

Аладаилах М.В., Ширманов И.А., Стругов Е.Д., Таишыков О.Л.,  
Эке К., Илдырым А.

## ОЦЕНКА РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PHY-X И ИМИТАЦИОННОГО КОДА GEANT4

*Аннотация.* Представлены результаты оценки экранирующих способностей стёкол, содержащих различные соотношения оксида иттрия Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и оксида марганца MnO<sub>2</sub> по отношению к гамма-излучению с помощью программного обеспечения Phy-X и платформы моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество Geant4 в диапазоне энергий от 0,1218 до 1,4580 МэВ. Представлены результаты расчетов массового коэффициента ослабления и слоя половинного ослабления для исследуемых образцов стекол.

*Ключевые слова:* массовый коэффициент ослабления, имитационный код Geant4, экранирующие способности, радиационная защита.

*Abstract.* The results of evaluating the screening capabilities of glasses containing different ratios of yttrium oxide Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and manganese oxide MnO<sub>2</sub> in relation to gamma radiation using the Phy-X software and a platform for modeling the processes of passage of elementary particles through the Geant4 substance in the energy range from 0,1218 to 1,4580 MeV. The results of calculations of the mass attenuation coefficient and the half-attenuation layer for the studied glass samples are presented.

*Key words:* mass attenuation coefficient, Geant4 simulation code, shielding capabilities, radiation protection.

### Введение

Широкое применение ядерной энергии во всем мире влечет за собой развитие материалов радиационной защиты. Существует три способа снижения влияния ионизирующего излучения на человека. Это воздействие на фактор времени, расстояния и радиационный параметр [1]. Радиационный параметр подразумевает использование различных вариантов снижения уровня излучения от радиоактивного источника путем использования экранирования, дезактивации и других вариантов. Экранирование является наиболее распространенным способом снижения облучаемости человека [2].

Стоимость защиты современных ядерно-технических установок может составлять 20-30% стоимости сооружения, при этом толщина защиты может достигать больших размеров [3]. Поэтому оптимизация состава радиационно-защитных материалов является важным мероприятием с целью снижения общей стоимости радиационной защиты при максимальных показателях защитных свойств материалов [4]. При этом большое внимание уделяется стеклам,

композитам, бетонам, полимерам и природным материалам, которые могут быть использованы как защитные материалы от ионизирующего излучения [5].

Стекла являются перспективными материалами, обладающими высокой радиационной стойкостью благодаря своему составу. Они могут использоваться в различных отраслях атомной энергетики, где есть необходимость визуального контроля радиоактивного источника.

В настоящее время многие ученые мира, в том числе и Уральского федерального университета, проводят расчетно-экспериментальные исследования в области оптимизации состава защитных стекол [6], [7], [8], [9]. При этом используются стеклообразующие вещества на основе оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{BaO}$  с применением добавок в виде  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и др. При выборе материала состава стекол необходимо учитывать несколько факторов: окраску, присущую самому стеклу, окраску, вызванную гамма-излучением и устойчивость этой приобретенной окраски при комнатной температуре [10]. Некоторые физические свойства стекол могут быть улучшены с помощью применения определенных добавок в их состав.

Данная работа направлена на исследование радиационно-защитных способностей стекол  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$  при различном массовом составе оксида иттрия  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и оксида марганца  $\text{MnO}_2$  [11]. Для этого были рассчитаны параметры экранирования излучения, такие как массовый коэффициент ослабления  $\mu_m$  (MAC – mass attenuation coefficient), линейный коэффициент ослабления  $\mu$  (LAC – linear attenuation coefficient), слой половинного ослабления  $\Delta_{0,5}$  (HVT – half value thickness), средняя длина свободного пробега (MFP – mean free path), эффективный атомный номер ( $Z_{\text{eff}}$  – effective atomic number) в диапазоне энергий 0,1218-1,4580 МэВ.

### **Материалы и методика эксперимента**

В данной работе рассматриваются стекла с различным содержанием составных компонентов  $(20-x)\text{Y}_2\text{O}_3\text{-}x\text{MnO}_2\text{-}20\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\text{SiO}_2\text{-}20\text{CaO}$ ; ( $x = 5, 10, 15$  и  $20$  моль. Данные по химическому составу образцов стекол для оценки их радиационно-защитных характеристик взяты из работы [11] и представлены в табл. 1.

