

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 613.648.4:004.942

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-25-34>

Поступила в редакцию 22.11.2019

Received 22.11.2019

С. С. Грабчиков¹, Е. А. Грабчикова¹, Д. С. Васин¹, Д. И. Тишкевич¹, С. Б. Ластовский¹,
А. С. Якушевич¹, Ю. В. Богатырев¹, И. В. Калагин², С. В. Митрофанов²

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск,
Республика Беларусь

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБЕГОВ И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ В ОДНОСЛОЙНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация. С помощью программного комплекса SRIM рассчитаны линейные и массовые пробеги протонов и ионов аргона в экранах из алюминия, оксида алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$. Показано, что эффективность защиты от высокоэнергетических ионов материалами с большими значениями заряда ядер атомов (Z) выше с позиции линейных пробегов частиц и ниже с позиции массовых пробегов, чем материалами с низкими значениями Z . Определена зависимость пороговой энергии от Z высокоэнергетических ионов для экранов из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$. Проведены расчеты спектров потерь на ионизацию при прохождении протонов с энергией 20 МэВ и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ через многослойные структуры Bi/Al/Al₂O₃ и Al/Al₂O₃/Bi. Расчеты показали, что торможение высокоэнергетических частиц в случае, когда первый слой содержит тяжелый элемент, выше, чем в случае, когда первый слой содержит легкий элемент. Изучено влияние последовательности в расположении и толщины слоев в многослойных структурах системы Bi/Al/Al₂O₃ на эффективность защиты от высокоэнергетических ионов. Показано, что характер зависимостей $R(E)$ и потерь энергии ионов определяется очередностью расположения отдельных слоев, что связано с различием преобразования спектров материалом первого слоя. Рассмотренные экраны радиационной защиты могут быть использованы в элементах и аппаратуре ракетно-космической техники, могут обеспечить требования по устойчивости к воздействию различных видов ионизирующих излучений (электронное, протонное, гамма-излучение, тяжелые заряженные частицы и др.).

Ключевые слова: радиационная защита, тяжелые заряженные частицы, протоны, высокоэнергетические ионы, радиационные экраны, математическое моделирование

Для цитирования: Моделирование пробегов и потерь энергии высокоэнергетических ионов в однослойных и многослойных материалах / С. С. Грабчиков [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 25–34. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-25-34>

Sergey S. Grabchikov¹, Elena A. Grabchikova¹, Denis S. Vasin¹, Daria I. Tishkevich¹, Stanislav B. Lastovski¹,
Anna S. Yakushevich¹, Yrii V. Bogatyrev¹, Igor V. Kalagin², Semen V. Mitrofanov²

¹Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

MODELING OF PATHS AND ENERGY LOSSES OF HIGH-ENERGY IONS IN SINGLE-LAYERED AND MULTILAYERED MATERIALS

Abstract. Linear and mass ranges of protons and argon ions in aluminum, alumina, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite shields were calculated using the SRIM software package. It is shown that the protection efficiency against high-energy ions by materials with large atomic charge (Z) values is higher, from the position of linear ranges of particles, and lower, from the position of mass ranges, in comparison with materials with low Z values. The dependence of the threshold energy on the serial number of particles for aluminum, bismuth, and composite $W_{77,7}Cu_{22,3}$ shields is determined. The ionization loss spectra for the passage of both protons with an energy of 20 MeV and krypton ions with an energy of 7.75 GeV through multi-layer Bi/Al/Al₂O₃ and Al/Al₂O₃/Bi structures were calculated. These results showed that the braking of high-energy particles in the case when the first layer contains a heavy element is higher than in the case when the first layer contains a light element. The influence of the sequence in the arrangement and thickness of the layers in the multilayer structures of the Bi/Al/Al₂O₃ system on the efficiency of protection against high-energy ions was studied. It is shown that the nature of the dependences $R(E)$ and ion energy losses are determined by the sequence of arrangement of individual layers, which is due to the difference in the conversion of the spectra by the material of the first layer. The studied radiation shields can be used in aerospace and nuclear technologies, as well as in many scientific and medical devices, and can be used to protect against the effects of a wide range of ionizing radiation (electrons, protons, heavy charged particles, etc.).

Keywords: radiation protection, heavy charged particles, protons, high-energy ions, radiation shields, mathematical modeling

For citation: Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Vasin D. S., Tishkevich D. I., Lastovskii S. B., Yakushevich A. S., Bogatyrev Y. V., Kalagin I. V., Mitrofanov S. V. Modeling of paths and energy losses of high-energy ions in single-layered and multilayered materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 25–34 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-25-34>

Введение. При разработке новых материалов, используемых в элементах и аппаратуре ракетно-космической техники, необходимо выполнять требования по устойчивости к воздействию различных видов ионизирующих излучений (ИИ). Воздействие протонов или тяжелых ионов высоких энергий может приводить к внезапным отказам в работе радиоэлектронных приборов и блоков космических аппаратов (КА), что связано с возникновением радиационных эффектов в интегральных микросхемах (ИМС) (единичный сбой и выгорание, защелкивание и т. д.) [1]. Решение данной проблемы – очень сложная и многоуровневая задача. На практике для повышения радиационной надежности электронных компонентов, как правило, используют: конструктивно-технологические (схемотехнические) методы проектирования, «мажоритирование» (создание в ИМС второй, третьей и т. д. ИМС-дублера, которая в случае выхода из строя первой заменит ее) и конструктивную защиту (элементы конструкций КА, специализированные корпуса, локальная защита) [1, 2].

