

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ КОРПУСА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Н. Василенков, А. Максимов, С. Грабчиков, С. Ластовский

В настоящее время весьма остро стоит задача обеспечения высоких показателей эксплуатационной надежности приборов и аппаратуры в условиях радиационного воздействия (электронов, протонов, тяжелых заряженных частиц, рентгеновского и гамма-излучения). Радиационная стойкость аппаратуры определяет срок ее активного использования и безотказной работы. Это особенно актуально для радиоэлектронных систем, входящих в состав бортовой аппаратуры космических аппаратов. Одно из перспективных направлений разработки радиационно-стойкой аппаратуры – применение методов локальной защиты, в частности, создание специальных корпусов с интегрированными в них радиационно-защитными экранами. Технология позволяет использовать кристаллы микросхем коммерческого и индустриального классов вместо радиационно-стойких чипов, что дает возможность снизить себестоимость бортового оборудования и расширить номенклатуру применяемых компонентов.

Для повышения радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры используют несколько подходов:

- **технологический** (применение специализированных технологических процессов и материалов при изготовлении интегральных микросхем (ИМС) и других компонентов бортовой аппаратуры) [1, 2];
- **конструктивный** (специализированные корпуса ИМС, методы локальной защиты) [1-7];
- **схемотехнический** (методы мажоритирования и др.) [1];
- **моделирование радиационных эффектов** (на стадии проектирования ИМС) [1].

Конструкционная защита не является альтернативой перечисленным методам, а служит дополнительным способом снижения радиа-

ционной нагрузки на все объекты, находящиеся на борту космических аппаратов (КА). Однако при использовании стандартных материалов конструкционной защиты (алюминия и его сплавов) сохраняется достаточно высокий уровень радиационного воздействия, поэтому для наиболее уязвимых элементов рекомендуется локальная защита.

Локальная защита представляет собой дополнительный экран, предназначенный для защиты критичных узлов и элементов аппаратуры. Применение такого экрана не влечет за собой серьезного увеличения массы или габаритов блоков КА, является одним из наиболее эффективных и экономичных подходов к обеспечению радиационной защиты ИМС. Перспективное направление развития методов локальной защиты ИМС – создание новых типов

корпусов с интегрированными в них экранами радиационной защиты (ЭРЗ).

Применение коммерческих кристаллов ИМС и полупроводниковых приборов в военных и гражданских космических системах стало возможным после того, как экспериментальным путем была доказана эффективность экранирования с использованием защитных материалов [8]. Локальное экранирование ИМС было предложено в 1979 году, а исследования, подтверждающие его эффективность, проведены в 80-х годах в США [8-10].

Эффект воздействия радиации на элементы и аппаратуру КА определяется типом излучения, энергией, интенсивностью и проникающей способностью первичных и вторичных частиц в объеме вещества. ЭРЗ эффективны для защиты электронной аппаратуры от воздействия мягкой компоненты космического излучения (электронов, протонов), неспособной глубоко проникать в вещество.

Что касается ионизирующих излучений с более высокой проникающей способностью (рентгеновское излучение, гамма-излучение, мюоны, тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) и др.), то защита электронных систем посредством экранов менее эффективна. Следует отметить, что с помощью одного метода невозможно обеспечить достаточный уровень защиты оборудования КА от всего спектра космических воздействий. При этом ЭРЗ предохраняют элементы космических аппаратов от накопительной (дозовой) составляющей радиационной нагрузки, в то время как высокоэнергетические частицы, в том числе ТЗЧ, создающие одиночные радиационные эффекты, имеют вероятностный характер воздействия и требуют других способов повышения радиационной стойкости.

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ ЭКРАНОВ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Материалы и технологии для ЭРЗ разрабатывают как российские, так и зарубежные производители [2-7]. Известны такие технологии создания защитных покрытий, как RAD-COAT (Space Electronics Inc., США), RAD-PAK (Maxwell Technologies, США), WALOPACK (3D-Plus, Франция), X-Ray (Actel, США) [4-6]. Для защиты ИМС в составе космического аппарата от воздействия ионизирующего излучения зарубежные компании предлагают ряд конструкций корпусов (рис.1).

