

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОРПУСОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ

А.С. Якушевич<sup>1)</sup>, Ю.В. Богатырев<sup>1)</sup>, Н.А. Василенков<sup>2)</sup>, С.Б. Ластовский<sup>1)</sup>,  
С.С. Грабчиков<sup>1)</sup>, Г.А. Протопопов<sup>3)</sup>, А.Е. Козюков<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки 19,  
220072 Минск, Беларусь, yakushevich@ifftp.bas-net.by, bogat@ifftp.bas-net.by,  
lastov@ifftp.bas-net.by, gss@physics.by

<sup>2)</sup>АО «ТЕСТПРИБОР», ул. Планерная 7а, 125480 Москва, Россия, tp@test-expert.ru

<sup>3)</sup>Филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического  
приборостроения», ул. Авиамоторная 53, 111250 Москва, Россия, nkp1@niikp.org

Методом Монте-Карло определена эффективность снижения уровня поглощенной дозы в кристалле активного элемента с помощью экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах при воздействии протонов радиационных поясов Земли. Показано, что использование специализированных корпусов с интегрированными экранами на низкой круговой орбите лишь в незначительной мере снижает дозовую нагрузку. Однако на средней круговой орбите величина поглощенной дозы может быть уменьшена более чем в 2 раза.

**Ключевые слова:** радиационный экран; композит W-Cu; протоны; метод Монте-Карло.

## EFFICIENCY OF THE USE OF SPECIALIZED METAL PACKAGES FOR PROTECTION OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES FROM IMPACT OF PROTONS OF THE EARTH RADIATION BELTS

H.S. Yakushevich<sup>1)</sup>, Y.V. Bogatyrev<sup>1)</sup>, N.A. Vasilenkov<sup>2)</sup>, S.B. Lastovskii<sup>1)</sup>,  
S.S. Grabchikov<sup>1)</sup>, G.A. Protopopov<sup>3)</sup>, A.E. Koziukov<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,  
19 P. Brovka Str., 220072 Minsk, Belarus,

yakushevich@ifftp.bas-net.by, bogat@ifftp.bas-net.by, lastov@ifftp.bas-net.by, gss@physics.by

<sup>2)</sup>JSC «TESTPRIBOR», 7a Planernaya Str., 125480 Moscow, Russia, tp@test-expert.ru

<sup>3)</sup>Branch of JSC United Rocket Space Corporation – Institute of Space Device Engineering,  
53 Aviamotornaya Str., 111250 Moscow, Russia, nkp1@niikp.org

Efficiency of specialized metal packages of the radio-electronic equipment with integrated local radiation protection shields (LRPS) based on the composite W-Cu for protection from the impact of protons of the Earth radiation belts has been considered. The efficiency of reducing the level of the absorbed dose by a crystal of an active element under the action of protons in two circular orbits was calculated by using the Monte Carlo method. The first orbit is a low Earth orbit (LEO) with an inclination angle of 60° and an altitude of 400 km, the second one is a middle Earth orbit (MEO) with an inclination angle of 30° and an altitude of 8000 km. The protons spectra at the minimum solar activity were obtained with OMERE 5.3 software. It was established that at low orbits the use of LRPS reduces the absorbed dose by only 1.1 times. At middle orbits an increase in the mass thickness of the package header up to 1.67 g / cm<sup>2</sup> by the use of LRPS allows to reduce the dose load by 1.6 times, an additional increase of the cover to the mass thickness of 1.67 g / cm<sup>2</sup> results in decreasing the absorbed dose by 2.2 times.

**Keywords:** radiation shield; W-Cu composite; protons; Monte-Carlo method.

### Введение

В современной авиакосмической технике широко применяются металлические

корпуса радиоэлектронных средств (РЭС) четвертого поколения [1]. Они представляют собой металлический корпус-экран,

герметизируемый либо по торцам, либо по верхней крышке. Внутри корпуса располагаются одна или более плат, на которых смонтированы кристаллы активных элементов по бескорпусной технологии. В условиях минимальной конструкционной защиты космических аппаратов одной из функций корпусов становится защита активных электронных компонентов от ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства. Поэтому в металлические корпуса часто интегрируют экраны локальной радиационной защиты (ЭЛРЗ) [2–4]. ЭЛРЗ изготавливают на основе материалов с большим порядковым номером и высокой плотностью (W, Ta, композит W-Cu и др.), что позволяет при незначительных изменениях конструкции и габаритных размеров существенно повысить защитные функции корпуса интегральных микросхем.