Для обеспечения радиационной защиты электронных компонентов КА от воздействия электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗ) используют пластины или покрытия в виде локальной защиты, формируемые на отдельных элементах электронной аппаратуры [3–7]. Однако существует мнение [8], согласно которому защита от воздействия высокоэнергетических тяжелых ионов (в научной литературе часто используется термин «тяжелые заряженные частицы» (ТЗЧ)) путем использования радиационных экранов малоэффективна, поскольку потоки вторичных частиц и осколки вещества, создаваемые при взаимодействии ТЗЧ с материалом экрана, могут оказывать более негативный эффект, чем первичное излучение. Вместе с тем известно [9], что потоки протонов и электронов РПЗ сравнительно стабильны, и для основных околоземных орбит определены спектры ИИ. Потоки солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ) являются нестабильными факторами и носят вероятностный характер. Потоки СКЛ в основном состоят из низкоэнергетических электронов и протонов ($E \sim 1$ кэВ) с плотностью 10^8 – 10^9 см⁻²·с⁻¹, однако во время солнечных вспышек значения энергий могут достигать 10^8 – 10^9 эВ [10]. В составе потоков ГКЛ преобладают протоны ($E \leq 10^{12}$ эВ), на долю остальных ядер приходится менее 10 %. Потоки ГКЛ характеризуются сравнительно небольшой плотностью – до 5 см⁻²·с⁻¹, но обладают огромной энергией – до 10^{20} эВ [11]. Согласно данным [12], энергетический спектр частиц в открытом космосе можно характеризовать следующими значениями потоков частиц на 1 мм² в 1 год: ~ 30 частиц с $E = 10$ ГэВ, $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ частиц с $E = 1$ ТэВ, $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ частиц с $E = 1$ ПэВ.

В околоземном космическом пространстве энергетический спектр ГКЛ существенно отличается от спектра ГКЛ в межзвездном пространстве, что связано с влиянием солнечного ветра (гелиосферы) и магнитного поля Земли. При этом влияние данных факторов на частицы с энергией выше 10Z ГэВ (Z – заряд ядер атомов) незначительно. Электронные компоненты обычно расположены внутри КА за внешним корпусом и элементами конструкций. Поэтому на околоземных орбитах энергии и количество воздействующих на электронные компоненты частиц будут ниже, чем приведенные выше, и вопрос защиты электронных компонентов от воздействия высокоэнергетических ионов путем использования радиационных экранов имеет большой практический интерес.

В связи с этим проблема изучения взаимодействия ТЗЧ с материалами защитных экранов является актуальной. Для проведения экспериментальных исследований необходимы дорогостоящие ускорители, способные ускорять ионы до огромных энергий, поэтому широкое распространение получили методы компьютерного моделирования процессов прохождения ионов заданной энергии в различных материалах (программные пакеты SRIM, GEANT4 и др.). В данной работе приведены расчеты пробегов и потерь энергии высокоэнергетических ионов в однослойных и многослойных материалах с помощью программного комплекса SRIM.

Методика моделирования. Линейные пробеги и энергетические потери ионов рассчитывались с помощью программы SRIM-2013.00 [13], в которой при моделировании процесса прохождения ТЗЧ в веществе применяется модель непрерывного замедления. В качестве высокоэнергетических воздействий использованы протоны, ионы гелия, углерода, неона, аргона, железа, криптона и ксенона с энергиями от 10 МэВ до 27,4 ГэВ. Все ионы направлялись перпендикулярно поверхности экранов. Число частиц при моделировании равнялось 10^3 ионов. Линейные, массовые пробеги и пороговые энергии фиксировались по наиболее вероятной длине пробега высокоэнергетических ионов. Модельными объектами служили однослойные экраны на основе алюминия, оксида алюминия, висмута, композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ и многослойных структур систем Bi/Al/Al₂O₃ с различными последовательностями и толщинами отдельных слоев. Толщина экранов из алюминия, оксида алюминия и висмута составляла 1,4 мм, толщина экрана из композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ – 1,5 мм. Многослойные структуры четырех типов имели следующее строение:

Bi/Al/Al₂O₃ и Al/Al₂O₃/Bi с толщинами отдельных слоев Bi – 0,6 мм, Al – 0,2 мм, Al₂O₃ – 0,6 мм и суммарной толщиной 1,4 мм;

Bi/Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃ и Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃/Bi с толщинами отдельных слоев Bi – 0,2 мм, Al – 0,067 мм, Al₂O₃ – 0,2 мм и суммарной толщиной 1,4 мм.

Результаты и обсуждение. *Пробеги и пространственное распределение высокоэнергетических ионов, потери энергии на торможение в алюминии, висмуте и композите W–Cu.* С ростом заряда ядер атомов в экранах из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ расстояния, пройденные частицами в веществе до полной остановки (линейный пробег, R), уменьшаются. Соответственно энергии, необходимые для прохождения частицами экранов заданной толщины (d), с ростом Z возрастают. Изменение линейных пробегов ионов для разных материалов экрана в последовательности $W_{77,7}Cu_{22,3}$; Bi и Al возрастает, что обусловлено более низкой плотностью материала. Согласно данным [2], удельная плотность (ρ , г/см³) равна: Al – 2,7; Al₂O₃ – 3,9; Bi – 9,8; композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ – 17,02. Для определения экранирующей способности материала наряду с линейными пробегами используется массовый пробег, равный $R_m = R \cdot \rho$ (г·см⁻²).

Рассчитанные линейные и массовые пробеги протонов и ионов аргона в экранах из алюминия, оксида алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Следует отметить, что эффективность защиты от ТЗЧ материалами с большими значениями Z выше, чем материалами с низкими значениями Z , с позиции линейных пробегов частиц (линейной толщины экранов). С позиции массовых пробегов (массовой толщины экранов) материалы с низкими значениями Z обладают более эффективной защитой, чем материалы с большими значениями Z . Из представленных результатов также следует, что значения энергий ионов аргона, при которых $R \leq d$, для экранов из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ с толщинами $d_{Al} = d_{Bi} = 1,4$ мм и $d_{W_{77,7}Cu_{22,3}} = 1,5$ мм составляют 2,0 ГэВ 3,16 и 4,77 ГэВ соответственно.

