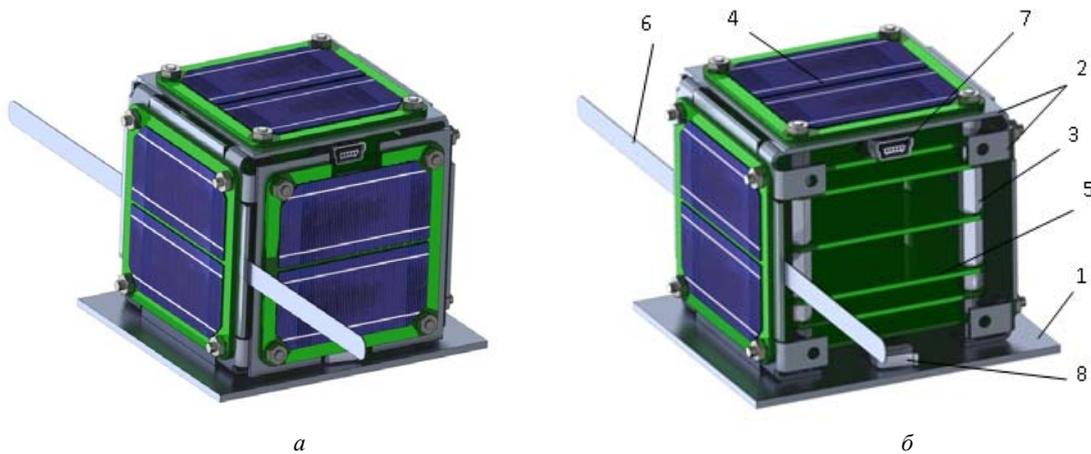


Рис. 2. Космический аппарат стандарта PocketQub: *а* – внешний вид; *б* – устройство: 1 – Base plate; 2 – стенки корпуса; 3 – межплатные стойки; 4 – фотоэлемент; 5 – плата радиоэлектронного модуля; 6 – антенна; 7 – сервисный разъем; 8 – микропереключатель

Fig. 2. PocketQub standard spacecraft: *a* – exterior view; *b* – structure: 1 – Base plate; 2 – sides of a body; 3 – interplane legs; 4 – photocell; 5 – board of electronic module; 6 – antenna; 7 – service connector; 8 – microswitch

Электронно-технический модуль принципиально представляет собой совокупность печатных плат, разделенных межплатными стойками. Печатные платы связаны между собой электроинформационными межплатными соединениями. Таким образом, платы внутри КА организованы в структуру типа «стэк». КА предполагается оборудовать набором внешних сервисных информационных и электрических интерфейсов для обеспечения возможности внесения поправок в структуру программного обеспечения аппарата, зарядки аккумуляторных батарей.

Изготовленный прототип корпуса представлен на рис. 3. Описанная конструкция полученного прототипа имеет массу 97 г. На данном этапе был изготовлен технологический прототип, задачей которого было подтвердить конструкционные решения, задача максимального облегчения корпуса аппарата не ставилась. Выполнение в стенках вырезов позволит снизить массу деталей корпуса до 20 %.

**Анализ конструкции.** Расчет для проверки прочности и устойчивости конструкции проводился в конечно-элементном пакете Ansys с использованием модулей Ansys Workbench, Ansys Design Modeller и Ansys Mechanical.

Каждой детали был присвоен материал с уникальными физико-механическими свойствами. Материал платы – текстолит. Материал шпилек – латунь. Материал батарей – кремний.

Граничные условия для анализа соответствуют данным по выведению на орбиту ракеты-носителя (РН) «Днепр» [15].

Был проведен статический анализ на воздействие линейных перегрузок до 20 g; модальный анализ на собственные частоты, динамический анализ случайных воздействий. Анализ на воздействие линейных перегрузок по всем трем осям до 20 g проводился в трех вариантах:

- 1) продольное направление ускорения;
- 2) поперечное направление ускорения;
- 3) направление ускорения под углом в 45° ко всем трем плоскостям.