Geant4 – это платформа моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество на основе кода Монте-Карло. Он используется во многих областях, связанных с использованием ядерной энергии и т. д. [12]. В данной работе Geant4 использовался для моделирования прохождения гамма-лучей через исследуемые образцы стекол. При моделировании в Geant4 были взяты стеклянные образцы YM1, YM2, YM3, YM4 в виде кубов с ребрами 5 см (рис. 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемых образцов стекол

Образец	Химическая формула	Химический состав каждого образца (мол.%)					
		Al	Si	Ca	Y	Mn	O
YM1	15Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5MnO <sub>2</sub> - 20Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -40SiO <sub>2</sub> -20CaO	0,1150	0,1197	0,0854	0,2842	0,0293	0,3665
YM2	10Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -10MnO <sub>2</sub> - 20Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -40SiO <sub>2</sub> -20CaO	0,1242	0,1293	0,0922	0,2046	0,0632	0,3866
YM3	5Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -15MnO <sub>2</sub> - 20Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -40SiO <sub>2</sub> -20CaO	0,1350	0,1405	0,1002	0,1112	0,1030	0,4101
YM4	20MnO <sub>2</sub> -20Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 40SiO <sub>2</sub> -20CaO	0,1478	0,1538	0,1098	0	0,1505	0,4382

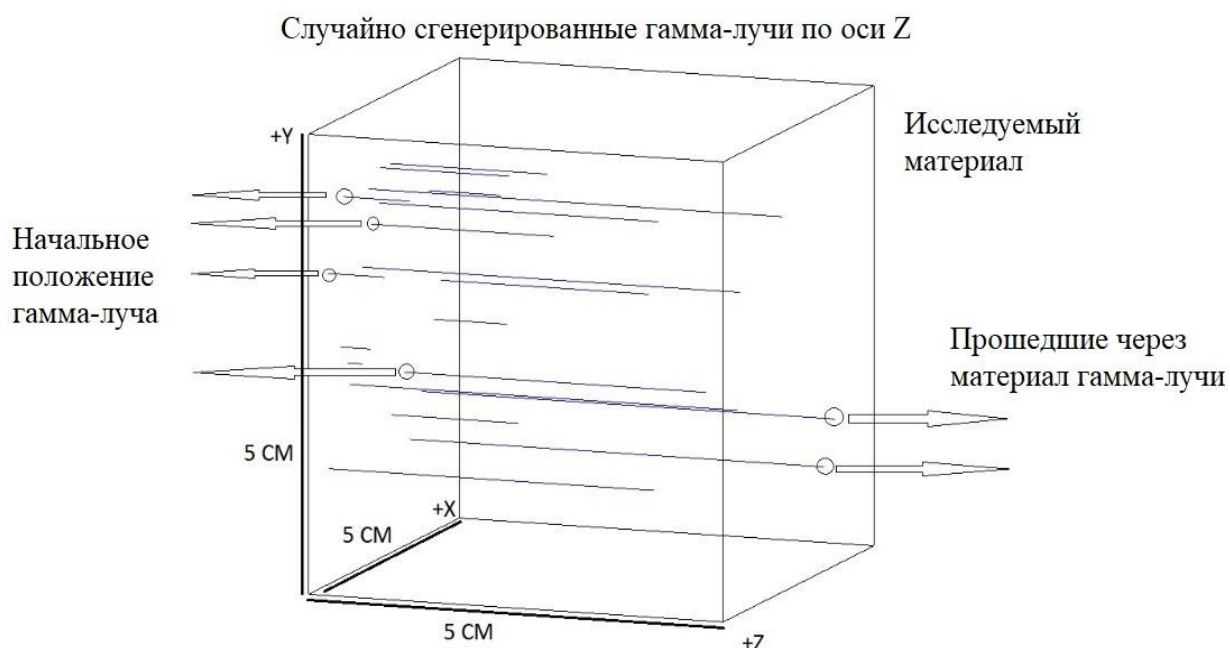


Рисунок 1 – Геометрия расчета исследуемого образца

После того как материалы были смоделированы в соответствии с соотношениями элементов и соединений, расчетный код случайным образом генерирует гамма-лучи, начиная с обратной стороны куба вдоль оси z (рис. 1). Чтобы получить статистически значимые результаты, для каждой энергии генерируется  $10^6$  гамма-лучей. В конце моделирования для расчета коэффициентов затухания использовались неизменные гамма-лучи, которые достигали передней стороны куба без каких-либо взаимодействий.