Цель данной работы – расчетными методами определить эффективность снижения уровня поглощенной дозы в кристаллах активных элементов с помощью ЭЛРЗ на основе композита W-Cu в специализированных металлических корпусах РЭС при воздействии протонов радиационных поясов Земли (РПЗ).

### Методика

В качестве активного элемента рассматривался кристалл кремния размером  $0.90 \times 0.90 \times 0.24$  мм, смонтированный по бескорпусной технологии в центральной области коммутационной платы размером  $10.5 \times 11.5$  мм. Плата размещалась в металлическом корпусе пенального типа, герметизируемом по верхней крышке. Внутренние размеры нижнего и верхнего (крышки) оснований корпуса соответствуют размерам платы. Исследовались три типа корпусов: стандартный корпус без экранов радиационной защиты (I), специализированный корпус со встроенными ЭЛРЗ в основание (II) и специализированный корпус со встроенными ЭЛРЗ в основание и крышку (III).

Боковые стенки всех корпусов изготовлены из сплава НК29 (ковар; плотность  $8.4 \text{ г/см}^3$ ) толщиной 1.2 мм (массовой толщиной  $1.0 \text{ г/см}^2$ ). Высота боковых стенок для корпуса I составляла 8.3 мм, для II и III – 7.7 мм. У корпуса I крышка и нижнее основание также изготовлены из сплава НК29 толщиной 0.7 мм ( $0.59 \text{ г/см}^2$ ) и 1.0 мм ( $0.84 \text{ г/см}^2$ ) соответственно.

Для основания корпусов II и III проведено усиление защиты: основание состоит из слоя композита W-Cu ( $16.5 \text{ г/см}^3$ ) толщиной 0.8 мм между двумя слоями меди по 0.2 мм толщиной для повышения теплоотводящих свойств. То есть общая толщина основания обоих корпусов с ЭЛРЗ равна 1.2 мм, а суммарная массовая толщина –  $1.67 \text{ г/см}^2$ .

Крышки корпусов II и III изготовлены из ковара толщиной 0.9 мм ( $0.76 \text{ г/см}^2$ ). Однако крышка корпуса III с внутренней стороны усилена дополнительным слоем композита W-Cu толщиной 0.55 мм до суммарной массовой толщины основания, а именно до  $1.67 \text{ г/см}^2$ .

Таким образом, внешние габариты корпуса I составляют  $13.9 \times 12.9 \times 10.0$  мм, а корпусов II и III –  $13.9 \times 12.9 \times 9.8$  мм.

Заметим, что коммутационная плата в весьма незначительной степени ослабляет поток ИИ по сравнению с основанием и другими стенками корпуса, и поэтому она была исключена из расчетной модели. То есть кристалл кремния расположен просто на основании корпуса.

Поглощенная доза  $D(E)$  в кристалле активного компонента при воздействии протонов РПЗ на корпуса в целом и их отдельные элементы (основание, боковые стенки и крышка) рассчитывалась с помощью программного комплекса Geant4. Далее оценивалась суммарная накопленная доза  $D_{sum}$  по формуле [5]:

$$D_{sum} = \int \frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E) dE \quad (1)$$

где  $\varphi(E)$  – дифференциальный спектр протонов;  $\frac{D(E)}{\Phi}$  – поглощенная доза на единичный флюенс, для определения которой

корпуса помещались в изотропное поле протонного излучения с флюенсом  $\Phi = 1.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ .

Эффективность ЭЛРЗ при воздействии протонов  $K_{\text{эфф}}$  находилась из отношения:

$$K_{\text{эфф}} = D_1 / D_{\text{sh}}, \quad (2)$$

где  $D_1$  – суммарная накопленная доза кристаллом кремния в корпусе I, а  $D_{\text{sh}}$  – суммарная накопленная доза в корпусах с ЭЛРЗ типа II или III.

Расчеты проводились при минимуме солнечной активности для двух орбит: низкой круговой орбиты с параметрами  $H = 400 \text{ км}$ ,  $i = 60^\circ$  (НКО) и средней круговой орбиты с параметрами  $H = 8000 \text{ км}$ ,  $i = 30^\circ$  (СКО). Дифференциальные спектры протонов  $\varphi(E)$  были получены с помощью программы OMERE 5.3 и представлены на рис. 1.