Представленные в табл. 1, 2 результаты обычно описываются известной формулой Бете–Блоха [8, 11], согласно которой основные потери энергии ионов с $E > 2$ МэВ/нуклон в веществе связаны с ионизационными потерями. Исходя из формулы Бете–Блоха, ионизационные потери пропорциональны квадрату заряда ядра частицы (Z_i) и заряду ядра атомов материала Z . Следовательно, пробеги ТЗЧ уменьшаются в случаях более тяжелых ТЗЧ и материалов среды с большими значениями Z .

Т а б л и ц а 1. Линейные и массовые пробеги протонов в алюминии, оксиде алюминия, висмуте и композите

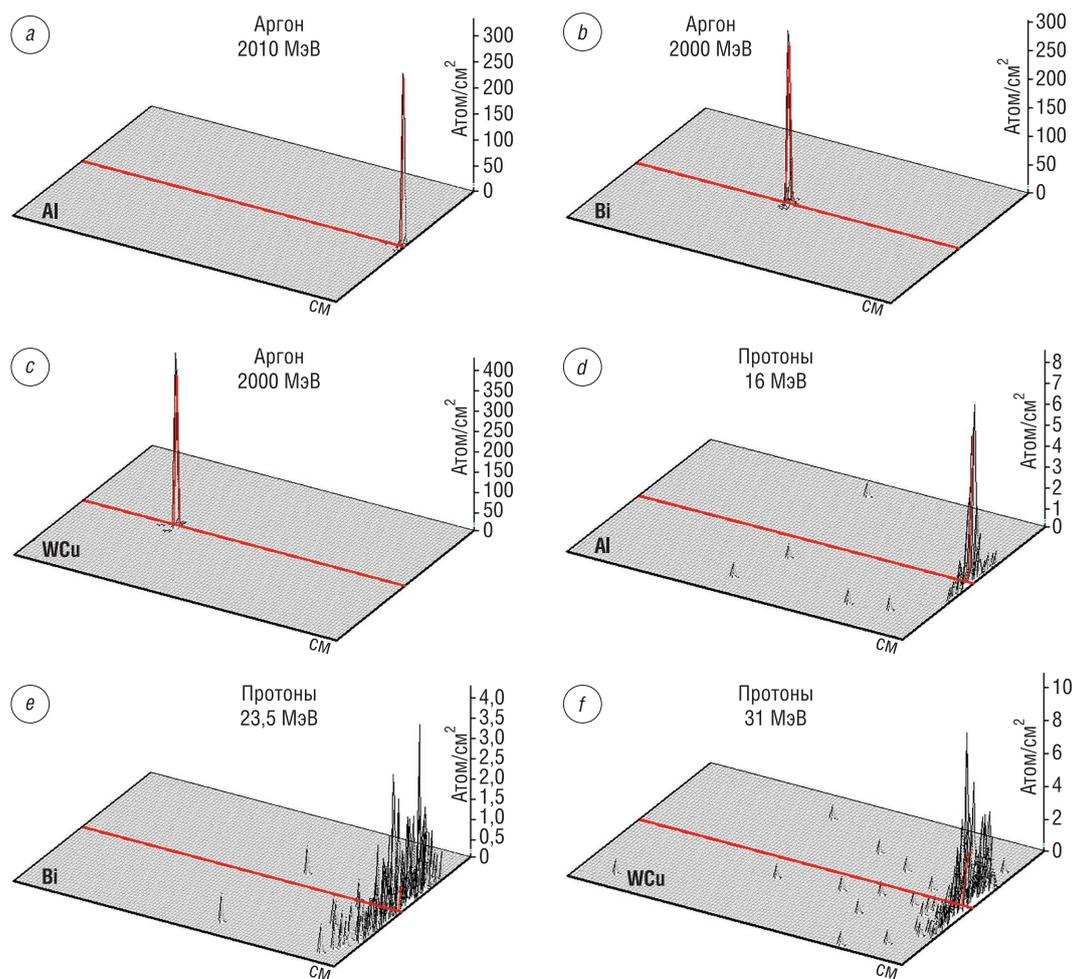
T a b l e 1. Proton linear and mass paths in aluminum, alumina, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite

E , МэВ	Al, $Z = 13$		Al ₂ O ₃ , $Z = 13; 8$		Bi, $Z = 83$		W _{77,7} Cu _{22,3} , $Z = 74; 29$	
	R , см	R_m , г/см ²	R , см	R_m , г/см ²	R , см	R_m , г/см ²	R , см	R_m , г/см ²
10	0,063	0,167	0,039	0,153	0,035	0,345	0,019	0,279
15	0,127	0,343	0,080	0,313	–	–	0,036	0,541
16	0,136	0,367	–	–	–	–	–	–
20	–	–	0,133	0,518	0,109	1,068	0,058	0,870
23,5	–	–	–	–	0,135	1,323	–	–
31	–	–	–	–	–	–	0,116	1,752

Т а б л и ц а 2. Линейные и массовые пробеги высокоэнергетических ионов аргона в алюминии, оксиде алюминия, висмуте и композите $W_{77,7}Cu_{22,3}$ T a b l e 2. Argon ions linear and mass paths in aluminum, alumina, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite

$E, \text{ГэВ}$	$Al, Z = 13$		$Al_2O_3, Z = 13; 8$		$Bi, Z = 83$		$W_{77,7}Cu_{22,3}, Z = 74; 29$	
	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$
1,0	0,046	0,123	0,028	0,109	0,023	0,229	0,012	0,187
1,4	0,077	0,207	0,049	0,189	–	–	–	–
2,0	0,139	0,375	0,088	0,342	0,067	0,655	0,036	0,539
2,6	–	–	0,139	0,542	0,098	–	–	–
3,16	–	–	–	–	0,139	1,362	–	–
4,77	–	–	–	–	–	–	0,148	2,235

Профили распределения высокоэнергетических ионов углерода, неона, аргона, криптона и ксенона в исследуемых материалах имеют ярко выраженный пик, так называемый пик Брэгга (рис. 1) [14]. Природа пика Брэгга связана с характером распределения поглощенной энергии вдоль линии пробега в веществе. Основной эффект поглощения энергии происходит в конце линейного пробега частицы, а сечение этого процесса растет с падением энергии, вследствие чего основную часть энергии частица теряет перед моментом остановки. Профили распределения протонов имеют совершенно другой вид (рис. 1 *d–f*) – поток частиц рассеивается по различным направлениям.