### Теоретические основы

Параметры радиационной защиты гамма-излучения необходимо рассчитать для определения защитных характеристик выбранных стекол. Массовый коэффициент ослабления ( $\mu_m$ ) и линейный коэффициент ослабления ( $\mu$ ) являются основными параметрами защиты, они используются для оценки способности

исследуемых композитов ослаблять падающее гамма-излучение. определяемыми следующими уравнениями (1) и (2):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (1)$$

где  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  – массовый коэффициент ослабления  $i$ -го составного элемента,  $w_i$  – массовая доля  $i$ -го составного элемента.

$$\mu = -\frac{1}{x} \ln \left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2)$$

где  $I_0$  – интенсивность радиоактивного источника без экранирующего материала,  $I$  – интенсивность радиоактивного источника с экранирующим материалом,  $x$  – толщина экранирующего поглотителя (см).

Слой половинного ослабления ( $\Delta_{0,5}$ ) представляет собой необходимую толщину экранирующего материала для уменьшения интенсивности излучения до половины от его начального значения [13]. Образец, обладающий лучшими характеристиками, такими как слой половинного ослабления (HVT) и средней длины свободного пробега (MFP) является наиболее эффективным для радиационной защиты. Данные параметры рассчитываются с использованием линейного коэффициента ослабления, как указано в уравнениях 3, 4 соответственно:

$$HVT = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3)$$

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

где  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления.

Эффективный атомный номер ( $Z_{eff}$ ) был вычислен с помощью уравнения (5) следующим образом [14]:

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu_m)_i}{\sum_j \frac{A_j}{Z_j} (\mu_m)_j} \quad (5)$$

где  $A_i$  – атомная масса  $i$ -го составного элемента,  $f_i$  – массовую долю  $i$ -го элемента,  $Z_i$  – атомный номер  $i$ -го элемента,  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  – массовый коэффициент ослабления  $i$ -го составного элемента образца стекла соответственно.

Аналогично, эффективная электронная плотность вычисляется с помощью уравнения (6), основанного на уравнении (5) [15]:

$$N_{eff} = N_a \frac{Z_{eff}}{\langle A \rangle} \quad (6)$$

где  $\langle A \rangle = \sum_i A_i f_i$  – средняя атомная масса,  $N_a$  – число Авогадро.

### Результаты и обсуждение

Характеристики экранирования гамма-излучения были смоделированы для четырех исследуемых образцов в диапазоне энергий 0,1218-1,4580 МэВ. Массовый коэффициент ослабления и другие экранирующие свойства рассчитаны теоретически с использованием программы Phy-x и Geant4.

На (рис. 2, б) показаны сравнения значений линейного коэффициента ослабления, полученных с использованием программного обеспечения Phy-X и системы библиотек для компьютерного моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество Geant4. Из сравнения видно, что моделируемые и рассчитанные значения схожи друг с другом в области высоких энергий, что подтверждает достоверность процессов моделирования. В диапазоне энергий 0,122-0,22 МэВ наблюдается расхождение полученных результатов с помощью моделирования в Geant4 и расчета в Phy-X на 20%.

Значения линейного коэффициента ослабления достигают максимума при низкой энергии гамма-фотонов 0,122 МэВ где преобладает фотоэлектрическое взаимодействие и находятся в диапазоне между  $1,0109 \text{ см}^{-1}$  и  $0,5655 \text{ см}^{-1}$  для исследуемых образцов YM1 и YM4. Дальнейшее увеличение энергии падающего гамма-излучения приводит к быстрому снижению линейного коэффициента ослабления из-за фотоэлектрического взаимодействия, поперечное сечение взаимодействия которого пропорционально  $E^{-3.5}$  [16].