По данным компании Maxwell Technologies, технология RAD-PAK обеспечивает уровень стойкости не менее 100 Крад по отношению к эффекту

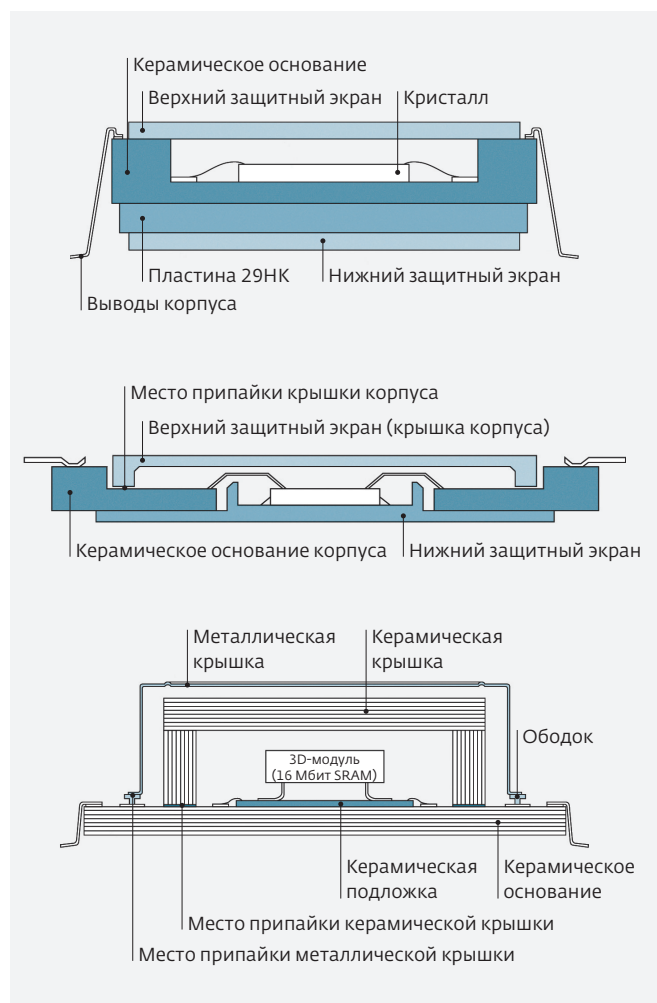


Рис.1. Конструкции корпусов ИМС с интегрированными защитными экранами ряда зарубежных компаний

поглощенной дозы [5]. Принципиально важно, что эффективность такой защиты существенно зависит от параметров орбиты, сроков эксплуатации и компоновки КА.

Как показали недавние исследования, наибольшими защитными свойствами от радиационного воздействия обладают многослойные структуры и композиционные материалы, которые позволяют снизить дозовые нагрузки на элементы аппаратуры КА в несколько раз при сокращении массогабаритных характеристик [6, 7]. К таким ЭРЗ относятся материалы WALOPACK, представляющие собой структуры с чередующимися слоями керамики Al_2O_3 и порошкообразного вольфрама. В работах [11, 12] показано, что для геостационарной орбиты (ГСО) наиболее эффективна трехслойная композиция защиты, в которой материал с высоким атомным номером Z располагается между

слоями материала с низким Z , в частности, композиция Al-W-Al.

По конфигурации и размерам ЭРЗ должны соответствовать стандартным корпусам ИМС. С этой точки зрения, универсальной является технология нанесения защитных покрытий RAD-COAT, которая, в отличие от технологий RAD-PAK и WALOPACK, не привязана к конструкции стандартного корпуса ИМС. Покрытия типа RAD-COAT изготавливают на основе пластичной матрицы с наполнителем в виде порошка вольфрама. Однако с учетом плотности этих покрытий (13 г/см^3) можно предположить, что по эффективности они уступают защите типа RAD-PAK и WALOPACK.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ЭРЗ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В 2014 году компанией "ТЕСТПРИБОР" (Москва) начаты работы по созданию собственной оригинальной конструкции корпусов с интегрированными в них радиационно-защитными экранами. На первом этапе были проведены исследования перспективных материалов для ЭРЗ, обеспечивающих максимальную эффективность защиты при оптимальных массогабаритных характеристиках и согласованных по температурному коэффициенту расширения (ТКР) с материалами, используемыми для изготовления металлокерамических корпусов ИМС (сплав 29НК и керамика Al_2O_3). Результаты выполненных компьютерных расчетов коэффициентов ослабления потоков протонов и электронов ЭРЗ для ряда космических орбит были сопоставлены с данными эксперимента.