Рис. 1. Гистограммы распределения ионов аргона (*a–c*) и протонов (*d–f*) в экранах из алюминия (*a, d*), висмута (*b, e*) и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ (*c, f*)Fig. 1. Argon ions (*a–c*) and protons (*d–f*) histograms of the distribution in shields from aluminum (*a, d*), bismuth (*b, e*) and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite (*c, f*)

На траекторию движения протонов существенное влияние оказывают эффекты многократного рассеяния. Отклонение частицы от первоначального направления пропорционально числу столкновений, зависит от порядкового номера и энергии ТЗЧ.

Полученные результаты обусловлены механизмами взаимодействия высокоэнергетических ионов с веществом и связанными с ними потерями энергии ТЗЧ (упругие столкновения с атомами вещества $E < 10^4$ эВ, ионизационные потери при $E = 10^4 - 10^8$ эВ и потери на ядерные реакции при $E > 100$ МэВ/нуклон [11]). На рис. 2 представлены спектры потерь на ионизацию (а) и ядерные реакции (б) при прохождении протонов с энергией 22,5 МэВ и ионов криптона с энергией 9,23 ГэВ через висмут толщиной 1,4 мм. Видно, что для протонов и ионов аргона вклад в энергетические потери от процесса ионизации значительно выше ($\sim 10^2 - 10^3$), чем вклад от ядерных реакций.

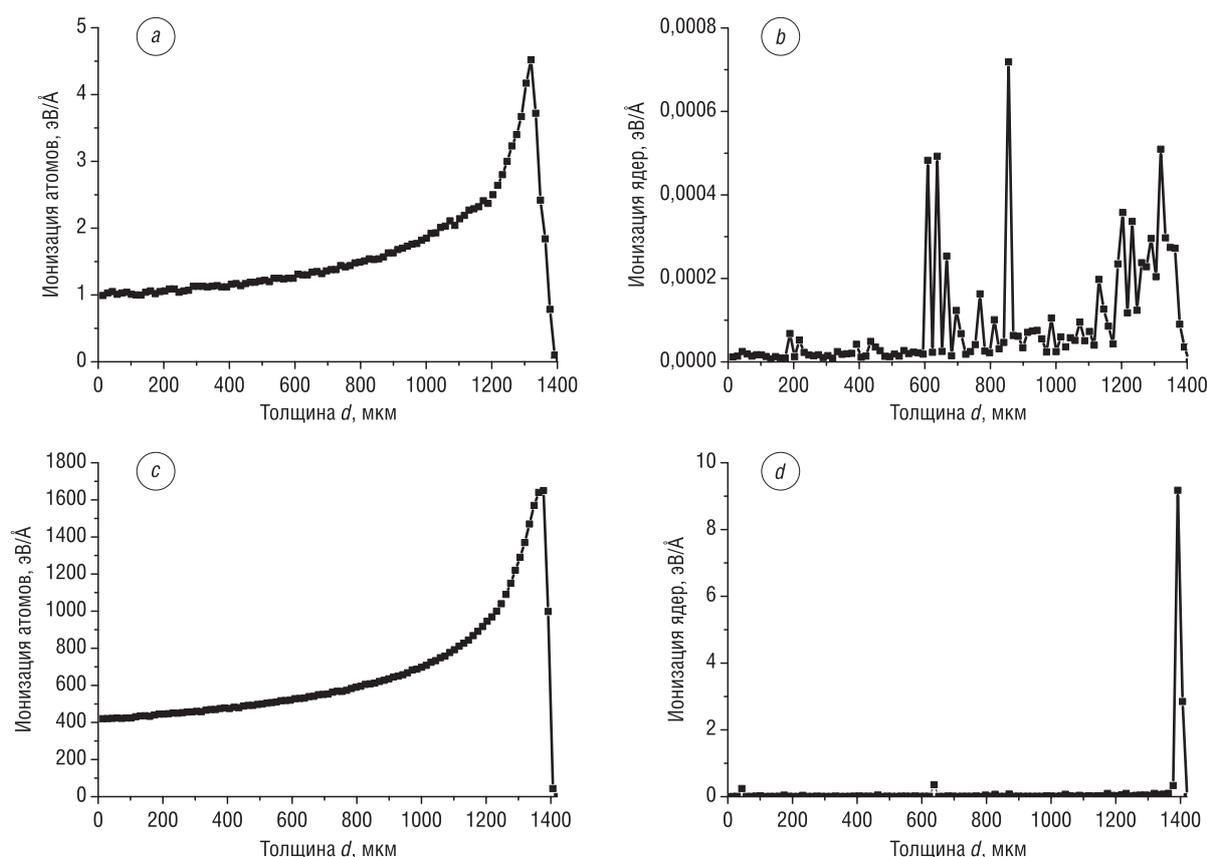


Рис. 2. Спектры потерь на ионизацию (а, с) и ядерные реакции (б, д) при прохождении протонов с энергией 22,5 МэВ (а, б) и ионов криптона с энергией 9,23 ГэВ (с, д) через висмут толщиной 1,4 мм

Fig. 2. The spectra of ionization losses (a, c) and nuclear reactions (b, d) during the protons transmission with 22.5 MeV (a, b) energy and krypton ions with 9.23 GeV energy (c, d) through bismuth with 1.4 mm thick

Для экранов радиационной защиты большой интерес представляет параметр пороговая энергия ионов ($E_{\text{пор}}$), при которой длина линейного пробега равна толщине экрана. Выполненные расчеты пробегов высокоэнергетических протонов, ионов гелия, углерода, неона, аргона, железа, криптона и ксенона в экранах из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ позволили построить зависимости $E_{\text{пор}}$ от порядкового номера ТЗЧ (рис. 3). Как видно из приведенных данных, наиболее высокой эффективностью с позиции линейных пробегов частиц обладают экраны на основе композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$. Значения пороговых энергий для этого материала толщиной 1,5 мм (массовая толщина 2,26 г/см²) при воздействии потоков протонов и ионов He^+ , C^+ , Ne^+ , Ar^+ , Fe^+ , Kr^+ и Xe^+ составляют 37 МэВ; 480; 790; 1780; 4770; 7900; 14200 и 27000 МэВ соответственно. Зависимость пороговой энергии от линейной толщины композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ для ионов аргона представлена на рис. 4.