При энергии гамма-излучения в диапазоне от 0,27 МэВ до 1,45 МэВ наблюдалось постепенное уменьшение значения линейного коэффициента ослабления с увеличением энергии падающего гамма-излучения, что связано с преобладанием комптоновского рассеяния. Более низкие значения линейного коэффициента ослабления достигаются при энергиях выше 1,45 МэВ. По результатам исследования самое наибольшее значение LAC в диапазоне энергий 0,6617-1,4580 МэВ получено для образца YM3 (содержание  $\text{MnO}_2$  15 масс.%).

Также были рассчитаны значения массового коэффициента ослабления для выбранных образцов стекол (рис. 2, *a*). Из расчетов видно, что массовый коэффициент ослабления исследуемых образцов уменьшается при увеличении энергии фотонов. Это уменьшение связано с комптоновским рассеиванием, имеющим сечение пропорционально  $E^{-1}$  [17]. Образец УМ1 имеет самый высокий  $\mu_m$  в энергетической области 0,1218-0,4440 МэВ, это связано с преобладанием фотоэлектрического взаимодействия в этой низкоэнергетической области. При энергиях выше 0,1218 МэВ массовые коэффициенты ослабления начинают резко снижаться из-за проявления комптоновского рассеяния. Согласно результатам, полученным с помощью моделирования в Geant4,  $\mu_m$  образца УМ3 имеет большие значения среди всех исследуемых стекол при значении энергии от 0,3443 МэВ до 0,6617 МэВ. Массовый коэффициент ослабления УМ4 имеет наибольшее значение в диапазоне энергий 0,7789-1,458 МэВ.

Одними из основных параметров радиационной защиты являются слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега. Данные параметры были рассчитаны на основе линейного коэффициента ослабления и представлены на (рис. 3). Слой половинного ослабления является основным параметром, который указывает на необходимую толщину материала для снижения уровня излучения на половину [18]. Согласно результатам Geant4 слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега увеличиваются по мере увеличения энергии гамма-излучения. Образец стекла УМ1 имеет наименьшее значение слоя половинного ослабления и средней длины свободного пробега при энергии от 0,1218 до 0,2447 МэВ. Образец стекла УМ2 имеет наименьшие значения данных параметров в диапазоне энергий 0,283-0,444 МэВ, а УМ3 имеет наименьшее значения слоя половинного ослабления и средней длины свободного пробега в диапазоне энергий 0,662-1,458 МэВ. Образец стекла УМ4 имеет наибольшие показатели данных параметров на всем исследуемом диапазоне энергий, что говорит о его худших радиационно-защитных свойствах, по сравнению с другими исследуемыми образцами стекол.

Значения эффективного атомного номера ( $Z_{eff}$ ) были получены с помощью программного обеспечения Phy-x. Полученные значения эффективного атомного номера приведены на (рис. 3, *a*). Образец стекла УМ1 имеет самое высокое значение эффективного атомного номера на всем исследуемом диапазоне энергий, при этом образец стекла УМ4 имеет наименьшее значения эффективного атомного номера на данном диапазоне. Из (рис. 3, *a*) видно, что значения эффективного атомного номера уменьшаются с увеличением энергии фотона в диапазоне энергий от 0,1218 до 0,4440 МэВ. При энергиях выше 0,4440 МэВ значения эффективного атомного номера приобретают постоянное значение, что связано с доминированием комптоновского рассеяния в этом энергетическом диапазоне [19]. Эффективная

