

ВЛИЯНИЕ АЛЬФА-РАСПАДА ^{238}Pu НА СВОЙСТВА БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ОДЦ ФГУП ГХК¹

© 2023 г. А. С. Алой^а, Н. Ф. Карпович^{а,*}, Т. И. Кольцова^а,
А. А. Мурзин^а, П. В. Сластихина^а, Д. М. Яндаев^б, О. С. Дмитриева^б

^а Радиевый институт им. В.Г. Хлопина,
194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр., д. 21

^б Научно-исследовательский институт атомных реакторов,
433507, Димитровград Ульяновской обл., Западное шоссе, д. 9

*e-mail: knf@khlopin.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022, после доработки 07.02.2023, принята к публикации 07.02.2023

Исследовано влияние интенсивного альфа-излучения ^{238}Pu (содержание в стекле до 4.0 мас%) на свойства боросиликатного стекла (БСС) опытно-демонстрационного центра горно-химического комбината по переработке ОЯТ (ОДЦ ГХК). Характеристики БСС исследовали сразу после получения образцов и по мере набора дозы за счет альфа-распадов в единице объема образца ($\alpha/\text{см}^3$). Однородность распределения ^{238}Pu в образцах подтверждали методами авторадиографии и разрушающего химического анализа с α -спектрометрическим окончанием. Плотность образцов БСС находилась в диапазоне 2.71–2.72 г/см³ в зависимости от содержания плутония и не менялась со временем. Скорость выщелачивания ^{238}Pu на 28-е сутки при 90°C у двух параллельных образцов стекла с кумулятивной дозой $1.70 \times 10^{18} \alpha/\text{см}^3$ составляла $5.0 \times 10^{-7} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$, что соответствует величинам, регламентированным требованиям НП-019-15. Аморфная структура образца сохранилась при дозовой нагрузке $3.2 \times 10^{18} \alpha/\text{см}^3$ стекла, плотность его не претерпела изменений, поверхность обладает стеклянным блеском. Дефекты в виде трещин, сколов и помутнений на ней отсутствуют.

Ключевые слова: боросиликатное стекло, изотоп ^{238}Pu , радиационная устойчивость, альфа-распад.

DOI: 10.31857/S003383112303005X, **EDN:** ENRJZR

ВВЕДЕНИЕ

Технология остекловывания жидких высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) используется в ряде стран (Франция, Россия, США, Великобритания, Япония и т.д.) в промышленном масштабе уже более 30 лет. Тем не менее, исследования по совершенствованию технологий, включая выбор состава матрицы и обоснования их долговременной устойчивости во временном интервале до 10^4 лет и более, непрерывно продолжаются [1].

Для промышленного применения в России состав БСС был разработан и испытан на модельных

составах для иммобилизации ВАО, образующихся по базовой технологии переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) ВВЭР-1000 на ОДЦ ГХК [2]. В результате исследований было показано [3], что основные физико-химические характеристики модельных БСС соответствуют критериям качества в соответствии с нормативными требованиями [4]. При переходе к исследованиям радиационной устойчивости данной матрицы были проведены расчеты дозовой нагрузки от каждого вида излучения в отдельности для остеклованных ВАО на период до 10^4 лет с учетом как технологических параметров, так и геометрических размеров бидона со стеклом.

С использованием программного средства SCALE/Origen [5] было установлено, что погло-

¹ По материалам доклада на X Российской конференции с международным участием «Радиохимия-2022» (Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2022 г.)

Таблица 1. Состав модельного стекла по расчету, мас%

Компоненты БСС	Содержание, мас%
SiO_2	45.60
B_2O_3	14.50
Al_2O_3	3.40
Оксиды щелочных металлов (Li, Na, Cs)	18.54
Оксиды щелочноземельных металлов (Ca, Sr, Ba)	4.90
Оксиды редкоземельных металлов (La, Nd)	4.00
Оксиды переходных металлов (Fe, Mn, Cr, Ni)	4.56
PuO_2	4.50
Σ	100.00

ценная доза в объеме бидона со стеклом базового состава ОДЦ ГХК за 10^4 лет от α -излучения составляет величину до 4.8×10^9 Гр, что соответствует 5.3×10^{18} $\alpha/\text{г}$ стекла [6].