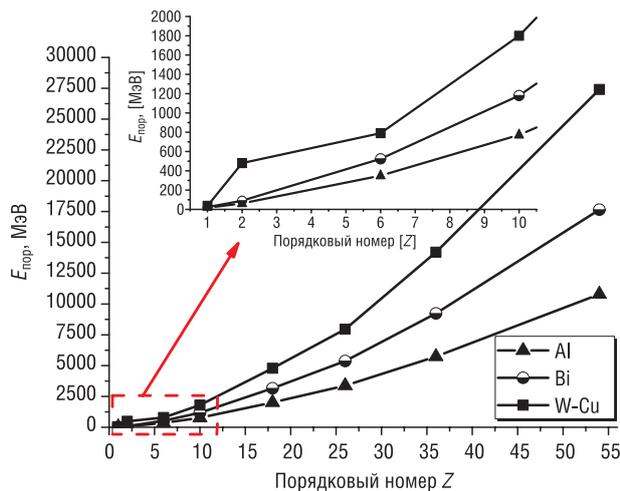


Рис. 3. Пороговая энергия экранов из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ толщиной 1,5 мм для протонов, ионов гелия, углерода, неона, аргона, железа, криптона и ксенона

Fig. 3. Threshold energy of aluminum, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite shields with 1.5 mm thickness for protons, helium, carbon, neon, argon, iron, krypton and xenon ions

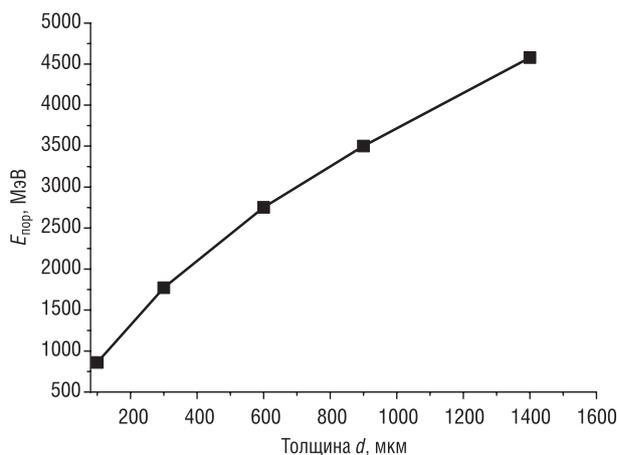


Рис. 4. Зависимость пороговой энергии от толщины экранов из композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ для ионов аргона

Fig. 4. Dependence of threshold energy on the $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite thickness for argon ions

Пробеги высокоэнергетических ионов и потери энергии в многослойных структурах системы $Bi/Al/Al_2O_3$. Влияние многослойности в экранах, а именно последовательности расположения и толщины слоев, на эффективность защиты от высокоэнергетических ионов исследовалось на структурах системы $Bi/Al/Al_2O_3$. В качестве воздействующих частиц были выбраны ионы криптона ($Z = 36$) с повышенным вкладом процессов ионизации в суммарные потери энергии. Рассчитанные зависимости линейных пробегов ионов криптона от количества и очередности расположения слоев легких и тяжелых элементов в многослойных структурах $Bi/Al/Al_2O_3$ представлены на рис. 5. Для сравнения на там же приведены результаты моделирования по однослойным экранам из алюминия и висмута. С позиции полученных при моделировании линейных пробегов частиц среди рассмотренных материалов наименее эффективны экраны из алюминия, наиболее эффективны – из висмута, средней эффективностью обладают многослойные структуры.

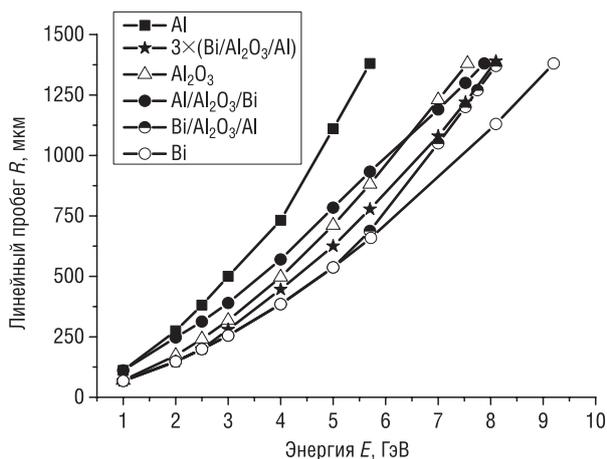


Рис. 5. Зависимости линейных пробегов от энергии ионов криптона в трехслойных структурах $Bi/Al_2O_3/Al$ и $Al/Al_2O_3/Bi$; девятислойной структуре $Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al$; однослойных экранах из алюминия и висмута

Fig. 5. Dependences of linear paths on the energy of krypton ions in three-layered $Bi/Al_2O_3/Al$ and $Al/Al_2O_3/Bi$ structures; nine-layered structure $Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al$; single-layered aluminum and bismuth shields

В трехслойных структурах системы $Bi/Al/Al_2O_3$ характер зависимостей $R = R(E)$ определяется очередностью расположения отдельных слоев.