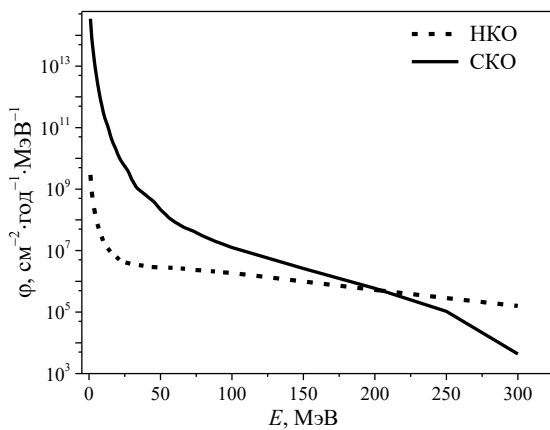


Рис. 1. Дифференциальные спектры протонов  
 Fig. 1. Differential proton spectra

Отметим, что здесь будет рассматриваться величина накопленной дозы только от первичных протонов, так как согласно результатам моделирования, вклад в поглощенную дозу от вторичного излучения для описанных выше орбит не превышает 2,5%.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости подынтегрального выражения  $\frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E)$  из (1) от энергии протонов НКО, попадающих в кристалл кремния через крышку, боковые стенки и основание корпуса по отдельности и через корпус в

целом. Для протонов СКО такие же зависимости приведены на рис. 3. Для каждого элемента корпуса на полученных зависимостях характерен максимум (рис. 2 и рис. 3), что обусловлено особенностью взаимодействия протонов с веществом.

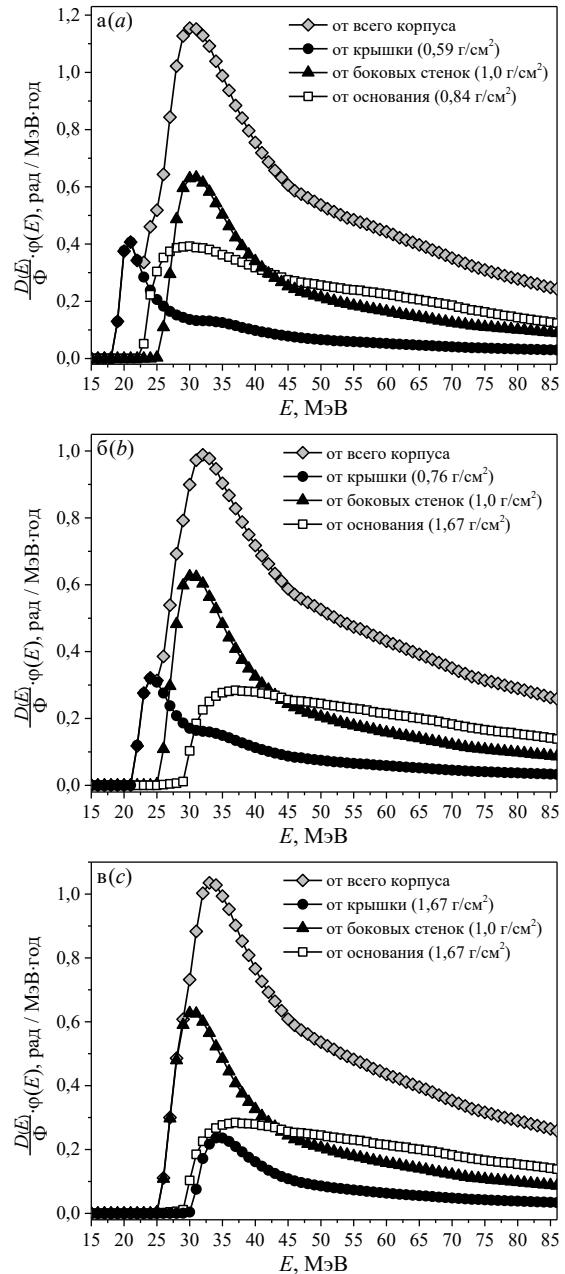


Рис. 2. Зависимости  $\frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E)$  на НКО: а – для корпуса I и его элементов; б – для корпуса II и его элементов; в – для корпуса III и его элементов  
 Fig. 2.  $\frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E)$  dependencies at LEO: а – for the package I and its parts; б – for the package II and its parts; в – for the package III and its parts