Согласно многочисленным зарубежным исследованиям, макроскопические свойства стекломатрицы (плотность, твердость, модуль Юнга, химическая устойчивость и т.д.) стабилизируются при накоплении интегральной дозы от 1.0×10^{18} до 2.0×10^{18} $\alpha/\text{г}$ матрицы, после чего наступает баланс между образованием дефектов и их реставрацией [7–9]. При этом отмечается отсутствие влияния скорости накопления дозы на конечный результат, что позволяет использовать ускоренное моделирование α -распада для набора необходимой дозовой нагрузки в приемлемые промежутки времени.

Метод с введением в стекло относительно короткоживущих изотопов ^{238}Pu ($T_{1/2} = 87.7$ года) или ^{244}Cm ($T_{1/2} = 18.1$ года) в более высоких концентрациях по сравнению с обычным их содержанием в остеклованных ВАО лежит в основе международного стандарта для испытаний радиационной и ионизационной стабильности отвержденных радиоактивных отходов [10].

Достоинство такого подхода в случае α -распада по сравнению с внешним облучением обусловлено одновременным воздействием α -частиц и ядер отдачи на структуру матрицы. С использованием данного метода проводятся исследования БСС в США, Франции и т.д. [11–13].

В российском ГОСТ [14] по определению долговременной устойчивости отвержденных ВАО к α -излучению рекомендованы изотопы ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm и ^{244}Cm .

Нами было решено использовать ^{238}Pu ввиду его большей доступности и меньшей радиотоксичности по сравнению с другими нуклидами из-за отсутствия сопутствующего γ -излучения.

Целью настоящего исследования было определение радиационной устойчивости БСС базового состава ОДЦ ГХК за счет сохранения показателей качества, таких как однородность, аморфность, плотность и химическая устойчивость, при воздействии α -излучения не менее 10^{18} $\alpha/\text{см}^3$, что является регламентированной величиной согласно нормативам [4].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Подготовка образцов

Для получения БСС с включением до 4.0 мас% ^{238}Pu был использован модельный состав стекла ОДЦ ГХК [3], приведенный в табл. 1.

Процесс синтеза стекла включал подготовку исходной шихты из соответствующих сухих реактивов в виде нитратов, карбонатов и гидроксидов марок х.ч. и ч.д.а., которые в необходимых количествах тщательно перетирали в яшмовой ступке. Сухую шихту переносили в платиновый тигель и добавляли при постоянном перемешивании расчетное количество стабилизированного кремнезоля марки ч.д.а. с содержанием 35 мас% SiO_2 .

Тигель с шихтой выдерживали на песчаной бане до получения сухого остатка, который гомогенизировали длительным перемешиванием. Плутоний вводили в шихту в виде азотнокислого раствора, полученного при растворении порошка $^{238}\text{PuO}_2$ с содержанием изотопа ^{239}Pu менее 1 мас%. Разложение $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ происходит при относительно невысоких температурах с образованием мелкодисперсного химически активного диоксида плутония, что способствует повышению его растворимости в боросиликатном стекле [15].

Платиновый тигель с шихтой, содержащей плутоний, переносили в муфельную печь с программируемым нагревом. На первом этапе производи-

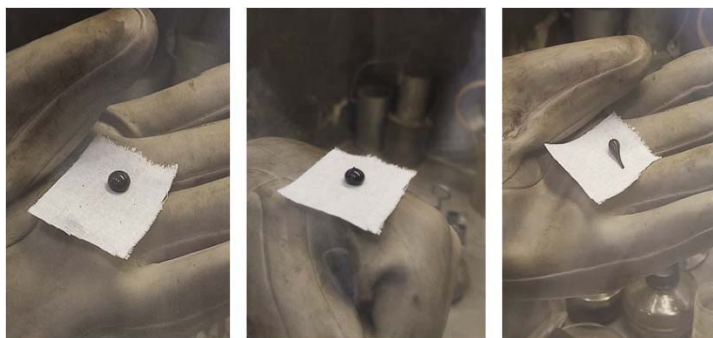


Рис. 1. Фотографии образцов БСС с PuO_2 .