В случае структуры $Bi/Al/Al_2O_3$ зависимость $R = R(E)$ вплоть до пробегов 0,6 мм ($E \sim 5,4$ ГэВ) совпадает с аналогичной зависимостью для чистого висмута, поскольку данный пробег соответствует толщине висмутного слоя многослойной структуры. При энергиях $E > 5,4$ ГэВ ТЗЧ проникают в слои Al_2O_3 и Al , тормозная способность которых ниже, чем у висмута, вследствие чего эффективность экранов $Bi/Al/Al_2O_3$ при энергиях $E > 5,4$ ГэВ ниже, чем у экранов из чистого висмута. Пороговая энергия для таких структур составляет 8,1 ГэВ.

В случае структуры $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}$ начальная точка на графике $R = R(E)$ соответствует линейному пробегу 0,2 мм ($E = 2$ ГэВ) и равна толщине алюминиевого слоя. Поэтому эта точка совпадает с аналогичной для чистого алюминия. При дальнейшем увеличении энергии за счет больших потерь в слое Al_2O_3 кривая $R = R(E)$ многослойной структуры опускается ниже кривой чистого алюминия. Висмутовый слой усиливает эту тенденцию и при конечной толщине 1,4 мм линейный пробег приближается к значениям пробегов для структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Пороговая энергия для данных структур составляет 7,9 ГэВ.

В случае девятислойной структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ большое количество слоев и их малые толщины нивелируют эффекты различного поглощения энергии отдельными слоями. Можно заключить, что с увеличением количества слоев зависимость линейных пробегов от энергии ионов приближается к аналогичной для экрана из эквивалентного трехслойного материала $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Поэтому зависимость $R = R(E)$ для девятислойной структуры располагается между аналогичными кривыми структур $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}$.

Для системы $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}$ значению $R = 0,8$ мм, которое соответствует толщине двух слоев Al и Al_2O_3 , требуется энергия ионов порядка 5,2 ГэВ, а значению $R = 1,4$ мм – энергия 7,9 ГэВ. Поэтому для прохождения висмутового слоя ионами понадобилась дополнительная энергия $E = 2,7$ ГэВ. Для системы $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ значению $R = 0,6$ мм, которое соответствует толщине слоя висмута, требуется энергия ионов порядка 5,4 ГэВ, а значению $R = 1,4$ мм – 8,1 ГэВ. Следовательно, для прохождения слоев Al и Al_2O_3 потребовалась дополнительная энергия 2,8 ГэВ. Различный уровень поглощения энергии слоями трехслойной структуры в зависимости от их последовательности подтверждается спектрами потерь на ионизацию, рассчитанными при прохождении протонов с энергией 20 МэВ (*a*, *b*) и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ (*c*, *d*) через многослойные структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Bi}$ с общей толщиной 1,4 мм (рис. 6).

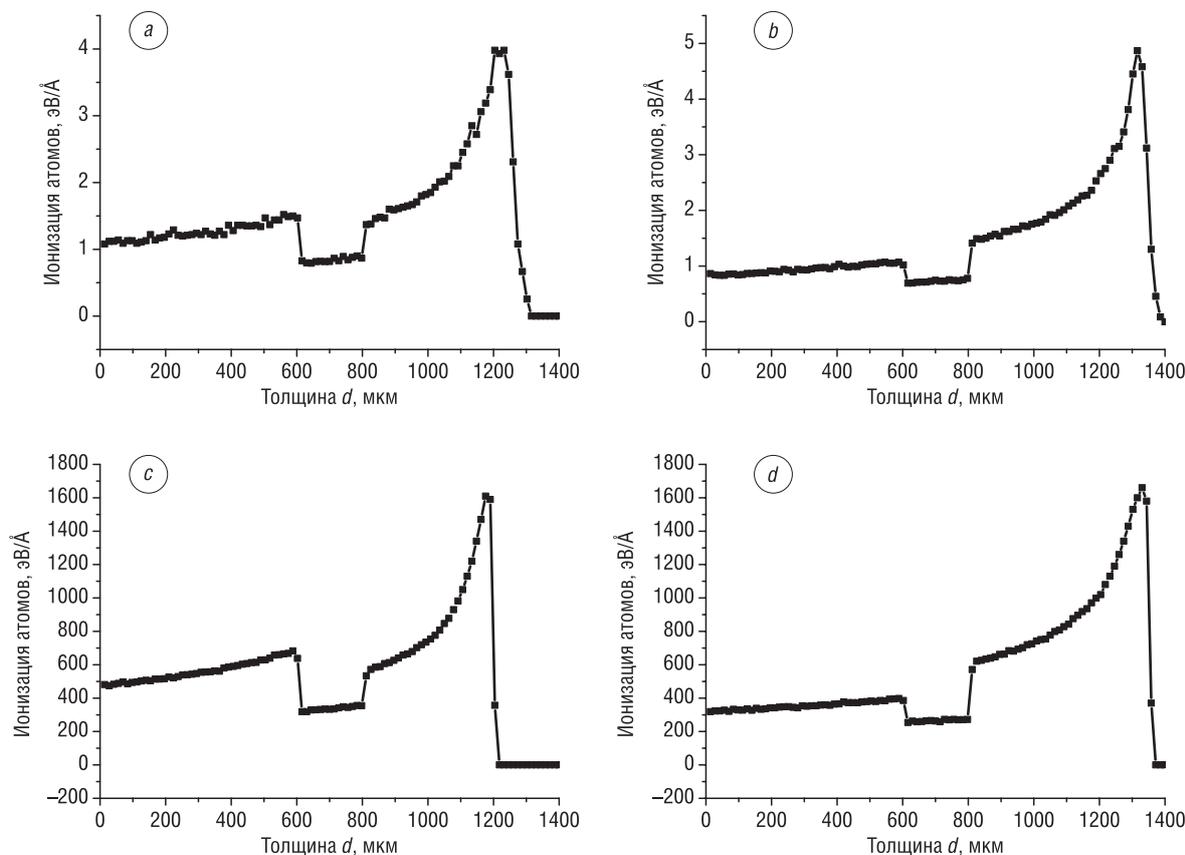


Рис. 6. Спектры потерь на ионизацию при прохождении протонов с энергией 20 МэВ (*a*, *b*) и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ (*c*, *d*) через многослойные структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (*a*, *c*) и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Bi}$ (*b*, *d*) толщиной 1,4 мм