Граничными условиями для каждого варианта анализа являются ускорение перегрузки и ускорение свободного падения.

Фиксированная геометрия применяется для фиксации модели от свободного перемещения по всем трем осям. Фиксация применяется на крайней грани Base plate (спутник упирается ей в направляющие контейнера).

На основе проведенных расчетов установлено, что при заданных условиях линейных перегрузок конструкция выдерживает нагрузки. Максимальное напряжение, наблюдаемое в модели, не превышает 3,1 МПа. В местах наибольшей концентрации напряжений максимальные напряжения для всех элементов конструкции значительно меньше предела текучести. Это способствует высокому коэффициенту запаса прочности.

Перед проведением анализа на случайную вибрацию необходимо провести модальный анализ на поиск собственных частот. Поиск собственных частот осуществлялся в диапазоне от 0 до 2000 Гц.

Деформации при собственных частотах возникают исключительно в печатных платах электронно-технического модуля.

Результаты модального анализа представлены в табл. 1. На основе модального анализа был проведен анализ на случайные воздействия. В расчет была введена спектральная плотность виброускорений в зависимости от частоты, эквивалентная вибрационным нагрузкам при полете РН «Днепр».

Было рассмотрено два расчетных случая:

- 1) нагружение по продольной оси;
- 2) нагружение по поперечной оси.

Результаты представлены в табл. 2.

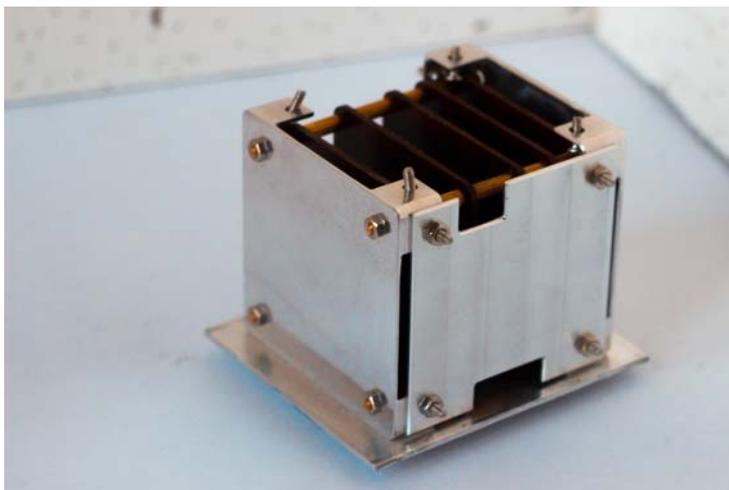


Рис. 3. Фотография полученного прототипа корпуса

Fig. 3. Photo of the structure of the prototype produced

Таблица 1

**Моды собственных частот КА**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота, Гц	865,8	867,2	874,1	879,3	880,9	1435,3	1436,6	1438,3	1441,4
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Частота, Гц	1445,2	1454,8	1456,2	1456,5	1459,1	1467,8	1485,2	1488,1	1552,5

Таблица 2

**Результаты динамического анализа случайных воздействий**

Масштаб	1 $\sigma$	2 $\sigma$	3 $\sigma$
Вероятность возникновения, %	68,269	95,45	99,73
Эквивалентное напряжение, МПа	2,637	5,275	7,912

Так как случайная вибрация является величиной неявно заданной, можно лишь определить вероятность возникновения определенной нагрузки в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц. Используется статистический анализ, определяющий вероятность появления той или иной амплитуды искомого параметра. Результаты исследований распределяются по нормальному закону.

По результатам проведенных анализов установлено, что конструкция не имеет собственных частот в низкочастотном диапазоне (резонанс возможен при частотах выше 850 Гц). Первая собственная частота наблюдаются при 870 Гц, вторая – при 1450 Гц. Это удовлетворяет заявленным требованиям, что собственные частоты конструкции не должны быть меньше 10–20 Гц. Наиболее высокие показатели спектральной плотности мощности напряжения наблюдаются на второй собственной частоте (1465 Гц), т. е. при данной частоте возникают самые высокие нагрузки.