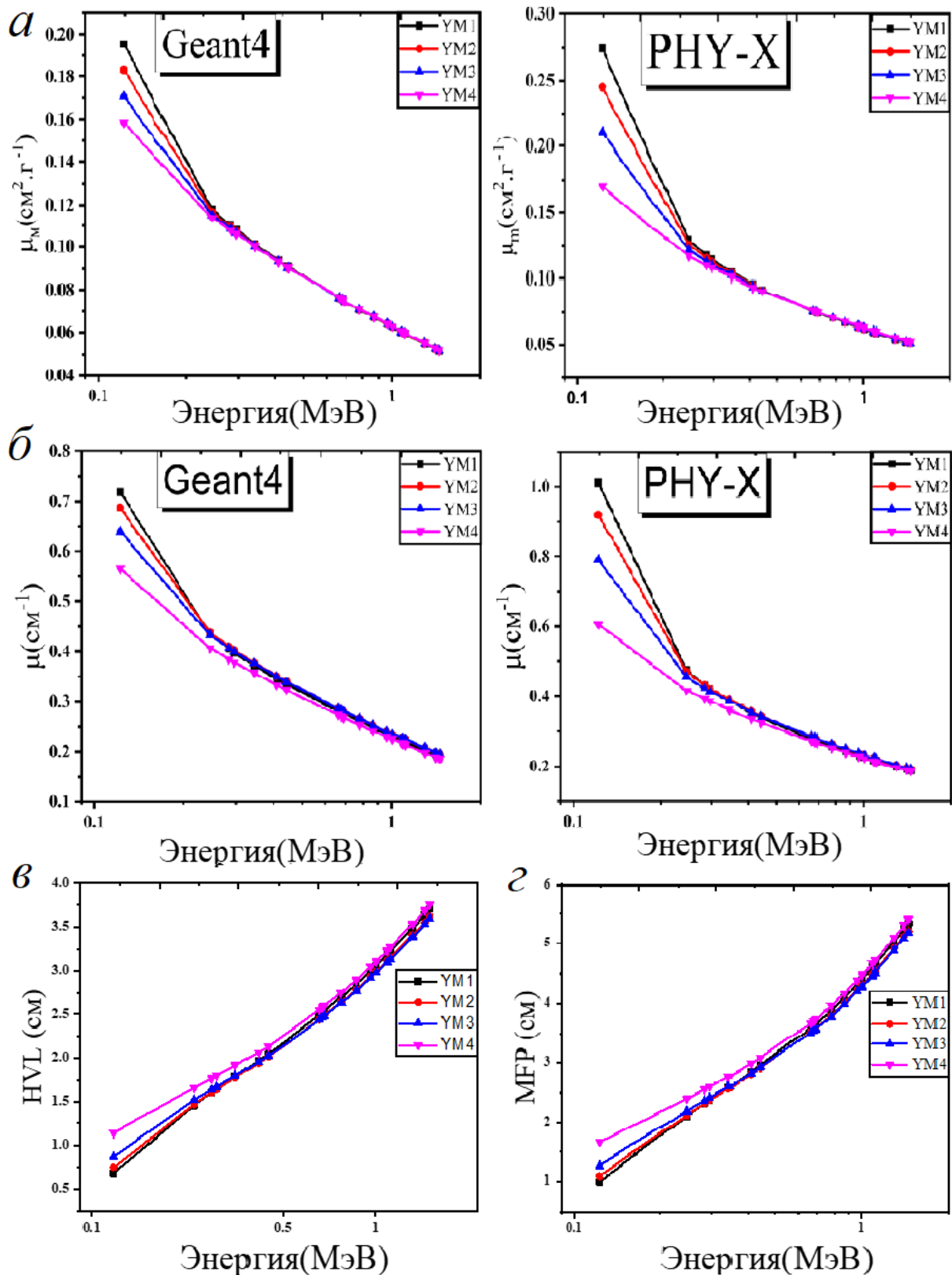


Рисунок 2 – Защитные характеристики образцов стекол YM1-YM4:  
*a* – массовый коэффициент ослабления; *б* – линейный коэффициент ослабления; *в* – слой половинного ослабления; *з* – средний свободный путь

электронная плотность исследуемых стекол рассчитана и приведена на (рис. 3, б). Значения эффективного атомного номера резко снижаются от начала исследуемого диапазона до энергии 0,2835 МэВ. При энергиях свыше 0,2835 МэВ значения эффективного атомного номера приобретают постоянные значения. Образец стекла YM1 обладает самыми высокими значениями эффективного атомного номера в диапазоне энергий 0,1218-0,444 МэВ, при энергиях больше 0,6617 МэВ образец стекла YM4 обладает самыми высокими значениями эффективного атомного номера среди исследуемых стекол.