ли кальцинацию исходных солей при температуре 750°C в течение 2 ч, после чего температуру поднимали до 1150°C со скоростью 7.5 град/мин и выдерживали расплав еще 2 ч с периодическим перемешиванием платиновой лопаткой. Перед разгрузкой тигля температуру в муфеле поднимали до 1200°C на 0.5 ч и расплав выливали на горячую стальную пластину в виде гранул. Затем пластину с гранулами отжигали при термостатировании.

Операции по варке стекла с ^{238}Pu и получению образцов в форме гранул проводили в защитном боксе.

Все гранулы имели блестящую поверхность черного цвета (рис. 1). По цвету и отсутствию люминесценции в темноте наше стекло резко отличалось от БСС коричневого цвета с 0.53 мас% ^{238}Pu , которое было синтезировано в работе [16]. Вероятно, различия связаны с высоким содержанием в последнем европия (4 мас%) и неполным его составом по отношению к модельному французскому стеклу SON-68 [17].

Образцы взвешивали, маркировали, помещали в специальные пробирки, на каждый из них оформляли паспорт радионуклидного источника.

Определение изотопного состава и удельной активности образцов

Изотопный состав и удельную активность образцов определяли с использованием спектрометра рентгеновского и гамма-излучения серии DSPeсjr, оснащенного детектором GEM45P4-83. Эффективность регистрации в пике полного поглощения фотонов с энергией 1332 кэВ от точечного источника ^{60}Co , измеренного в стандартной геометрии, – 7.71×10^{-3} имп/Бк (погрешность 4% для $P = 0.95$).

Для снижения погрешностей при измерении активностей вносили поправку на самопоглощение в твердых образцах и проводили калибровку по специально изготовленному эталону. Ошибка измерений не превышала 6%.

Расчет числа распавшихся атомов в образце

Число распавшихся атомов в образце за определенный промежуток времени рассчитывали по формулам (1)–(3).

Число атомов в 1 г ^{238}Pu :

$$N = (m/M) \cdot N_A, \quad (1)$$

где N – число атомов; m – масса, г; M – молярная масса, г/моль; N_A – число Авогадро.

Число атомов, оставшихся на конечный период времени:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где N – число атомов на конечный период времени; N_0 – число атомов на начальный период времени; λ – постоянная распада, с^{-1} ; t – временной период, с.

Число распавшихся атомов за указанный промежуток времени t :

$$N_t = N - N_0, \quad (3)$$

где N_t – число распавшихся атомов за промежуток времени t ; N – число атомов на конечный период времени; N_0 – число атомов на начальный период времени.

Определение массы и плотности образцов

Массу и плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания с помощью аналитических весов Mettler Toledo XP-504,

оснащенных приставкой для гидростатического взвешивания. Процесс измерения плотности автоматизирован, весы делают поправку на плотность используемой жидкости, а также ее температуру по методике ГОСТ [18]. Погрешность измерения составляет 10^{-4} г.

Однородность распределения плутония

Однородность распределения плутония в стекле определяли методами авторадииграфии и радиохимического анализа после растворения его фрагментированных частей.

Авторадииграфию проводили с использованием радиографической пленки Industrex HS800 (Carestream, США, сертификат соответствия № РОСС US.AB86.H07789). Образец фиксировали в кювете, поверхность выравнивали и обмывали этанолом, после чего к поверхности прикладывали пленку в светонепроницаемой упаковке, время экспонирования составляло от 10 до 60 с. Латентное изображение на пленке преобразовывалось в видимое с использованием раствора гидрохинона.

После авторадииграфии распределение плутония в объеме образца определяли путем его фрагментации на 5 частей с последующим растворением каждой части и определением в ней содержания плутония. Фрагментацию осуществляли с помощью алмазного инструмента.

Растворение проводили в HNO_3 (6 моль/л) с добавлением 40%-ного раствора HF при 70°C .

При подготовке мишеней для проведения α -спектрометрии растворы от каждой части разбавляли в 1000 раз. Измерения проводили с использованием спектрометрического устройства СУ-05 и амплитудно-цифрового преобразователя АЦП-8К-42.

Для оценки равномерности распределения ^{238}Pu в образце и выражения величины отклонения от среднего содержания в образце рассчитывали коэффициент вариации по формуле (4):

$$K = (\sigma/x) \times 100\%, \quad (4)$$

где K – коэффициент вариации, %; σ – среднеквадратичное отклонение; x – среднее содержание компонента в образце.

