

УДК 629.7.023.222:535.23

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ С РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ И РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТОЙ НА БОРТУ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© Даниленко Е.Г., Зуев Д.М., Телегин С.В.

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика  
М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация*

e-mail: evg.danilenko@mail.ru

Тематика разработки методов радиационной защиты для малых космических аппаратов весьма актуальна в связи с широким использованием в них элементной базы коммерческого класса. Использование электроники космического класса в МКА считается нецелесообразным, поскольку имеет стоимость на несколько порядков большую, нежели те же самые компоненты коммерческого уровня. Также космическая электроника обычно отличается куда большим энергопотреблением.

Проблемы радиационной защиты могут решаться несколькими методами:

1) Использование элементной базы космического класса. Данный путь оправдан в случае межпланетных миссий. В связи с философией малых космических аппаратов (SmallSat philosophy) и общей тенденцией на производство недорогих космических платформ разработчики максимально широко используют электронную базу коммерческого уровня и коробочные решения (COTS-компоненты);

2) использование различного рода программных и схемотехнических решений;

3) Разработка методов и материалов для создания легкой и эффективной радиационной защиты, также желательно обеспечить ее низкую стоимость.

За последние 15 лет среди наноспутников можно насчитать около 50 миссий, которые так или иначе (в качестве основной или вторичной цели миссии) связаны с радиационной обстановкой на околоземной орбите. Данные миссии можно разделить на три условных группы:

1. Измерения радиационной дозы / радиационного фона.

2. Испытания элементной базы и исследование ее деградации под воздействием ионизирующих излучений.

3. Испытания радиационно-защитных материалов.

В первом случае кубсаты несут различные дозиметры как на базе RADFET технологий, так и на базе классических счетчиков Гейгера.

AeroCube 8 (4 аппарата A,B,C,D, также известен как IMPACT) на борту испытывал радиационно-защитный материал на базе CNT/PEEK (Poly-ether-ether-ketone с добавлением углеродных нанотрубок). Миссия Oufi-2, планируемую к запуску в 2021 году, в качестве дополнительной полезной нагрузки готовит эксперимент по проверке эффективности многослойного слоистого покрытия на базе смол с добавками (неизвестно какими) и сплава вольфрама [1]. На аппарате PТecSat (статус миссии отменен) планировалось использовать танталовую фольгу в целях радиационной защиты.

Аппарат DODONA (запуск планируется в 2021 году) должен провести демонстрацию технологии VSRS (Versatile Structural Radiation Shielding – универсальная структурная радиационная защита). Данный тип защиты предназначен для экранирования от протонов и электронов. В данном случае аддитивными методами печатается многослойный экран (на основе полимера PEEK с добавками вольфрама в

некоторых слоях), повторяющий контур платы. Симуляция и эксперименты показали на 50-250 % лучшее поглощение радиационного экрана по технологии VSRS над алюминиевым барьером [2]. Также данная исследовательская группа работает над экранами S-MLI (Structural Multi-Layer Insulation) – многослойным экраном, который предназначен также для выполнения структурных функций – несения нагрузки, будучи использованным в качестве конструкционного материала. Суть экрана – это набор тонких пластин, покрытых слоем металла гальваническим путем. Пластины разделены «распорками» для обеспечения также термальной изоляции. Предполагается изготовление данной структуры путем аддитивных технологий [2].

Миссия Shields-1 (NASA, Langley) [3] предназначена для технологической демонстрации экранов Atomic Number (Z)-Grade Radiation shields (формуемые щиты – shapeable shields) на основе металловолоконных ламинатов. Для щита используется гибридная ткань (углеволокно/металловолокно), которая покрывается слоями металлических материалов с различными атомными номерами для защиты от протонов, электронов и рентгеновского излучения (x-ray). Для создания данных слоев металлы с высокой плотностью наносятся с помощью плазменного напыления на углеволокно. Следующим слоем наносится (также плазменным напылением) более легкий металл и так далее, пока не будет получен материал с нужными свойствами. Смолы могут быть добавлены к материалу для обеспечения структурной адгезии, уменьшая необходимость в механическом соединении.

Этот материал поддается формованию и может быть использован для создания индивидуальной защиты от излучения для защиты кабелей и электроники в ситуациях, когда традиционное металлическое экранирование трудно разместить. В статье [3] приводятся данные моделирования – цифры до 30 % для такого экрана Al/Ta по сравнению с алюминием.