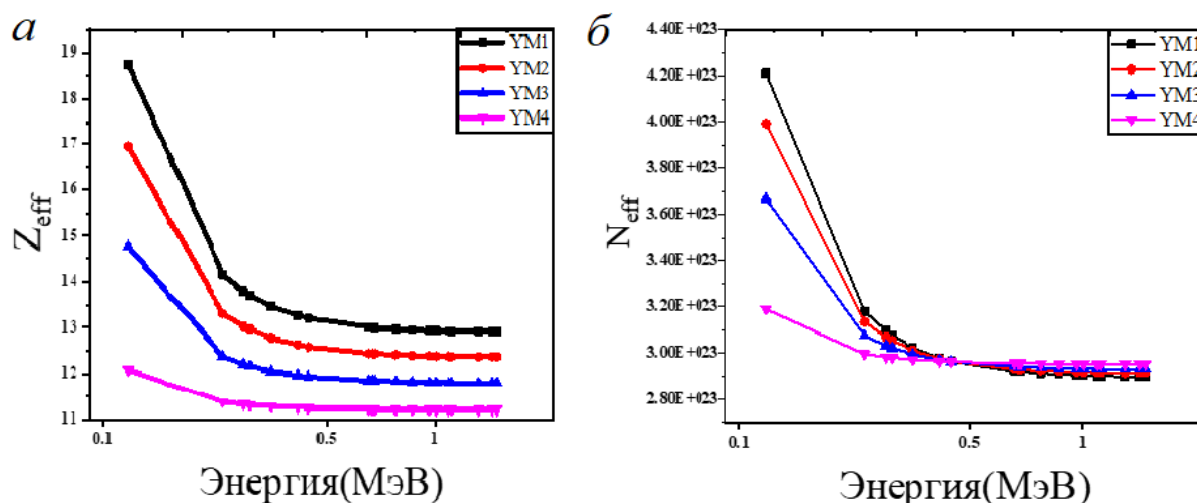


Рисунок 3 – Эффективный атомный номер (а) и эффективная электронная плотность (б) исследуемых стекол

### Заключение

С помощью программного обеспечения Phy-X и платформы моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество Geant4 в диапазоне энергий от 0,1218 до 1,4580 МэВ были исследованы радиационно-защитные способности стекол с различным содержанием составных компонентов  $(20-x)Y_2O_3-xMnO_2-20Al_2O_3-40SiO_2-20CaO$ ; ( $x = 5, 10, 15$  и  $20$  моль%). Рассчитанные параметры радиационной защиты, такие как массовый коэффициент ослабления и линейный коэффициент ослабления исследуемых стекол (YM1-YM4) уменьшаются по мере увеличения энергии фотонов.

Образец стекла YM4 с наибольшим содержанием  $MnO_2$  имеет максимальное значение коэффициента массового ослабления в области энергий от 0,678 МэВ до 1,458 МэВ и колеблется от  $0,076 \text{ см}^2/\text{г}$  до  $0,052 \text{ см}^2/\text{г}$ . Аналогично можно сказать про линейный коэффициент ослабления, по результатам исследования самое наибольшее значение линейного коэффициента ослабления в диапазоне энергий 0,6617-1,4580 МэВ получено для образца YM3 (содержание  $MnO_2$  15 масс.%).



Слой половинного ослабления и средняя длина свободного пробега увеличивается по мере увеличения энергии фотонов. Наилучшие показатели данных характеристик имеет образец стекла УМЗ в диапазоне энергий 0,662-1,458 МэВ. Значения для слоя половинного ослабления варьировались от 2,43 см до 3,59 см, а для средней длины свободного пробега от 3,513 см до 5,189 см при данном диапазоне энергий.

Результаты показали эффективность добавления  $MnO_2$  и  $Y_2O_3$  в состав стекол для улучшения их радиационно-защитных свойств. Среди исследуемых вариантов стекол образцы УМЗ и УМ4 обладают наилучшими радиационно-защитными свойствами.