Использование метода радиохимического анализа в совокупности с авторадииграфией дает до-

статочно надежное представление об однородности распределения ^{238}Pu в образце.

Определение фазового состава

Фазовый состав образцов с ^{238}Pu определяли методом рентгенофазового анализа (РФА). Съемку дифрактограмм проводили с плоской донной поверхности образцов на дифрактометре D2 Phaser фирмы Bruker (Германия) и ДРОН-7 (излучение CuK_α с Ni-фильтром). Для съемки на ДРОН-7 на поверхность образца в качестве стандарта наносили алмазный порошок. Для идентификации фазового состава использовали картотеки рентгеновских дифракционных данных JCPDS и PDF-2 ICDD.

Определение химической устойчивости

Химическую устойчивость определяли в соответствии с ГОСТ [14] в бидистиллированной воде при температуре $T = 90 \pm 2^\circ\text{C}$. Параллельно тестировали по 2 образца.

Площадь поверхности образцов рассчитывали на основании линейных размеров (диаметр, высота) и формы исследуемых образцов. В программе SolidWorks были построены 3D геометрические модели. Далее в автоматическом режиме рассчитывали площадь поверхности и объем каждого из образцов. Погрешность рассчитанных таким образом геометрических параметров составляла не более 10% по сравнению с измерением классическим способом (с помощью миллиметровой бумаги или пленки), который был апробирован на неактивных гранулах похожей формы.

Отношение площади поверхности образца к объему раствора составляло $S/V = 1 : 3$. Пробы отбирали на 1-е, 3-е, 7-е, 10-е, 14-е, 21-е и 28-е сутки от начала тестирования.

В день отбора проб образец извлекали, а контактный раствор переносили в предварительно подготовленную емкость. Затем образец промывали свежей порцией воды объемом, равным объему исходного раствора, и добавляли к отобранной пробе. Образец помещали в контейнер и заливали новой порцией воды.

В растворы после выщелачивания образцов добавляли 50 мкл 15 моль/л HNO_3 для предотвра-

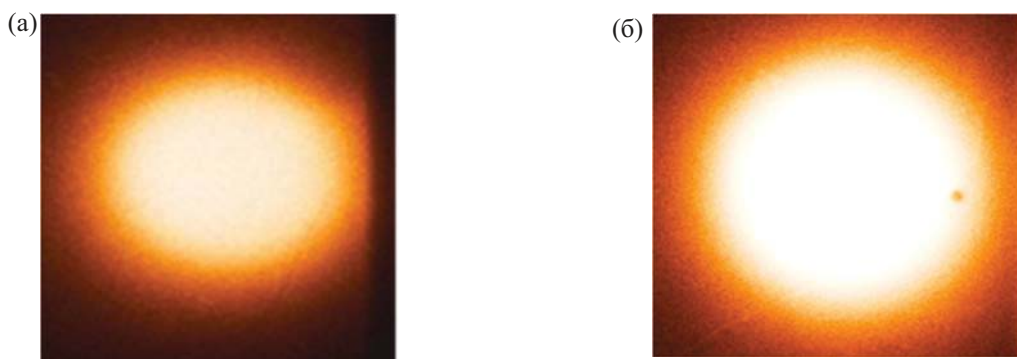


Рис. 2. Сканированный негатив в проходящем свете образца № 2 с кумулятивной дозой $1.16 \times 10^{18} \alpha/\text{см}^3$ (а), образца № 5 с кумулятивной дозой $1.70 \times 10^{18} \alpha/\text{см}^3$ (б), время экспонирования 45 с.

ния гидролиза и сорбции катионов на контактных поверхностях.

Концентрацию ^{238}Pu в контактном растворе определяли методом α -спектрометрии.

Скорость выщелачивания плутония рассчитывали по формуле (5):

$$R_n = A_n / (A_0 S t), \quad (5)$$

где R_n – скорость выщелачивания, $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$; A_n – активность нуклида в контактном растворе за определенный временной интервал, Бк; A_0 – удельная активность (массовая концентрация) нуклида в исходном образце, Бк/г; S – площадь поверхности образца, см^2 ; t – продолжительность n -го периода тестирования, сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После изготовления образцов для каждого из них определяли массу, содержание плутония и удельную α -активность, значения которых приведены в табл. 2.