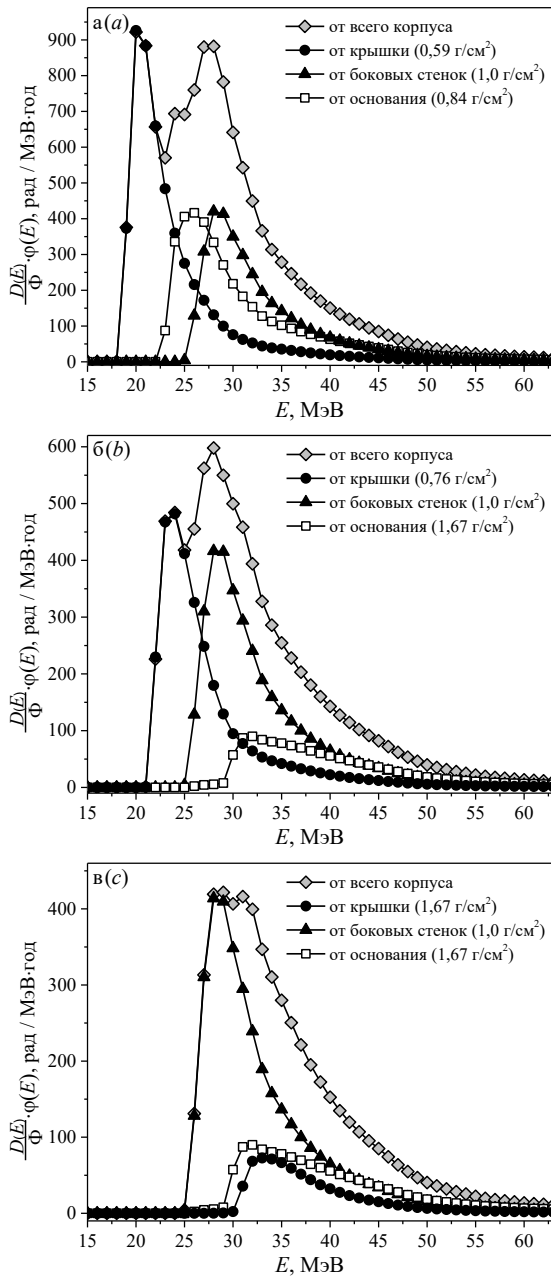


Рис.3. Зависимости  $\frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E)$  на СКО: а – для корпуса I и его элементов; б – для корпуса II и его элементов; в – для корпуса III и его элементов

Fig. 3.  $\frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E)$  dependencies at MEO: a – for the package I and its parts; b – for the package II and its parts; c – for the package III and its parts

Положение максимума в первую очередь определяется массовой толщиной элемента: чем она больше, тем в более высокоэнергетической области лежит пик. Отметим, что у корпуса III массовые толщины крышки и основания совпадают, однако на одной и той же орбите для этих

элементов корпуса зависимости  $\frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E)$  имеют разную форму, и их максимумы приходятся на разные значения энергии (рис. 2в и рис. 3в). Это говорит о влиянии положения активного элемента относительно элемента корпуса на вид  $\frac{D(E)}{\Phi} \varphi(E)$ .

На разных орбитах данные зависимости также отличаются, так как в подынтегральное выражение входит дифференциальный спектр протонов  $\varphi(E)$ .

Вид исходного спектра протонов в значительной мере определяет величину поглощенной дозы в кристалле кремния: чем больше количество частиц в спектре, тем больше значение  $D_{sum}$ . Это подтверждается анализом результатов, представленных на рис. 4.

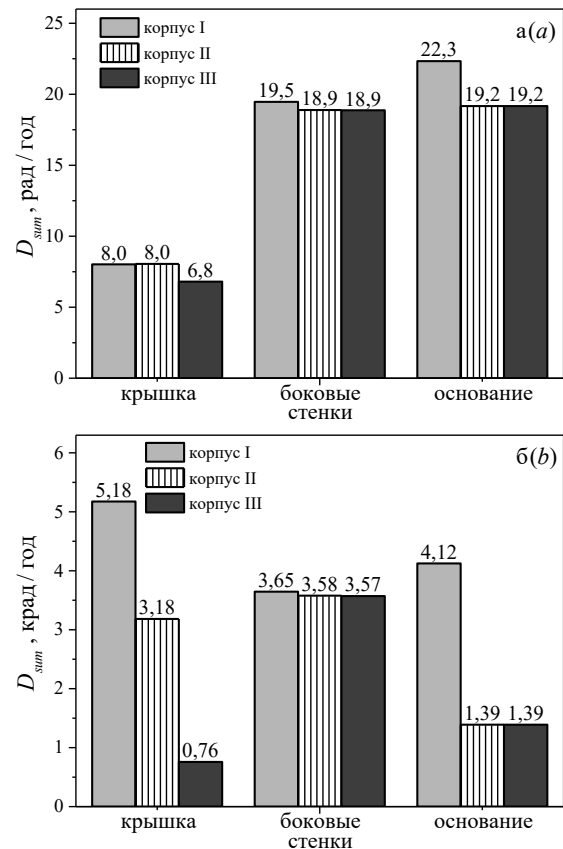


Рис. 4. Поглощенная доза через разные элементы корпусов: а – на НКО; б – на СКО

Fig. 4. Absorbed dose through different parts of the packages: a – at LEO; b – at MEO