Исследование стекол в качестве радиационной защиты является весьма перспективным мероприятием и будет продолжено в дальнейшем.

### *Библиографический список*

1. Наумов А. А. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС / А. А. Наумов, О. Л. Ташлыков // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 80–88.
2. Новиков Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4.
3. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 495 с.
4. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 393–401.
5. Оптимизация состава гомогенных радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, И. М. Русских [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 233–236.
6. Tailor made barium borate doped  $Bi_2O_3$  glass system for radiological protection / O. L. Tashlykov, M. I. Sayyed, K. A. Mahmoud [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. – 2021. – Vol. 187. – P. 109558.
7. The radiation-shielding properties of ternary  $SiO_2$ – $SnO$ – $SnF_2$  glasses: Simulation and theoretical study / F. I. El-Agawany, O. L. Tashlykov, K. A. Mahmoud, Y. Rammah // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, Iss. 15. – P. 23369–23378.
8. Repercussions of yttrium oxides on radiation shielding capacity of sodium-silicate glass system: experimental and Monte Carlo simulation study / O. L. Tashlykov, S. G. Vlasova, I. S. Kovyazina, K. A. Mahmoud // The European Physical Journal Plus. – 2021. – Vol. 136. – P. 428.
9. Tailor made barium borate doped  $Bi_2O_3$  glass system for radiological protection / O. L. Tashlykov, K. A. Mahmoud, S. G. Vlasova [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. – 2021. – Vol. 187. – P. 109558.
10. Стефенсон Р. Введение в ядерную технику / Р. Стефенсон. – Москва : Гос. изд-

во техн.-теорет. лит., 1956. – 494 с.

11. Bansal N. G. Braunite phase embedded  $Y_2O_3$ - $MnO_2$ - $Al_2O_3$ - $CaO$ - $SiO_2$  glass ceramics and their properties / N. Bansal, G. Kaur, K. Singh // *Materials Research Bulletin*. – 2018. – Vol. 98. – P. 34–40.
12. GEANT4-a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. R. Allison, K. Amako [et al.] // *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2003. – Vol. 506, Iss. 3. – P. 250–303. – URL: <https://geant4.web.cern.ch/> (date of access: 13.01.2021).
13. Photon cross-section measurements at low energies in some bromides / A. T. L. Tan, V. Lakshminarayana, I. S. Giles, A. Rajaratnam // *Il Nuovo Cimento A*. – 1988. – Vol. 99, Iss. 5. – P. 587–594.
14. Спайерс В. Эффективный атомный номер и поглощение энергии в тканях / В. Спайерс // *Британский журнал радиологии*. – 1946. – Т. 19. – С. 52–63. – URL: [https://ru.qaz.wiki/wiki/Effective\\_atomic\\_number](https://ru.qaz.wiki/wiki/Effective_atomic_number) (дата обращения: 13.01.2021).
15. Photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some thermoluminescent dosimetric compounds / S. Gowda, S. Krishnaveni, T. Yashoda [et al.]. – DOI 10/1007/BF02704481 // *Pramana*. – 2004. – Vol. 63, Iss. 3. – P. 529–541.
16. Gamma-ray attenuation coefficients and transmission thickness of high consistency heavyweight concrete containing mineral admixture / H. S. Gökçe, B. C. Ozturk, N. F. Cam [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2018. – Vol. 92. – P. 56–69.
17. Evaluation of nuclear radiation shielding competence for ternary Ge–Sb–S chalcogenide glasses / F. I. El-Agawany // *Applied Physics A*. – 2020. – Vol. 126. – P. 258.
18. Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material / R. Biswas, H. Sahadath, A. S. Mollah, Md. F. Hug // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 26–34.
19. Investigations of radiation shielding using Monte Carlo method and elastic properties of  $PbO$ - $SiO_2$ - $B_2O_3$ - $Na_2O$  glasses / S. A. Issa, Y. B. Saddeek, H. O. Tekin [et al.] // *Current Applied Physics*. – 2018. – Vol. 18. – P. 717–727.