В [4] описан «осторожный подход к использованию COTS-компонентов» в космических аппаратах. Статья содержит информацию о методах расчета, наземного тестирования и о дозе допустимой для некоторых радиокомпонентов.

В [5] приведено описание разработанного детектора TID. В работе проведена симуляция для использования на фазе проектирования. Была проведена оценка зафиксированной TID на детекторах в случаях их защиты следующими вариантами экранов: Polymethyl methacrylate (PMMA), SiO<sub>2</sub>, Aluminum (Al), и Lead (Pb). Симуляция на орбиты 800 км.

#### **Другие миссии:**

SACRED (Study on the Action of the Cosmic Rays on Electronic Devices) проект – изучить влияние радиации на некоторые COTS-радиокомпоненты. Проект был в интересах Alcatel Space Industries. Радиация измерялась OSL-детектором [6].

Aalto-1 – измерение интегральной интенсивности протонов и электронов на низкой околоземной орбите [7].

Лабораторное исследование в работе [8] посвящено проверке радиационной стойкости распространенных на кубсатах микроконтроллеров и микропроцессоров. В рамках программы NEPP (NASA Electronic Parts and Packaging) было проведено это исследование.

В статье [9] описан метод повышения радиационной стойкости бортовых электронных систем на схемотехническом и программном уровне.

В [10] рекомендовано использовать в космосе FRAM-память, не восприимчивую к радиационным одиночным эффектам.

В работе [11] проведен эксперимент для подтверждения результатов моделирования ПО MULASSIS. Результаты моделирования очень хорошо сравниваются с экспериментальным результатом в пределах 7 % для протонов и 2–74 %

(более низкие значения для толщины экрана менее 10 мм) для электронов, что подтверждает правильность программного обеспечения и его применимость для проектирования радиационных экранов. Эксперимент проводился на 10 МэВ электронном ускорителе и 70 МэВ протонном ускорителе. Материалы тестировались: Aluminum (Al с плотностью 2,71 г/см<sup>3</sup>), Polyethylene (PE с плотностью 0,94 г/см<sup>3</sup>) и Carbon Fiber Reinforced Epoxy Compos- ite laminate (CFC с плотностью 1,5 г/см<sup>3</sup>).

Данная проблема защиты электронной базы от радиационных воздействий до сих пор не решена.

### **Библиографический список**

1. Guillaume T. OUFTI-2 educational CubeSat project of University of Liège , Belgium OUFTI-2 educational CubeSat project of University of Liège. Belgium, 2017. № May.
2. Wrobel J. [et al.]. Versatile Structural Radiation Shielding and Thermal Insulation Through Additive Manufacturing // 27th Annu. AIAA/USU Conf. Small Satell. 2013. P. 1–9.
3. Thomsen III D.L., Kim W., Cutler J.W. Shields-1, A SmallSat Radiation Shielding Technology Demonstration // 29th Annu. AIAA/USU Conf. Small Satell. 2015. P. 1–7.
4. Sinclair D., Dyer J. Radiation Effects and COTS Parts in SmallSats // 27th Annu. AIAA/USU Conf. Small Satell. 2013. P. 1–12.
5. Kocaman B. [et al.]. Total ionizing dose analysis of a native detector and a satellite on orbit // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2178, № November.
6. Dusseau L. [et al.]. CUBE SAT SACRED: A student project to investigate radiation effects // Proc. Eur. Conf. Radiat. its Eff. Components Syst. RADECS. 2005. P. 3–6.
7. Gieseler J. [et al.]. Radiation monitor RADMON aboard Aalto-1 CubeSat: First results // Adv. Sp. Res. 2020. Vol. 66, № 1. P. 52–65.
8. Guertin S.M., Amrbar M., Vartanian S. Radiation test results for common CubeSat microcontrollers and microprocessors // IEEE Radiat. Eff. Data Work. 2015. Vol. 2015-Novem.
9. Yuen B., Sima M. Low Cost Radiation Hardened Software and Hardware Implementation for CubeSats // Arbutus Rev. 2018. Vol. 9, № 1. P. 46–62.
10. Austin R.A. [et al.]. A CubeSat-payload radiation-reliability assurance case using goal structuring notation // Proc. – Annu. Reliab. Maintainab. Symp. 2017.
11. Emmanuel A., Raghavan J. Experimental validation of simulations of radiation shielding effectiveness of materials by MULASSIS // Adv. Sp. Res. COSPAR, 2016. Vol. 58, № 11. P. 2376–2384.