Образец № 1 предназначен для длительного хранения в контролируемых условиях с целью достижения дозовой нагрузки вплоть до $10^{19} \alpha/\text{см}^3$.

Характеристики образцов исследовали сразу после получения образцов и после выдержки 270, 360 и 800 сут. Сведения о накопленных α -распадах в образцах с разной выдержкой и изученных свойств приведены в табл. 3.

Однородность распределения ^{238}Pu

Результаты авторадииографии образцов №№ 2 и 5 приведены на рис. 2.

Распределение яркости на сканированных негативах в проходящем свете при времени экспонирования 45 с для обоих образцов на рис. 2, (а, б) однородно, вид авторадииограмм не изменился с увеличением дозовой нагрузки, что свидетельствует о равномерном распределении плутония по поверхности образцов.

Таблица 2. Радиационные характеристики образцов БСС с плутонием на момент изготовления

№ образца	$A \times 10^{-9}$, Бк	m , г	Содержание ^{238}Pu , % ^а	Удельная активность $\times 10^{-10}$, Бк/г
1	4.30	0.274	3.10	1.57
2	8.25	0.524	3.76	1.57
3	8.30	0.527	3.13	1.58
4	6.44	0.416	3.08	1.55
5	8.24	0.552	3.22	1.49
6	5.73	0.353	3.34	1.62
7	4.35	0.270	3.15	1.61

^аСодержание ^{239}Pu в ^{238}Pu менее 1 мас%.

Таблица 3. Время хранения образцов, набранная доза и исследованные свойства

Время, сут	Кумулятивная доза 10^{-18} , $\alpha/\text{см}^3$	№ образца	Свойства
30	—	1	Плотность, фазовый состав
270	1.16	2	Плотность, фазовый состав, однородность, химическая устойчивость
		3	
		4	
360	1.70	5	Плотность, фазовый состав, однородность, химическая устойчивость
		6	
		7	
800	3.20	1	Плотность, фазовый состав

Как отмечалось в методике, оба образца после автордиографии были фрагментированы для проведения радиохимического анализа со спектрометрическим окончанием на содержание плутония. В табл. 4 представлены данные α -спектрометрического анализа образцов с разной кумулятивной дозой, рассчитанные значения среднего содержания ^{238}Pu , среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации.

Среднее содержание плутония в образцах №№ 2 и 5 хорошо коррелирует со значениями, полученными путем γ -спектрометрии (табл. 2).

Исходя из представленных в табл. 4 данных распределение плутония по объему образцов можно считать достаточно равномерным и соответствующим регламентированной величине $\pm 10\%$ [4].

Фазовый состав

РФА образцов проводили как сразу после их изготовления, так и по мере выдержки для увеличе-

ния дозовой нагрузки. На рис. 3 приведены дифрактограммы образцов №№ 1, 2 и 5 с разной дозовой нагрузкой.

Из рис. 3 видно, что все образцы с разной дозой от α -излучения сохранили аморфное состояние вплоть до $3.20 \times 10^{18} \alpha/\text{см}^3$.

Отсутствие нарушений однородности распределения плутония в образцах и сохранение их аморфного состояния при дозе $3.20 \times 10^{18} \alpha/\text{см}^3$ соответствует критериям качества, регламентированным в нормативах [4]. В работе [19] показано, что даже при более высоких дозах ($10^{19} \alpha/\text{см}^3$) в БСС с модельными отходами не наблюдались фазовые трансформации или явления кристаллизации.