Fig. 6. The ionization losses spectra for the transmissions of protons with 20 MeV (*a*, *b*) energy and krypton ions with 7.75 GeV (*c*, *d*) energy through the $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (*a*, *c*) and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Bi}$ (*b*, *d*) multilayered structures with 1.4 mm thickness

Из данных, представленных на рис. 6, видно, что потери на ионизацию как для протонов, так и для ионов криптона в случае многослойной структуры, первый слой которой содержит тяжелый элемент (Bi), выше, чем в случае, когда первый слой состоит из легких элементов (Al, Al₂O₃). Необходимо также отметить, что энергии протонов 20 МэВ и ионов криптона 7,75 ГэВ практически достаточно для прохождения высокоэнергетическими частицами многослойной структуры Al₂O₃/Al/Bi, но недостаточно для прохождения структуры Bi/Al/Al₂O₃.

Таким образом, в трехслойных структурах системы Bi/Al/Al₂O₃ характер зависимостей $R(E)$ и ионизационные потери энергии определяются очередностью расположения отдельных слоев, что можно объяснить различным уровнем потерь на ионизацию в слоях, содержащих тяжелые и легкие элементы. Поэтому более эффективными защитными свойствами среди многослойных экранов по отношению к монохроматическим и высокоэнергетическим ионам обладают структуры, в которых первый слой содержит более тяжелый элемент. Для системы Bi/Al₂O₃/Al – это слой висмута. Увеличение количества слоев не способствует повышению эффективности экранирования высокоэнергетических ионов. Похожие результаты были получены в [15]. Расчет в программе GEANT3 спектров протонов с энергией 6 МэВ при прохождении двухслойных экранов W/Al с толщинами отдельных слоев по 50 мкм показал, что характер преобразования спектров протонов зависит от материала первого слоя. Основное преобразование спектра протонов происходит в слое тяжелого элемента, поэтому изменения относительных потоков энергии протонов после прохождения экранов W/Al и Al/W составляли 0,275 и 0,318 единиц соответственно. С увеличением количества слоев до 10 относительный поток энергии прошедших ионов приближался к 0,305, что аналогично сплаву W/Al.

Выводы

1. Рассчитаны линейные и массовые пробеги протонов и ионов аргона в экранах из алюминия, оксида алюминия, висмута и композита W_{77,7}Cu_{22,3}. Показано, что эффективность защиты от высокоэнергетических ионов материалами с большими значениями заряда ядер атомов Z выше с позиции линейных пробега частиц и ниже с позиции массовых пробега, чем материалов с низкими значениями Z .

2. Определена зависимость пороговой энергии от порядкового номера ТЗЧ для экранов из алюминия, висмута и композита W_{77,7}Cu_{22,3}, согласно которой наиболее высокой эффективностью с позиции линейных пробега частиц обладают экраны на основе композита W_{77,7}Cu_{22,3}. Значения пороговых энергий для этого материала толщиной 1,5 мм (2,55 г/см²) при воздействии потоков протонов и ионов He⁺, C⁺, Ne⁺, Ar⁺, Fe⁺, Kr⁺ и Xe⁺ составляют 37 МэВ; 480; 790; 1780; 4770; 7900; 14200 и 27000 МэВ соответственно.

3. Расчет спектров потерь на ионизацию при прохождении как протонов с энергией 20 МэВ, так и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ через многослойные структуры Bi/Al/Al₂O₃ и Al/Al₂O₃/Bi показал, что торможение высокоэнергетических частиц в случае, когда первый слой содержит тяжелый элемент, выше, чем в случае, когда первый слой содержит легкий элемент.

4. Изучено влияние последовательности в расположении и толщины слоев в многослойных структурах системы Bi/Al/Al₂O₃ на эффективность защиты от высокоэнергетических ионов. Показано, что характер зависимостей $R(E)$ и потерь энергии ионов определяются очередностью расположения отдельных слоев, что связано с различием преобразования спектров материалом первого слоя. Более значительные изменения спектров происходят в слое с тяжелым элементом, поскольку ионизационные потери в нем выше, и более высокий уровень ослабления потока энергии соответствует случаю чередования слоев экрана тяжелый элемент/легкий элемент.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Наноматериалы и нанотехнологии» (задание 2.34), Белорусского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ–ОИЯИ №Ф18Д-007), гранта Международной ассоциации ученых (г. Женева, Швейцария).

Acknowledgements

The work was carried out with financial support of State program of scientific research “Physical Materials Science, New Materials and Technologies” subprogram “Nanomaterials and Nanotechnologies” (task 2.34), Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (BRFFR–JINR Grant No. Ф18Д-007), Grant of World Federation of Scientists (Geneva, Switzerland).