На НКО увеличение массовой толщины крышки с  $0,59 \text{ г/см}^2$  до  $0,76 \text{ г/см}^2$  не изме-

няет величину накопленной дозы через данный элемент корпуса, а при увеличении до  $1.67 \text{ г/см}^2$  – доза уменьшается всего лишь в 1.2 раза (рис. 4а). Увеличение массовой толщины основания с  $0.84 \text{ г/см}^2$  до  $1.67 \text{ г/см}^2$  также приводит к уменьшению накопленной через основание дозы всего лишь в 1.2 раза (рис. 4а). В целом, применение специализированного корпуса II на низкой орбите уменьшает дозовую нагрузку с 49.8 рад/год до 46.1 рад/год, а корпуса III – с 49.8 рад/год до 45.9 рад/год, и эффективность ЭЛРЗ оказывается весьма незначительной (табл. 1).

В то же время на СКО увеличение массовой толщины крышки с  $0.59 \text{ г/см}^2$  до  $0.76 \text{ г/см}^2$  уменьшает накопленную через крышку дозу в 1.6 раз, а наращивание до  $1.67 \text{ г/см}^2$  – в 6.8 раз (рис. 4б). Усиление же массовой толщины основания до  $1.67 \text{ г/см}^2$  уменьшает накопленную через него дозу почти в 3.0 раза (рис. 4б). В итоге, корпус II позволяет снизить полную дозовую нагрузку с 12.9 крад/год до 8.2 крад/год, а эффективность одновременного применения ЭЛРЗ для крышки и основания в корпусе III составляет 2.2 раза (табл. 1).

Таблица 1. Суммарная поглощенная доза в корпусах и эффективность ЭЛРЗ  
 Table 1. Total absorbed dose in the packages and efficiency of the RLPS

Корпус	НКО		СКО	
	$D_{sum}$ , рад/год	$K_{эфф}$	$D_{sum}$ , крад/год	$K_{эфф}$
I	49.8	-	12.9	-
II	46.1	1.1	8.2	1.6
III	45.9	1.1	5.8	2.2

## Заключение

Показано, что на низких орбитах применение ЭЛРЗ, уменьшает величину поглощенной дозы лишь в 1.1 раз. Однако на средних орбитах специализированный корпус с интегрированным в основание ЭЛРЗ позволяет снизить дозовую нагрузку

в 1.6 раз. При этом для компонентов с недостаточным уровнем радиационной стойкости целесообразно применять дополнительные ЭЛРЗ со стороны элемента корпуса с наименьшей массовой толщиной (крышки).

## Библиографические ссылки

1. Белоусов Е.Л., Ушкар М.Н. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ; 2005. 237 с.
2. Василенков Н.А., Максимов А.Ю., Грабчиков С.С., Ластовский С.Б. Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники. *Технологии в электронной промышленности* 2015; (4): 87-90.
3. Spratt J.P., Passenheim B.C., Leadon R.E., Clark S., Strobel D.J. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 1997; 44(6): 2018-2025.
4. Ефремов Г.А., Епифановский И.С., Ширяев А.В., Заболотный В.Т., Милеев В.Н., Новиков Л.С. Новые материалы локальной радиационной защиты. *Физика и химия обработки материалов* 2003; (1): 34-37.
5. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. Москва: Радио и связь; 2004. 320 с.

## References

1. Belousov E.L., Ushkar M.N. Konstruirovaniye blokov bortovoy aviacionnoy apparatury svyazi [Design of aircraft communication equipment blocks]. Nizhniy Novgorod: NNSTU; 2005. 237 p. (In Russian).
2. Vasilenkov N.A., Grabchikov S.S., Maksimov A.Y., Lastovskiy S.B. Specializirovannyye radiacionno-zashchitnyye korpusa dlya izdelij mikroelektroniki [Specialized radiation-protective packages for microelectronics products]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* 2015; (4): 87-90. (In Russian).
3. Spratt J.P., Passenheim B.C., Leadon R.E., Clark S., Strobel D.J. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 1997; 44(6): 2018-2025.
4. Efremov G.A., Yepifanovskiy I.S., Shiryayev A.V., Zabolotnyy V.T., Mileyev V.N., Novikov L.S. Novyye materialy lokal'noy radiacionnoy zashchity [New materials of local radiation protection]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* 2003; (1): 34-37. (In Russian).
5. Chumakov A.I. Dejstvie kosmicheskoy radiatsii na integral'nye skhemy [The effect of cosmic radiation on integrated circuits]. Moscow: Radio i svyaz'; 2004. 320 p. (In Russian).