Для исследований изготовили образцы ЭРЗ в виде пластин разной толщины на основе чистых металлов (вольфрама, тантала, меди и алюминия), композитов системы W-Cu, а также покрытий сплавов Bi-Al, керамики Al_2O_3 и сплава системы Fe-Ni-Co (29НК). Образцы экранов тестировались для электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗ) на моделирующих установках. Облучение электронами осуществлялось на ускорителях электронов ЭЛУ-4 (энергия электронов 4 МэВ) (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск), а также У-31/33 (2,2 МэВ) и "РЭЛУС" (3,6 МэВ) (АО "ЭНПО СПЭЛС", г. Москва). Для уменьшения энергии электронов до 1,6–1,8 МэВ на ускорителе ЭЛУ-4 между мишенью и окном вывода электронов устанавливалась алюминиевая пластина толщиной 5 мм. Облучение протонами проводилось на ускорителе протонов с перестраиваемой энергией (г. Протвино). Использовались следующие значения энергии протонов: 50, 70, 100, 150 и 200 МэВ.

Поглощенная доза определялась как детекторами ИС-7, так и по изменению вольт-амперных характеристик (ВАХ) р-канальных МОП-транзисторов. Детекторы ИС-7 – стандартные средства дозиметрии в АО "ЭНПО СПЭЛС" при проведении испытаний на радиационную стойкость. Их погрешность не превышает 15%. В качестве тестовых образцов использовались транзисторные МОП-структуры (элементы логических КМОП ИМС IN74AC04N), изготовленные в ОАО "Интеграл" по стандартной эпитаксиально-планарной технологии с индуцированными каналами р-типа (длина канала $L=2,0 \text{ мкм}$, ширина $W=50,0 \text{ мкм}$).

Параметры тестовых МОП-структур измерялись до и после каждой дозы облучения с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6. Погрешность измерений составляла $\pm 5\%$. Эффективность экранирования определялась по изменению ВАХ, в частности, порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ МОП-структур, расположенных за экраном и без экрана. Значения коэффициента экранирования K_3 тестовых структур рассчитывали из соотношения:

$$K_3 = D_{\text{п}}/D_{\text{п0}},$$

где $D_{\text{п}}$ – доза параметрического отказа тестовой приборной структуры за защитным экраном, $D_{\text{п0}}$ – доза параметрического отказа тестовой приборной структуры без экрана. Параметрический отказ фиксировался при изменении порогового напряжения $\Delta U_{\text{пор}} = 0,1 \text{ В}$.

При использовании дозиметров ИС-7 эффективность экранирования также определялась по отношению поглощенной дозы, измеренной без экрана, к поглощенной дозе за экраном.

Для перевода флюенса (интегральной плотности потока) электронов в накопленную дозу применялись следующие соотношения: $1 \text{ крад} = 3 \times 10^{10} \text{ эл/см}^2$; $1 \times 10^{12} \text{ эл/см}^2 = 33 \text{ крад}$.

С помощью программы GEANT4 были выполнены расчеты поглощенной дозы радиации в расположенном за защитными экранами и без экрана кристалле кремния, облученном протонами с энергией от 0,04 до 500 МэВ. Как показали результаты исследования ЭРЗ на основе различных материалов, по габаритным и стоимостным параметрам наиболее подходящим материалом является вольфрам [13]. Для изменения ТКР к нему добавляют примеси других металлов, в частности, меди. Получаемый таким образом композит W-Cu имеет нужные технологические качества для изготовления ЭРЗ, интегрированных

в металлокерамические корпуса ИМС.