Плотность

Плотность образцов находилась в пределах $2.710\text{--}2.720 \text{ г/см}^3$ и в основном зависела от количества в них ^{238}Pu , а не от поглощенной дозы. Результаты определения плотности образца № 1 после

Таблица 4. Содержание ^{238}Pu в образцах №№ 2 и 5

№ образца	Кумулятивная доза $\times 10^{-18}$, $\alpha/\text{см}^3$	№ фрагмента	Содержание ^{238}Pu , мас%	Среднее содержание, мас%	σ , мас%	K , %
2	1.16	1	3.43 ± 0.34	3.77	0.21	5.5
		2	3.83 ± 0.38			
		3	3.92 ± 0.39			
		4	4.01 ± 0.40			
		5	3.66 ± 0.37			
5	1.70	1	3.12 ± 0.31	3.22	0.16	4.9
		2	2.97 ± 0.30			
		3	3.36 ± 0.34			
		4	3.28 ± 0.33			
		5	3.39 ± 0.34			

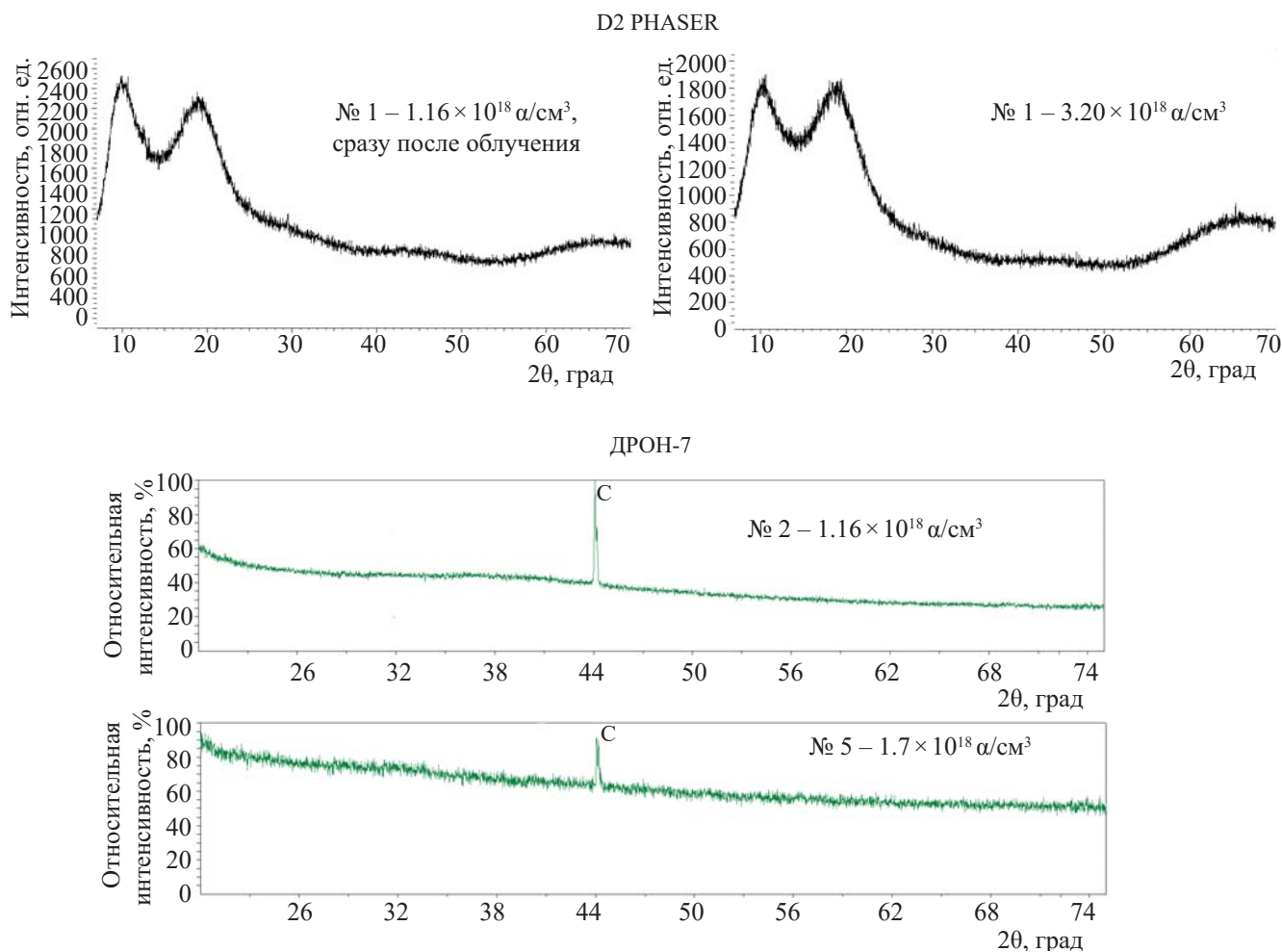


Рис. 3. Дифрактограммы образцов №№ 1, 2 и 5.