Список использованных источников

1. Белоус, А. И. Космическая электроника / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М.: Техносфера, 2015. – Кн. 2. – 732 с.
2. В борьбе с радиацией / Н. А. Василенков [и др.] // Российский космос. – 2015. – № 5 (113). – С. 38–41.
3. RAD-COAT protection [Electronic resource] // SpaceElectronics. – Mode of access: <http://www.spaceelectronics.com> – Date of access: 03.09.2019.
4. RAD-PAK protection [Electronic resource] // Maxwell Technologies, Inc. – Mode of access: <http://www.maxwell/products/microelectronics> – Date of access: 03.09.2019.
5. WALOPACK protection [Electronic resource] // 3D plus electronics. – Mode of access: <http://www.3d-plus.com/> – Date of access: 03.09.2019.
6. Гульбин, В. Н. Разработка композиционных материалов, модифицированных нанопорошками, для радиационной защиты в атомной энергетике / В. Н. Гульбин // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем – 2010: материалы IX Всерос. конф. – Ижевск, 2010. – С. 12–28.
7. Новые материалы локальной радиационной защиты / Г. Ефремов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 1. – С. 34–37.
8. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
9. Гальпер, А. М. Радиационный пояс Земли / А. М. Гальпер // СОЖ. – 1999. – № 6. – С. 75–81.
10. Мирошниченко, Л. И. Космические лучи в межпланетном пространстве / Л. И. Мирошниченко. – М.: Наука, 1973. – 160 с.
11. Новиков, Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учеб. пособие / Л. С. Новиков. – М.: Университет. кн., 2010. – 192 с.
12. Модель космоса / под ред. М. И. Панасюка. – М.: КДУ, 2007. – Т. 1. – 872 с.
13. SRIM-2013 [Electronic resource] / James Ziegler. – Mode of access: <http://www.srim.org> – Date of access: 03.09.2019.
14. Егранов, А. В. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния: учеб. пособие / А. В. Егранов. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2013. – Ч. 2: Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. – 115 с.
15. Математическое моделирование свойств неоднородных структур для систем радиационной защиты / Н. П. Чирская [и др.] // Радиационная физика твердого тела: тр. XXI Междунар. конф. – М.: ГНУ «НИИПМТ», 2011. – Т. 2. – С. 436–443.

References

1. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. *Space Electronics*. Moscow, Technosfera Publ., 2015. 732 p. (in Russian).
2. Vasilenkov N. A., Grabchikov S. S., Maksimov A. Y., Lastovskii S. B. In the fight against radiation. *Rossiiskii kosmos* [Russian Space], 2015, no. 5, pp. 38–41 (in Russian).
3. RAD-COAT protection. *SpaceElectronics*. Available at: <http://www.spaceelectronics.com> (accessed 3 September 2019).
4. RAD-PAK protection. *Maxwell Technologies, Inc.* Available at: <http://www.maxwell/products/microelectronics> (accessed 3 September 2019).
5. WALOPACK protection. *3D plus electronics*. Available at: <http://www.3d-plus.com> (accessed 3 September 2019).
6. Gulbin V. N. The development of composite materials modified with nanopowders for radiation protection in nuclear power. *Fizikochimiya ultradispersnih (nano-) system – 2010: materialy IX Vserossiiskoi konferencii* [Physicochemistry of ultrafine (nano) systems – 2010: Proceedings of the IX All-Russian Conference]. Izevsk, 2010, pp. 12–28 (in Russian).
7. Efremov G. A., Yepifanovskiy I. S., Shirayayev A. V., Zabolotnyy V. T., Mileev V. N., Novikov L. S. New materials of local radiation protection. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2003, no. 1, pp. 34–37 (in Russian).
8. Raikunov G. G. (ed.). *Ionizing Radiation of Outer Space and their Impact on the Onboard Equipment of Spacecraft*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. (in Russian).
9. Galper A. M. Earth Radiation Belt. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*, 1999, no. 6, pp. 75–81 (in Russian).
10. Miroshnichenko L. I. *Space Rays in Interstellar Space*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 160 p. (in Russian).
11. Novikov L. S. *Radiation Impact on the Space Aircrafts Materials*. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2010. 192 p. (in Russian).
12. Panasuk M. I. (ed.). *Model of Space*. Moscow, KDU Publ., 2007. 872 p. (in Russian).
13. Ziegler J. *SRIM-2013*. Available at: <http://www.srim.org>. (accessed 3 September 2019).
14. Egranov A. V. *Methods of Experimental Condensed Matter Physics. Part 2: Interaction of Ionizing Radiation with Matter*. Irkutsk, Irkutsk State University, 2013. 115 p. (in Russian).
15. Chirskaya N. P., Voronina E. N., Mileev V. N., Novikov L. S., Sinolits V. V. Mathematical modeling of the properties of heterogeneous structures for radiation protection systems. *Radiatsionnaya fizika tverdogo tela: trudy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii. T. 2* [Solid State Radiation Physics: Proceedings of the 21 International Conference. Vol. 2]. Moscow, 2011, pp. 436–443 (in Russian).

Информация об авторах

Грabcиков Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Грabcикова Елена Александровна – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grabchikova_e@bk.ru

Васин Денис Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: d.s.vasin@outlook.com

Тишкевич Дарья Ивановна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dashachushkova@gmail.com

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Якушевич Анна Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by

Богатырев Юрий Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogat@physics.by

Калагин Игорь Владимирович – кандидат технических наук, начальник научно-технологического отдела ускорителей лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований (ул. Ж. Кюри, 6, 141980, Дубна, Российская Федерация). E-mail: kalagin@jinr.ru

Митрофанов Семен Вячеславович – начальник группы радиоактивных пучков научно-технологического отдела ускорителей лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований (ул. Ж. Кюри, 6, 141980, Дубна, Российская Федерация). E-mail: mitrofanov@jinr.ru

Information about the authors

Sergey S. Grabchikov – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Elena A. Grabchikova – Junior Researcher of the Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grabchikova_e@bk.ru

Denis S. Vasin – Junior Researcher of the Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: d.s.vasin@outlook.com

Daria I. Tishkevich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dashachushkova@gmail.com

Stanislav B. Lastovski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Anna S. Yakushevich – Junior Researcher of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by

Yrii V. Bogatyrev – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogat@physics.by

Igor V. Kalagin – Ph. D. (Engineering), Head of the Scientific and Technological Department of Accelerators of the Laboratory of Nuclear Reactions named after G.N. Flerov, Joint Institute of Nuclear Research (6, J. Curie Str., 141980, Dubna, Russian Federation). E-mail: kalagin@jinr.ru

Semen V. Mitrofanov – Head of the Group of Radioactive Beams of the Scientific and Technological Department of Accelerators of the Laboratory of Nuclear Reactions named after G.N. Flerov, Joint Institute of Nuclear Research (6, J. Curie Str., 141980, Dubna, Russian Federation). E-mail: mitrofanov@jinr.ru