Исследования защитных свойств образцов ЭРЗ на основе композиционного материала W-Cu, керамики Al₂O₃ и сплава системы Fe-Ni-Co (29НК) при облучении потоками электронов с энергией 1,6-1,8 МэВ тестовых структур р-канальных МОП-транзисторов показали, что по мере увеличения толщины элементов металлокерамических корпусов ИМС повышается коэффициент эффективности экранирования (табл.1). Экраны на основе керамики Al₂O₃ могут обеспечить требуемый уровень защиты ИЭТ при толщине более 3 мм, экраны из сплава 29НК – более 1,5 мм. Однако увеличение толщины керамического корпуса в большинстве случаев не представляется возможным как с точки зрения габаритов, так и требуемого уровня теплоотвода.

Более эффективно интегрировать в корпуса микросхем дополнительные экраны на основе композиционного материала W-Cu (см. табл.1). Уже при толщине ЭРЗ d = 0,6 мм достигаются значительно более высокие радиационно-защитные свойства, чем у экранов, изготовленных на основе сплава 29НК или керамики Al₂O₃. Тем не менее чрезмерное наращивание толщины пластин W-Cu также не дает существенного выигрыша в радиационно-защитных свойствах ЭРЗ как от электронного, так и протонного облучения. Вероятнее всего, это обусловлено увеличением тормозного излучения, которое обладает высокой проникающей способностью. Установлено, что для защиты от электронов и протонов РПЗ оптимальная толщина экранов на основе W-Cu в диапазоне 0,9-1,2 мм.

Результаты испытаний для ЭРЗ на основе W-Cu были подтверждены в АО "ЭНПО СПЭЛС".

Результаты компьютерного моделирования коэффициента эффективности экранирования ЭРЗ на основе W-Cu толщиной 1,2 мм от электронов и протонов с разной энергией показали, что данный тип ЭРЗ весьма эффективно ослабляет излучение электронов РПЗ во всем диапазоне энергии – порядок величины K_э изменяется в диапазоне от 10 до 10⁴ (табл.2). Для протонов космического

Таблица 1. Защитные свойства образцов радиационно-защитных экранов на основе композиционного материала W-Cu, керамики Al₂O₃ и сплава системы Fe-Ni-Co (29НК)*

W-Cu (ρ=16,6 г/см ³)						
d, см	0,06	0,09	0,12	0,15		
d _м , г/см ²	1,06	1,51	2,01	2,47		
K _э	96	130,8	142,3	155,8		
Al ₂ O ₃ (ρ=3,62 г/см ³)						
d, см	0,093	0,181	0,271	0,364	0,456	0,545
d _м , г/см ²	0,337	0,655	0,981	1,317	1,651	1,973
K _э	2,3	6,9	36,2	103,8	126,9	140,3
29НК (ρ=8,4 г/см ³)						
d, см	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25
d _м , г/см ²	0,42	0,63	0,84	1,26	1,68	2,1
K _э	4,2	9,6	21,9	115,4	130,7	138,5

* Расчет K_э выполнен для D_{п0}=2,6×10¹² см⁻²; d_м=ρ×d [г/см²], где d – толщина образца, d_м – массовая толщина, ρ – плотность материала.

Таблица 2. Результаты компьютерного моделирования коэффициента эффективности экранирования ЭРЗ на основе W-Cu толщиной 1,2 мм от электронов и протонов с различной энергией

Электроны		Протоны			
E _е , МэВ	K _э	E _р , МэВ	K _э	E _р , МэВ	K _э
0,5	Макс.*	3	38214695,96	28	10586,32
1,0	39524,3	5	2918577,01	30	7554,69
1,5	4753,6	7	1113847,86	31	34,92
2,2	1385,1	10	606568,38	32	0,90
2,5	948,5	12	264503,06	33	0,46
3,0	460,0	15	184863,02	34	0,33
3,6	324,3	17	110060,02	35	0,30
4,0	202,3	20	38051,11	36	0,39
5,0	34,3	22	22194,03	38	0,50
6,0	5,9	26	12995,70	40	0,57

* Максимальная величина коэффициента ослабления означает, что за защитный экран не проходит ни один электрон с такой энергией.