800 сут хранения показали, что значения плотности изменились в пределах ошибки взвешивания и составляли 2.718 и 2.716 г/см³.

Согласно работе [20], зависимость изменения плотности БСС от дозы можно представить уравнением

$$\Delta\rho = A[1 - \exp(-BD)], \quad (6)$$

где A – изменение плотности в состоянии равновесия; B – доля стекла, полностью поврежденная от α -распада; D – доза.

Для французского стекла SON68 равновесие между образованием дефектов и их одновременным восстановлением достигается при $\sim 5 \times 10^{18}$ α/см³ [1]. Это приводит к очень незначительным изменениям плотности в пределах $\pm 0.5\%$, что и наблюдается в наших образцах.

Химическая устойчивость

В табл. 5 приведены характеристики образцов и объемы контактного раствора для выщелачивания.

Все гранулы после выщелачивания при $90 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 28 сут сохранили свою целостность, черный цвет и стеклянный блеск (рис. 4).

На рис. 5 приведены графики зависимости скорости выщелачивания плутония от времени для образцов №№ 3 и 4 с кумулятивной дозой 1.16×10^{18} α/см³ и образцов №№ 6 и 7 с кумулятивной дозой 1.70×10^{18} α/см³.

Скорость выщелачивания плутония на 28-е сутки для всех образцов находится в интервале $(1-5) \times 10^{-7}$ г/(см²·сут), что с учетом температурного фактора соответствует нормативному требованию.



Рис. 4. Фото образцов после выщелачивания.

Наши данные по выщелачиванию плутония при 90°C достаточно хорошо коррелируют с результатами работы [21], которые свидетельствуют о высокой химической устойчивости стекла при дозе $1.70 \times 10^{18} \text{ а/см}^3$. В работе [16] в аналогичных условиях скорости выщелачивания плутония были почти на два порядка выше. Авторы предполагают, что такое высокое значение обусловлено гетерогенным распределением плутония в стекле, тогда как в нашем случае оно было достаточно однородным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью изучения влияния интенсивного α -излучения на макроскопические свойства БСС базового состава ОДЦ ГХК были получены образцы в виде стеклогранул, содержащие до 4 мас% ^{238}Pu . Показано, что образцы имеют однородное распределение ^{238}Pu вплоть до дозы $1.7 \times 10^{18} \text{ а/см}^3$. При этом сохраняется аморфное состояние, характерное для гомогенного стекла. Химическая устойчивость при $90 \pm 2^\circ\text{C}$ существенно не изменяется по мере уве-

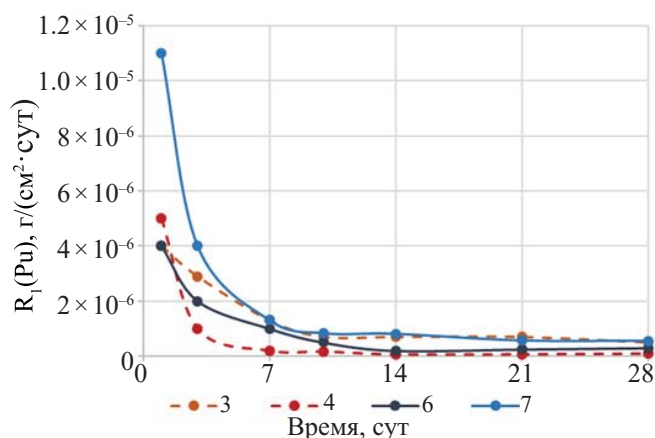


Рис. 5. График зависимости скорости выщелачивания плутония от времени. Цифры у кривых – номера образцов.

личения дозы, и скорости выщелачивания плутония находятся в интервале $(1-5) \times 10^{-7} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$. Образцы после выщелачивания сохранили свой цвет и стеклянный блеск без видимых дефектов на поверхности. Измерения плотности и фазового состояния образца с дозой $3.2 \times 10^{18} \text{ а/см}^3$ после 800 сут хранения указывают на их постоянство. Данный образец подлежит длительному хранению для набора дозы до 10^{19} а/см^3 .