Однако максимальное возможное напряжение не превышает 8 МПа, что значительно меньше пределов текучести материалов (в среднем около 100–200 МПа для алюминиевых сплавов). Это способствует высокому коэффициенту запаса прочности. Разработанная конструкция удовлетворяет заявленным требованиям.

**Заключение.** В статье были рассмотрены некоторые стандарты пико- и наноспутников. Приведена

концепция и результаты текущей итерации разработки корпуса пикоспутника SibQube, разрабатываемого в СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

Разработанный и изготовленный прототип корпуса СМКА стандарта PocketQub позволяет отработать технологию производства и сборки такого типа корпуса. В ходе сборки модели выявлено, что конструкция отдельных узлов не удовлетворяет поставленным эргономическим требованиям простоты конструкции и легкости сборки. Таким образом, конструкция требует доработок, направленных на общее облегчение процесса сборки и наземного обслуживания аппарата, а также достижение минимальной массы при сохранении прочностных характеристик.

В результате проведенного расчета конструкции было выявлено, что конструкция удовлетворяет заявленным требованиям на прочность и устойчивость.

**Благодарности.** Выражаем благодарность Аэрокосмическому колледжу СибГАУ и ресурсному центру коллективного пользования «Космические аппараты и системы» за помощь в изготовлении деталей прототипа.

**Acknowledgments.** We express our gratitude to the Aerospace College of SibSAU and the Resource center for collective use “Space vehicles and systems” for their assistance in the manufacture of prototype parts.

## Библиографические ссылки

## References

1. CubeSat Design Specification: стандарт по CubeSat, версия 13 от 20.02.2014 г. [Электронный ресурс]. URL: [https://2.cubesat.org/images/developers/cds\\_rev13\\_final2.pdf](https://2.cubesat.org/images/developers/cds_rev13_final2.pdf) (дата обращения: 18.11.2016).
2. The PocketQub Standard [Электронный ресурс]. URL: <http://pocketqub.org/standard/> (дата обращения: 15.10.2015).
3. SunCube FemtoSat Standard [Электронный ресурс]. URL: <http://suncube.asu.edu/> (дата обращения: 21.11.2016).
4. A Survey of Current Femtosatellite Designs, Technologies, and Mission Concepts [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jossonline.com/wp-content/uploads/2016/10/Perez-Final-A-Survey-of-Current-Femtosatellite-Designs-Technologies-and-Mission-Concepts1.pdf> (дата обращения: 21.11.2016).
5. Mass Launch of 437 MHz Satellites [Электронный ресурс]. URL: <https://amsat-uk.org/2014/03/03/mass-launch-of-437-mhz-satellites/> (дата обращения: 25.11.2016).
6. ASU: Arizona State University [Электронный ресурс]. URL: <https://asunow.asu.edu/20160406-creativity-asu-suncube-femtosat-space-exploration-for-everyone> (дата обращения: 25.11.2016).
7. PQ60 standart. An electrical standard for PocketQubes [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pq60.info/> (дата обращения: 20.11.2016).
8. Making it small [Электронный ресурс]. URL: [http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/DevelopersWorkshop2009/1\\_Twiggs-PocketQub.pdf](http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/DevelopersWorkshop2009/1_Twiggs-PocketQub.pdf) (дата обращения: 20.11.2016).
9. \$50SAT – Eagle2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.50dollarsat.info/> (дата обращения: 20.11.2016).
10. Gunter’s Space Page, Wren [Электронный ресурс]. URL: [http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/wren.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/wren.htm) (дата обращения: 20.11.2016).
11. Gunter’s Space Page, QubeScout S1 [Электронный ресурс]. URL: [http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/qubescout-s1.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/qubescout-s1.htm) (дата обращения: 20.11.2016).
12. T-LogoQube [Электронный ресурс] URL: <https://universe.sonoma.edu/T-LogoQube/?q=public> (дата обращения: 20.11.2016).
13. Концепция студенческой пикоспутниковой платформы SibQube / Д. М. Зуев [и др.] // Решетневские чтения : материалы XX юбилейной Междунар. науч. конф. (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск). В 2 ч. Ч. 1. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 622–623.
14. Марковцев В. А., Филимонов В. И. Ресурсосберегающие технологии и оборудование для производства профилей и гофрированных панелей // Формообразование гнутых профилей: теория и практика : сб. науч. тр. / под науч. ред. д-ра техн. наук, профессора В. И. Филимонова. Ульяновск : УлГТУ, 2011. С. 146–153.
15. Dnepr User’s Guide [Электронный ресурс]. URL: [http://www.kosmotras.en/docs\\_mkk/](http://www.kosmotras.en/docs_mkk/) (дата обращения: 14.8.2016).