Таблица 3. Эффективность экранирования ЭРЗ электронов и протонов РПЗ для различных типов орбит космического пространства

Тип орбиты	Электроны РПЗ		Протоны РПЗ	
	K _э		K _э	
	Минимум солнечной активности	Максимум солнечной активности	Минимум солнечной активности	Максимум солнечной активности
Круговая полярная орбита	51 375	2 384	4	4
ГСО	152 537	152 582	—*	—*
ГЛОНАСС	38 759	47 244	—*	—*
ВЭО	45 941	146 137	270	273
МКС	9 289	59 887	6	3

* Протоны РПЗ для данных орбит ослабляются защитным экраном, а также защитой 0,1 г/см² Al.

пространства (КП) с энергией менее 30 МэВ защитный экран обеспечивает ослабление поглощенной дозы в 10³...10⁶ раз, для протонов с энергией в диапазоне 30–100 МэВ наблюдается усиление поглощенной дозы за защитным экраном в два-три раза. Использовать защитный экран для протонного излучения с энергией более 100 МэВ неэффективно. Удельные потери энергии протонов возрастают по мере уменьшения энергии частиц, причем особенно резко перед остановкой в веществе [1]. Этим обусловлено наблюдаемое уменьшение значения K_э ниже единицы для протонов с энергией в диапазоне 30...100 МэВ (см. табл.2).

Таблица 4. Суммарные значения коэффициента эффективности экранирования ЭРЗ электронов и протонов РПЗ для различных типов орбит космического пространства

Тип орбиты	K _э	
	Минимум солнечной активности	Максимум солнечной активности
Круговая полярная орбита	39	8
ГСО	152 537	152 582
ГЛОНАСС	38 759	47 244
ВЭО	484	1266
МКС	12	533

Из результатов расчета значений коэффициента эффективности экранирования K_э для ЭРЗ на основе композита W-Cu толщиной 1,2 мм для потоков электронов и протонов КП на различных типах орбит видно, что защитный экран ослабляет суммарную поглощенную дозу от заряженных частиц как минимум на порядок (табл.3, 4). При этом ЭРЗ являются наиболее эффективными для орбит ГСО, ГЛОНАСС и ВЭО (высокоэллиптическая орбита) с большим вкладом электронов. Применение ЭРЗ для орбит с большим вкладом протонов (орбита МКС и круговая полярная орбита) менее эффективно.

КОРПУСА ДЛЯ ИМС С ЭРЗ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА W-Cu

С учетом результатов проведенных исследований были спроектированы и изготовлены корпуса для ИМС с интегрированными в них радиационно-защитными экранами, выполненными на основе композитного материала W-Cu.

Авторами предложены два варианта металлокерамического корпуса, которые различаются методами герметизации подкорпусного пространства (рис.2). В первом случае герметизация осуществляется методом пайки (рис.2а), а во втором – методом шовно-роликовой сварки (рис.2б).

Компания "ТЕСТПРИБОР" разработала материалы и технологию, которые могут быть использованы для изготовления корпусов нового поколения электронной компонентной базы, применяемой в аппаратуре ракетной и космической