Полученные экспериментальные данные для БСС ОДЦ ГХК соответствуют критерию радиационной устойчивости согласно нормативным требованиям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Радиевого института им. В.Г. Хлопина Васильеву С.К. за проведение гамма-спектрометрического анализа образцов с плутонием и Ковалеву Н.В. за расчеты дозовых нагрузок в стекле при α -распаде плутония.

Таблица 5. Масса, площадь поверхности образцов №№ 3, 4, 6, 7 и объемы контактного раствора

Номер образца	Кумулятивная доза, а/см^3	Масса, г	Площадь поверхности, см^2	Объем контактного раствора, мл
3	1.16×10^{18}	0.527	1.5	4.5
4		0.416	4.0	12.0
6	1.70×10^{18}	0.353	1.1	3.3
7		0.270	1.2	3.6

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gin S., Jollivet P., Tribet M., Peugeot S., Schuller S. // Radiochim. Acta. 2017. Vol. 105, N 11. P. 927.*
2. Федоров Ю.С., Зильберман Б.Я., Пузилов Е.А., Алой А.С., Шадрин А.Ю., Аляпышев М.Ю. // Рос. хим. журн. (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). 2010. Т. LIX, № 3. С. 12.
3. Алой А.С., Трофименко А.В., Кольцова Т.И., Никандрова М.В. // Радиоактивные отходы. 2018. Т. 4, № 5. С. 67.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования безопасности (НП-019-15). М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2015.
5. SCALE Nuclear Systems Modeling & Simulation. Электронный ресурс. <https://www.ornl.gov/scale> (дата доступа: 01.08.2020).
6. Алой А.С., Ковалев Н.В., Блохин А.И., Курьиндин А.В. // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. Т. 98, № 4. С. 61.
7. *E.R. Merz and C.E. Walter. Dordrecht/Boston /London: Kluwer Academic. 73. Publishers. 1996. P. 93–105.*
8. *Mir A.H., Monnet I., Toulemonde M., Bouffard S., Jegou C., Peugeot S. // J. Nucl. Mater. 2016. Vol. 469. P. 244.*
9. *Charpentier T., Martel L., Lutze W. // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. pp. 25499*
10. ISO 6962:2004: Standard Method for Testing the Long-Term Alpha Irradiation Stability of Matrices for Solidification of High-Level Radioactive Waste.
11. *Peugeot S., Broudic V., Jégou C., Frugier P., Roudil D., Deschanel X., Rabiller H., Noel P.Y. // J. Nucl. Mater. 2007. Vol. 362. P. 474.*
12. *Cachia J.-N., Deschanel X., Den Auwer C., Pinet O., Phalippou J., Hennig C., Scheinost A. // J. Nucl. Mater. 2006. Vol. 352. P. 182.*
13. *Weber W., Ewing R., Angell C.A. // J. Mater. Soc. 1997. Vol. 12. P. 1948.*
14. ГОСТ Р 52126-2003. Национальный стандарт Российской Федерации. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания.
15. Алой А.С., Барбанель Ю.А., Колин В.В., Котлин В.П., Трофименко А.В. // Радиохимия. 2000. Т. 42, № 4. С. 83
16. *Zubekhina B.Y., Shiryaev A.A., Burakov B.E., Vlasova, I.E., Averin A.A., Yapaskurt V.O., Petrov V.G. // Radiochim. Acta. 2020. Vol. 108, N 1. P. 19.*
17. *Vernaz E., Gin S., Jegou C., Ribet I. // J. Nucl. Mater. 2001. Vol. 298, N 1–2. P. 27–36.*
18. ГОСТ 9553-2017. Межгосударственный стандарт. Стекло и изделия из него. Метод определения плотности.
19. *Peugeot S., Delaye J.-M., Jégou C. // J. Nucl. Mater. 2014. Vol. 444. P. 76.*
20. *Peugeot S., Cachia J.-N., Jegou C., Deschanel X., Roudil D., Broudic V., Delaye J.M., Bart J.-M. // J. Nucl. Mater. 2006. Vol. 354. P. 1.*
21. *Advocat T., Jollivet P., Crovisier J.L., del Nero M. // J. Nucl. Mater. 2001. Vol. 298. P. 55.*