1. *Standart po CubeSAT “CubeSat Design Specification”* [CubeSat standard “CubeSat Design Specification”]. California, USA, ver. 13, 20.02.2014. Available at: [http://2.cubesat.org/images/developers/cds\\_rev13\\_final.pdf](http://2.cubesat.org/images/developers/cds_rev13_final.pdf) (accessed: 18.11.2016).
2. The PocketQub Standard. Available at: <http://pocketqub.org/standard/> (accessed: 15.10.2015).
3. SunCube FemtoSat Standard. Available at: <http://suncube.asu.edu/> (accessed: 21.11.2016).
4. A Survey of Current Femtosatellite Designs, Technologies, and Mission Concepts. Available at: <http://www.jossonline.com/wp-content/uploads/2016/10/Perez-Final-A-Survey-of-Current-Femtosatellite-Designs-Technologies-and-Mission-Concepts1.pdf> (accessed: 21.11.2016).
5. Mass Launch of 437 MHz Satellites. Available at: <https://amsat-uk.org/2014/03/03/mass-launch-of-437-mhz-satellites/> (accessed: 25.11.2016).
6. ASU: Arizona State University. Available at: <https://asunow.asu.edu/20160406-creativity-asu-suncube-femtosat-space-exploration-for-everyone> (accessed: 25.11.2016).
7. PQ60 standart. An electrical standard for PocketQubes. Available at: <http://www.pq60.info/> (accessed: 20.11.2016).
8. Making it small. Available at: [http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/DevelopersWorkshop2009/1\\_Twiggs-PocketQub.pdf](http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/DevelopersWorkshop2009/1_Twiggs-PocketQub.pdf) (accessed: 20.11.2016).
9. \$50SAT – Eagle2. Available at: <http://www.50dollarsat.info/> (accessed: 20.11.2016).
10. Gunter’s Space Page, Wren. Available at: [http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/wren.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/wren.htm) (accessed: 20.11.2016).
11. Gunter’s Space Page, QubeScout S1. Available at: [http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/qubescout-s1.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/qubescout-s1.htm) (accessed: 20.11.2016).
12. T-LogoQube. Available at: <https://universe.sonoma.edu/T-LogoQube/?q=public> (accessed: 20.11.2016).
13. Zuev D. M., Kravchunovsky A. P., Lapaev K. A., Skorobogatov S. A., Kostyukov A. S. [Concept of “SibQube” student satellite bus]. *Materialy XX Yubileynoy mezhdunar. nauch.konf. “Reshetnevskie chteniya”* [Materials XX Anniversary Intern. Scientific. Conf. “Reshetnev readings”]. Krasnoyarsk, 2016, P. 622–623 (In Russ.).
14. Markovtsev V. A., Filimonov V. I. [Efficient technologies and equipment for profiles and corrugated plates]. *Formoobrazovanie gnutykh profiley: teoriya i praktika* [Shaping of bent profiles: theory and practice]. Ul’yanovsk, UIGTU Publ., 2011, P. 146–153.
15. Dnepr User’s Guide. Available at: [http://www.kosmotras.en/docs\\_mkk/](http://www.kosmotras.en/docs_mkk/) (accessed: 14.8.2016).