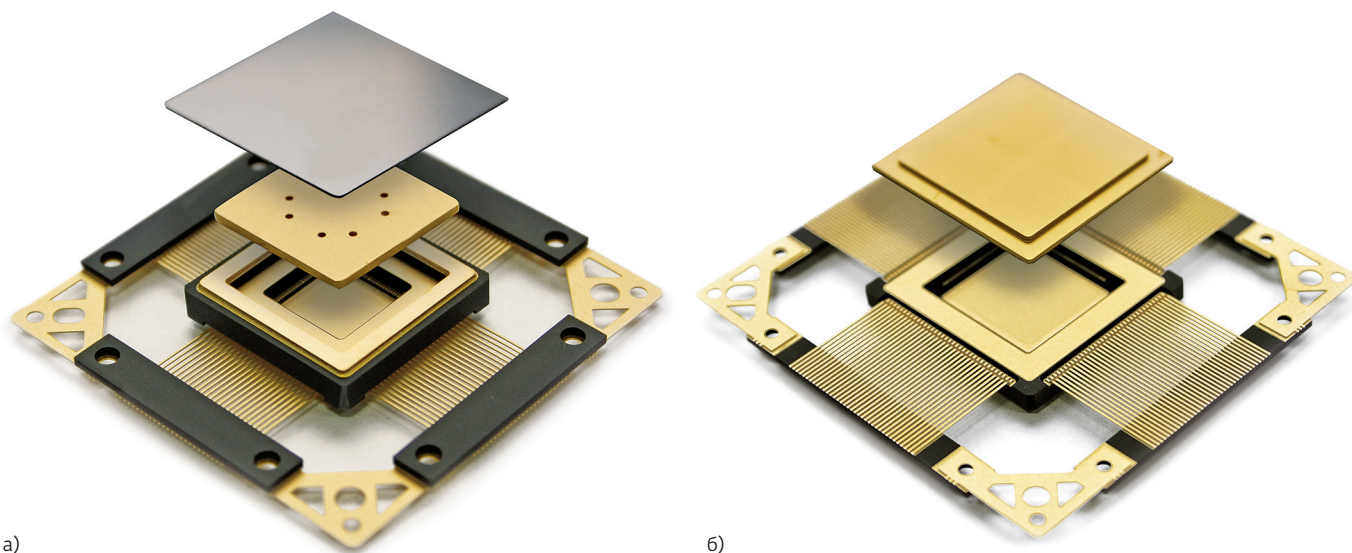


Рис.2. Варианты металлокерамического корпуса с интегрированным ЭРЗ на основе композитного материала W-Si: а) 100-выводной планарный корпус с герметизацией пайкой, б) 144-выводной планарный корпус с герметизацией шовно-роликовой сваркой

техники для обеспечения повышенных требований к радиационной устойчивости.

Применение корпусов с интегрированной радиационной защитой позволит:

- обеспечить повышенную радиационную стойкость ИМС, электронных компонентов и аппаратуры;
- использовать электронные компоненты коммерческого и промышленного классов для космических приложений;
- расширить номенклатуру применяемых ИМС и тем самым снизить затраты на комплектацию при производстве космической аппаратуры;
- обеспечить снижение весовых и габаритных параметров по сравнению со стандартными методами конструктивной защиты.

Авторы выражают благодарность АО "ЭНПО СПЭЛС" за проведенные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. Г.Г.Райкунова. - М.: Физматлит, 2013, 256 с.
2. **Ефремов Г., Епифановский И., Ширяев А. и др.** Новые материалы для локальной радиационной защиты // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 1.
3. **Заболотный В., Старостин Е., Кочетков А.** Оптимальные составы для локальной защиты бортовой электроники от космической радиации. - Физика и химия обработки материалов, 2008, № 5.
4. www.spaceelectronics.com.
5. www.maxwelltechnologies.com.
6. www.3d-plus.com/radiation-assurance.php.
7. **Гульбин В.** Разработка композиционных материалов, модифицированных нанопорошками, для радиационной защиты в атомной энергетике. - IX Всероссийская конф. "Физико-химия ультрадисперсных (нано-) систем - 2010", г. Ижевск.
8. **Spratt J., Passenheim B., Leadon R.** Effectiveness of IC Shielded Packages Against Space Radiation // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997. Vol. 44. P. 2018-2025.
9. **Adams L., Nickson R., Kelleher A.** A Dosimetric Evaluation of the RAD-PAK™ Using Mono-Energetic Electrons and Protons // RADECS, 1995, IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. 43. P. 449-452.
10. **Millward D., Strobel D.** The Effectiveness of RAD-PAK™ ICs for Space Radiation Hardening. - Proc. of 40-th ECTEC conference, Las Vegas, May 1990.
11. **Fan W., Drumm C., Boeske S.** Shielding Considerations for Satellite Microelectronics // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. 43. № 6. P. 2790-2796.
12. **Mangeret R., Carriere T., Beacour J.** Effects of Material and/or Structure on Shielding of Electronic Devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. 43. № 6. P. 2665-2670.
13. **Богатырев Ю., Василенков Н., Грабчиков С. и др.** Экраны локальной радиационной защиты изделий микроэлектронной техники // Вопросы атомной науки и техники. 2014. Вып. 4. С. 53-56. (Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру).