

УДК: 621.039.7

DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.001

© 2020. Все права защищены.

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОТЛОЖЕНИЯХ, НАКОПЛЕНИЯХ, ОТХОДАХ

Хорун А. А.\* (nactena\_fre@mail.ru),  
Семёнов М. А.\* (semenovmw@mail.ru),  
Галузин Д. Д.\* (DDGaluzin@po-mayak.ru),  
Ромадова С. И.\* (svetlanaromadova@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

### Аннотация

*В соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии НП-030-19 «Основные правила учета и контроля ядерных материалов» значения масс ядерных материалов (ЯМ) в технологических потерях, отложениях, накоплениях, а также погрешности этих значений должны быть определены на основании методик измерения или расчетных методик, действующих в организации». Представлены основополагающие принципы подхода, разработанного для построения и аттестации методик измерений массы ядерных материалов в отложениях в технологическом оборудовании (воздуховодах, трубопроводах), в накоплениях на фильтрах системы газоочистки, отходах производства гамма-спектрометрическим методом. Рассмотрены особенности построения и аттестации разработанных методик измерений, представлены результаты их внедрения на ФГУП «ПО «Маяк» и апробации данных методик на реальных объектах контроля.*

► **Ключевые слова:** отложения, накопления, ядерные материалы, гамма-спектрометрия, расчетные методы.

\* ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск, Российская Федерация.

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE MEASUREMENTS OF NUCLEAR MATERIALS IN DEPOSITIONS, AGGREGATIONS AND WASTES

Khorun A. A.\*,  
Semenov M. A.\*,  
Galuzin D. D.\*,  
Romadova S. I.\*

Article is received on September 30, 2020

### *Abstract*

*In compliance with the Federal Rules and Regulations for the Use of Nuclear Energy NP-030-19, nuclear material weights in the in-process losses, deposits and accumulated stocks, as well as their errors are to be determined based on measurement procedures or computational techniques adopted by the organization. Fundamental principles of the approach applied for development and approval of the procedures for measurement of nuclear material weights with the use of a gamma-spectrometric method in deposits in the process equipment (air ducts, pipelines), in the materials accumulated on the filters of the gas-cleaning system and in the waste products are provided. Specific features of development and approval of these measurement procedures are described. The results of development and implementation of these procedures at FSUE “Mayak” PA are presented, outcomes of their testing at real items subject to monitoring are provided.*

► **Keywords:** *depositions, aggregations, nuclear materials, gamma-spectrometry, computational methods.*

---

\* Federal State Unitary Enterprise “Mayak Production Association”, Ozyorsk, Russian Federation.

## Введение

На объектах ядерного топливного цикла при получении, использовании и переработке ядерных материалов (ЯМ) (соединений урана и плутония) необходимо соблюдение требований ядерной безопасности, учета и контроля ЯМ (УиК ЯМ).

Технологические процессы производства и переработки ЯМ могут сопровождаться образованием:

- отложений ЯМ в технологическом оборудовании (воздуховодах, трубопроводах);
- накоплений ЯМ в фильтрах системы газоочистки;
- отходов, содержащих ЯМ, находящихся в различных упаковках.

Контроль количественных характеристик ЯМ в отложениях, накоплениях, отходах важен с точки зрения требований к обеспечению радиационной и ядерной безопасности с целью обеспечения гарантий сохранности, а также с экономической точки зрения [1]. Определение массы ЯМ в отложениях и накоплениях позволит уточнить величину инвентаризационной разницы, а также позволит контролировать нормы накопления ЯМ. Задача измерения характеристик отходов является крайне важной, так как сведения о количестве ЯМ в отходах производства необходимы для определения целесообразности дальнейшей переработки или передачи на захоронение, а также для системы УиК ЯМ.

Ключевым элементом методик измерений количественных характеристик ЯМ в отложениях, накоплениях, отходах являются стандартные образцы, используемые для градуировки средств измерений, для оценки влияния различных факторов на результаты измерений и при проведении контроля качества результатов измерений. Создание стандартных образцов для перечисленных объектов является сложной и дорогостоящей, зачастую невыполнимой задачей. Проблема обусловлена прежде всего тем, что существует большое разнообразие форм и размеров отложений, накоплений, отходов, различающихся агрегатным состоянием, содержанием ЯМ, изотопным составом, примесями, влияющими на результат измерений. Данная проблема осложняется еще и тем, что при изготовлении стандартных образцов необходимо привлекать значимые количества ЯМ, некоторые из которых являются специальными.

Для построения и аттестации методик измерений количественных характеристик ЯМ в отложениях, накоплениях, отходах с использованием

гамма-спектрометров был разработан подход, основанный на следующих принципах:

- определение эффективности регистрации детектора с использованием метода численного моделирования взамен использования стандартных образцов;
- учет и оценка влияния различных факторов, влияющих на результаты измерений ЯМ, и их погрешность с использованием расчетно-экспериментального метода взамен стандартных образцов;
- подтверждение метрологических характеристик методик измерений по результатам измерений аттестованных объектов<sup>1</sup> или с использованием референтных методик.

## Средства и метод измерений

Измерения массы ЯМ проводились с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра МКС-АТ6101, который является портативным многофункциональным сцинтилляционным спектрометром, предназначенным для поиска, обнаружения, идентификации радионуклидов и измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы гамма-излучения. Внешний вид спектрометра МКС-АТ6101 представлен на рис. 1, а технические характеристики – в табл. 1 в соответствии с руководством по эксплуатации [2]. Спектрометр МКС-АТ6101 представляет собой прибор, состоящий из внешне-го интеллектуального блока детектирования гамма-излучения БДКГ-05 и блока обработки информации и управления. В качестве детектирующего элемента в БДКГ-05 используется сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) диаметром 40 мм, высотой 40 мм.



Рис. 1. Внешний вид гамма-спектрометра МКС-АТ6101

<sup>1</sup> Аттестованный объект – объект, для которого установлены значения одной и более величин, характеризующих состав, структуру или свойства реальных объектов измерений.

Таблица 1

**Технические характеристики гамма-спектрометра типа МКС-АТ6101**

Характеристика	Значение
Тип детектора	NaI(Tl)
Размеры детектора, мм	Ø 40, h 40
Диапазон измеряемых энергий, кэВ	25–3 000
Интегральная нелинейность, %, не более	1
Число каналов	512
Относительное энергетическое разрешение по линии 662 кэВ, %, не более	9,0
Максимальная входная статистическая нагрузка, с <sup>-1</sup>	10 <sup>4</sup>
Время установления рабочего режима, мин, не более	10
Масса блока детектирования, кг	1,2
Масса блока обработки информации, кг	0,7
Габаритные размеры блока детектирования, мм	Ø 60, h 320
Габаритные размеры блока обработки информации, мм	109 × 200 × 35

Для снижения влияния внешнего фона гамма-излучения, а также в целях ограничения угла обзора для формирования отклика детектора от заданной области для блока детектирования БДКГ-05 были использованы боковая защита и коллиматор:

- для измерения отложений и накоплений урана – с входным окном диаметром 40 мм и высотой 45 мм;
- для измерения отложений, накоплений и отходов плутония – с входным окном диаметром 20 мм и высотой 45 мм.

Определение с помощью гамма-спектрометрического метода массы ЯМ в отложениях, накоплениях, отходах основано на том, что интенсивность излучения в определенной области набранного гамма-спектра пропорциональна массе ЯМ.

Для расчета содержания ЯМ определяется чистая площадь (число импульсов) исследуемого пика в области [1]:

- от 300 до 500 кэВ для плутония, обусловленная гамма-излучением <sup>239</sup>Pu;
- от 170 до 200 кэВ для урана, обусловленная гамма-излучением <sup>235</sup>U.

Этот результат используется для определения массы ЯМ по формуле (1):

$$m = \frac{1}{f_{Iso}} \cdot \frac{n_E}{Y_E^{Iso} \cdot eff_E} \cdot (CF)_E, \quad (1)$$

где:  
 $f_{Iso}$  – массовая доля изотопа в веществе, отн. ед.;

$n_E$  – скорость счета в исследуемой энергетической области (за вычетом фоновой подложки под пиком), с<sup>-1</sup>;

$Y_E^{Iso}$  – удельный выход гамма-квантов изотопа в исследуемой энергетической области, г<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>;

$eff_E$  – эффективность регистрации гамма-квантов в исследуемой энергетической области, отн. ед.;

$(CF)_E$  – поправки на ослабление в слое отложения, в стенках воздухопроводов, защитных фильтрах и т. п. в исследуемой энергетической области, отн. ед.

При выполнении анализа спектра учитывается вклад фонового излучения от изотопов в анализируемую область гамма-спектра. К таким изотопам, характерным для выполнения измерений содержания плутония, относится <sup>241</sup>Am, для урана – дочерние продукты распада <sup>232</sup>U.

Для учета вклада <sup>241</sup>Am в анализируемую область гамма-спектра используют двухоконную методику:

- первое окно – энергетическая область от 300 до 500 кэВ используется для вычисления суммарного отклика от <sup>239</sup>Pu и <sup>241</sup>Am;
- второе окно – область от 600 до 740 кэВ, обусловленная гамма-излучением <sup>241</sup>Am.

Допустимое содержание изотопа <sup>232</sup>U в уране при измерениях, проводимых для целей УиК ЯМ, должно быть не более (1,25·10<sup>-9</sup>·E<sub>235</sub>) при радиоактивном равновесии между <sup>232</sup>U и продуктом его распада <sup>228</sup>Th.

Тогда формула (1) для плутония переписывается в виде:

$$m_{Pu} = \frac{1}{f_{239}} \left( \frac{n_{300-500}}{Y_{300-500}^{Pu} \cdot eff_{382}} (CF)_{300-500} - \frac{n_{600-740}}{Y_{300-500}^{Pu} \cdot Y_{600-740}^{Am} \cdot eff_{676}} (CF)_{600-740} \right), \quad (2)$$

где:

$f_{239}$  – массовая доля  $^{239}\text{Pu}$  в плутонии, отн. ед.;

$n_{300-500}$  – скорость счета в пике в энергетической области от 300 до 500 кэВ за вычетом фоновой подкладки под пиком и фона в точке измерения,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Y_{300-500}^{Pu}$  – удельный выход гамма-квантов  $^{239}\text{Pu}$  в энергетической области от 300 до 500 кэВ,  $\text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$eff_{382}$  – значение эффективности регистрации по линии 382 кэВ для области от 300 до 500 кэВ, отн. ед.;

$(CF)_{300-500}$  – поправки на ослабление в слое отложения, в стенках воздуховода, защитных фильтрах и т. п. в энергетической области от 300 до 500 кэВ, отн. ед.;

$n_{600-740}$  – скорость счета в пике в энергетической области от 600 до 740 кэВ, обусловленная зарегистрированным фотонным излучением от  $^{241}\text{Am}$ , за вычетом фоновой подкладки под пиком и фона в точке измерения,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Y_{300-500}^{Am}$  – удельный выход гамма-квантов  $^{241}\text{Am}$  в энергетической области от 300 до 500 кэВ,  $\text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$Y_{600-740}^{Am}$  – удельный выход гамма-квантов  $^{241}\text{Am}$  в энергетической области от 600 до 740 кэВ,  $\text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$eff_{676}$  – значение эффективности регистрации по линии 676 кэВ для области от 600 до 740 кэВ, доля;

$(CF)_{600-740}$  – поправки на ослабление в слое отложения, в стенках воздуховода, защитных фильтрах и т. п. в энергетической области от 600 до 740 кэВ, отн. ед.,

а для урана:

$$m_j^{(235)} = \frac{(n_{170-200})_j}{Y_{170-200}^{(235)} \cdot eff_{186}} (CF)_{170-200}, \quad (3)$$

где:

$n_{170-200}$  – скорость счета в энергетической области от 170 до 200 кэВ за вычетом фоновой подкладки и фона в точке измерения,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Y_{170-200}^{(235)}$  – удельный выход гамма-квантов  $^{235}\text{U}$  в энергетической области 170 до 200 кэВ,  $\text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$eff_{186}$  – эффективность регистрации в области от 170 до 200 кэВ, отн. ед.;

$(CF)_{170-200}$  – поправки на ослабление в защитных фильтрах и т. п. в энергетической области от 170 до 200 кэВ, отн. ед.

### Определение эффективности регистрации

Для определения эффективности регистрации детектора использовали расчетный метод, основанный на моделировании блока детектирования и объекта измерения методом Монте-Карло в программе MCNP Version4B [3]. Разрез блока детектирования спектрометра представлен на рис. 2.

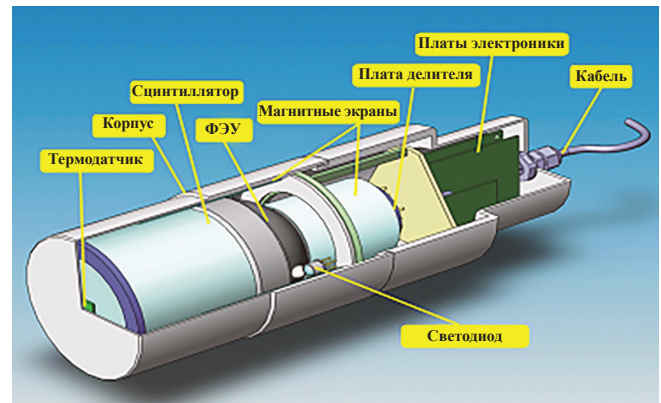


Рис. 2. Разрез блока детектирования спектрометра типа МКС-АТ6101

Процедура разработки и отладки модели детектора состоит из четырех этапов:

- разработка детектора в программе в соответствии с имеющейся информацией;
- расчет в программе эффективности регистрации в заданной геометрии либо для отдельных линий, либо построения зависимости эффективности от энергии;
- измерение точечных образцовых источников гамма-излучения в той же геометрии, в которой проводились расчеты, и определение эффективности регистрации;
- сравнение измеренных и рассчитанных значений эффективности регистрации, после чего решается, применяется модель или она требует коррекции.

Погрешность моделирования в коде MCNP Version 4B по результатам расчетов составила 8,1 %.

Для определения эффективности регистрации детектора от объекта измерения использовали два подхода:

- моделирование объекта измерения целиком (для накоплений и отходов урана и плутония);
- моделирование «видимой» части (области) объекта измерения, то есть источник представлен

в виде цилиндра радиусом равным радиусу «видимой» области коллиматора (для отложений урана и плутония).

При определении эффективности регистрации от объекта измерений предполагается, что распределение ЯМ в нем равномерное. На практике установить распределение ЯМ в объекте измерения невозможно. Оценка ошибки, возникающей при использовании равномерного распределения вместо реального, проводилась в специальных экспериментах.

### Оценка влияющих факторов

На результат измерений массы ЯМ в отложениях, накоплениях, отходах оказывают влияние следующие факторы:

- неточность воспроизведения геометрии измерений;
- нестабильность работы спектрометра – нестабильность показаний прибора за время непрерывной работы в соответствии с руководством по эксплуатации;
- поправки на ослабление в конструктивных элементах детектора и объекта измерений;

- применение различных блоков детектирования;
- отличие распределения ЯМ в объекте измерения от равномерного;
- вклад гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$  в область от 300 до 500 кэВ.

Оценка влияния каждого фактора проводилась с использованием справочных данных и расчетно-экспериментальных исследований. Результаты оценки представлены в табл. 2.

### Результаты

На базе предложенного подхода впервые на ФГУП «ПО «Маяк» разработаны, аттестованы и внедрены методики измерений массы и поверхностной плотности плутония в отложениях, массы плутония в фильтрах системы газоочистки и в отходах химико-металлургического производства [4–8].

Все методики рекомендованы к применению на отраслевой комиссии по методам и средствам контроля параметров ядерной безопасности АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

Метрологические характеристики разработанных методик измерений представлены в табл. 3.

Таблица 2

### Оценка факторов, влияющих на результаты измерений

Описание фактора	Значение*, %
Неточность воспроизведения геометрии измерений	± 6,0
Нестабильность работы спектрометра	± 5,0
Применение различных блоков детектирования	± 7,0
Поправки на ослабление в конструктивных элементах детектора и объекта измерений	± 1,5
Отличие распределения ЯМ в объекте измерения от равномерного	Не более ± 20
Вклад гамма-излучения $^{241}\text{Am}$ в область от 300 до 500 кэВ	
отложения	от 25 до 95
накопления	от 13 до 95
отходы	от 24 до 73

\* Значение неисключенной систематической составляющей погрешности, обусловленное влияющим фактором, приносимое вклад в общую погрешность результатов измерений.

Таблица 3

**Метрологические характеристики разработанных методик измерений**

Наименование методики измерений	Диапазон измерений*	Доверительные границы относительной погрешности, % (при вероятности P = 0,95)
Плутоний. Методика измерений массы и поверхностной плотности в отложениях гамма-спектрометрическим методом	Масса плутония: от 0,16 до 55 г. Поверхностная плотность плутония: от 0,002 до 0,7 г·см <sup>-2</sup>	от 35 до 85
Плутоний. Методика измерений массы на фильтрах типа Д28У1 гамма-спектрометрическим методом	Масса плутония: от 8 до 1 000 г	от 20 до 98
Плутоний. Методика измерений массы на фильтрах типа Д-28У-1В гамма-спектрометрическим методом	Масса плутония: от 5,5 до 400 г	от 15 до 98
Плутоний. Методика измерений массы плутония в оборотах (скрапах) гамма-спектрометрическим методом	Масса плутония: от 30 до 500 г	от 31 до 76

\* Границы диапазона измерений обусловлены метрологическими характеристиками системы измерения, требованиями ядерной безопасности, практическими исследованиями и фактическими данными УиК ЯМ.

Проверка работоспособности предложенного подхода и результатов, полученных по разработанным методикам, проводилась:

- для отложений – с помощью аттестованных объектов;
- для накоплений и отходов – с помощью референтных методик измерений [4].

Аттестованные объекты отложений создавались на основе порошка диоксида плутония. Они представляют собой искусственно созданный имитатор отложений в технологическом оборудовании

с заданной поверхностной плотностью или массой плутония. Масса и поверхностная плотность плутония должна соответствовать требуемому диапазону измерений.

В табл. 4–6 представлены результаты расчета массы плутония по разработанным методикам измерений, декларированные значения массы плутония в аттестованных объектах или определенные по референтным методикам измерений, а также относительное отклонение расчетного значения от декларированного.

Таблица 4

**Результаты измерений массы плутония в имитаторах отложений**

Характеристика	Масса плутония, г				
	30	60	90	120	139
Декларированное значение массы плутония в имитаторе	30	60	90	120	139
Вычисленное значение массы плутония по методике измерений массы и поверхностной плотности в отложениях гамма-спектрометрическим методом [5]	36	65	109	128	148
Относительное отклонение	6	5	19	8	9

Таблица 5

**Результаты измерения массы плутония на фильтрах**

Показатель	Фильтр № 1	Фильтр № 2
Вычисленное значение массы плутония на фильтрах типа Д28У1 гамма-спектрометрическим методом [6], г	58,8	57,8

Показатель	Фильтр № 1	Фильтр № 2
Вычисленное значение массы плутония в оборотах (скрапах) методом нейтронных совпадений [4], г	59,0	57,4
Относительное отклонение расчетного значения массы плутония от декларируемого, %	0,6	0,6

Таблица 6

**Результаты измерений массы плутония в отходах**

Отходы (зола)			Отходы (окись магния)			Сметки		
Масса плутония, измеренная гамма-спектрометрическим методом [7], г	Масса плутония, измеренная методом нейтронных совпадений [4], г	Относительное отклонение, %	Масса плутония, измеренная гамма-спектрометрическим методом [7], г	Масса плутония, измеренная методом нейтронных совпадений [4], г	Относительное отклонение, %	Масса плутония, измеренная гамма-спектрометрическим методом [7], г	Масса плутония, измеренная методом нейтронных совпадений [4], г	Относительное отклонение, %
132	112	18	232	258	-10	320	337	-5
122	124	-2	123	120	3	411	404	2
43	45	-5	100	112	-11	148	128	16
256	243	6	73	72	2	139	137	1
200	193	3	78	78	-1	195	204	-4
65	56	15	70	76	-8	125	111	12
36	34	7	35	34	3	259	253	2
165	160	4	213	204	4	397	376	6
107	98	9	185	173	7	224	204	10
288	293	-1	87	98	-12	180	175	3
90	98	-9	20	21	-3	272	240	14
-	-	-	124	127	-3	190	209	-9

В соответствии с табл. 4–6 значения массы плутония в отложениях, накоплениях, отходах, определенные по соответствующим инструкциям [5–7], совпадают с декларируемыми значениями в пределах погрешностей данных методик измерений.

**Заключение**

Представленные в работе результаты показывают, что применение разработанных методик измерений ЯМ в отложениях, накоплениях, отходах позволяет получать результаты, сопоставимые с традиционными методами разрушающего и радиометрического анализа.

Внедрение представленных методик измерений на ФГУП «ПО «Маяк» в настоящее время позволило:

- провести измерения ЯМ в отложениях, накоплениях, отходах и получить достоверную

информацию о количестве в них ЯМ, а также существенно снизить неопределенность таких измерений;

- корректно учитывать количество ЯМ в отложениях в системе газоочистки при расчете инвентаризационной разницы;
- выявить «узкие» места с точки зрения накопления ЯМ в технологическом оборудовании;
- обеспечить выполнение требований федеральных норм и правил по ядерной безопасности и УиК ЯМ;
- провести корректировки технологии переработки данных материалов с целью повысить безопасность и эффективность при обращении с ЯМ, а также снизить риски, связанные с их нераспространением;
- провести оптимизацию обращения с данными материалами.



## Литература

1. Райлли Д. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов / Д. Райлли, Н. Энслин, Х. Смит, С. Крайнер. – М.: ЗАО «Издательство Бином», 2000.
2. Руководство по эксплуатации спектрометра MKC-AT6101. – Атомтех, 2009.
3. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-12625-M.
4. Плутоний. Методика измерений массы плутония в оборотах (скрапах) методом нейтронных совпадений. Свидетельство об аттестации методики № 2402-01.00062-2018.
5. Плутоний. Методика измерений массы и поверхностной плотности в отложениях гамма-спектрометрическим методом. Свидетельство об аттестации № 2341-01.00062-2017.
6. Плутоний. Методика измерений массы на фильтрах типа Д28У1 гамма-спектрометрическим методом. Свидетельство об аттестации № 2359-01.00062-2018.
7. Плутоний. Методика измерений массы плутония в оборотах (скрапах) гамма-спектрометрическим методом. Свидетельство об аттестации № 2004-01.00062-2013.
8. Плутоний. Методика измерений массы на фильтрах типа Д-28У-1В гамма-спектрометрическим методом. Свидетельство об аттестации № 2176-01.00062-2012.

## References

1. Reilly D., Ensslin N., Smith H., Krainer S. (2000). Passivnyj nerazrushayushhij analiz yadernykh materialov [Passive nondestructive assay of nuclear materials]. Moscow: ZAO "Izdatelstvo Binom" [in Russian].
2. Rukovodstvo po ekspluatatsii spektrometra MKS-AT6101 [Operation manual for the MKS-AT6101 spectrometer]. Atomtech, 2009.
3. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-12625-M.
4. Plutonij. Metodika izmerenij massy plutoniya v oborotakh (skrapakh) metodom nejtronnykh sovpadenij [Plutonium. Neutron coincidence technique for plutonium mass measurement in scrap]. Methodology certificate No. 2402-01.00062-2018.
5. Plutonij. Metodika izmerenij massy i poverkhnostnoj plotnosti v otlozheniyakh gamma-spektrometricheskim metodom [Plutonium. Gamma-spectrometry technique for mass and surface density measurement in sediments]. Certificate no. 2341-01.00062-2017.
6. Plutonij. Metodika izmerenij massy na fil'trakh tipa D28U1 gamma-spektrometricheskim metodom [Plutonium. Gamma-spectrometry technique for mass measurement in D28U1 filters]. Certificate no. 2359-01.00062-2018.
7. Plutonij. Metodika izmerenij massy plutoniya v oborotakh (skrapakh) gamma-spektrometricheskim metodom [Plutonium. Gamma-spectrometry technique for mass measurement in scrap]. Certificate no. 2004-01.00062-2013.
8. Plutonij. Metodika izmerenij massy na fil'trakh tipa D-28U-1V gamma-spektrometricheskim metodom [Plutonium. Gamma-spectrometry technique for mass measurement in D-28U-1V filters]. Certificate no. 2176-01.00062-2012.

## Сведения об авторах

*Хорун Анастасия Александровна*, инженер-физик 1 категории, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (456780, Челябинская область, г. Озерск, пр. Ленина, д. 31).

*Семёнов Максим Александрович*, начальник Центральной заводской лаборатории, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (456780, Челябинская область, г. Озерск, пр. Ленина, д. 31).

*Галузин Денис Дмитриевич*, начальник исследовательской лаборатории ядерно-физических методов анализа, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (456780, Челябинская область, г. Озерск, пр. Ленина, д. 31).

*Ромадова Светлана Ивановна*, начальник группы, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (456780, Челябинская область, г. Озерск, пр. Ленина, д. 31).

#### Для цитирования

*Хорун А. А., Семёнов М. А., Галузин Д. Д., Ромадова С. И.* Опыт разработки и внедрения неразрушающих методик измерений ядерных материалов в отложениях, накоплениях, отходах // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. № 4 (98). С. 3–12. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.001.

#### Author credentials

*Horun Anastasiya Aleksandrovna*, 1 Category Engineering Physicist, Federal State Unitary Enterprise “Mayak” Production Association, State Atomic Energy Corporation “Rosatom” (31 Lenin Street, Ozyorsk, 456780, Chelyabinsk Region), e-mail: nactena\_fre@mail.ru.

*Semyonov Maksim Aleksandrovich*, Head of the Central Plant Laboratory, Federal State Unitary Enterprise “Mayak” Production Association, State Atomic Energy Corporation “Rosatom” (31 Lenin Street, Ozyorsk, 456780, Chelyabinsk Region), e-mail: semenovmw@mail.ru.

*Galuzin Denis Dmitriyevich*, Head of the Nuclear-Physical Analytical Research Laboratory, Federal State Unitary Enterprise “Mayak” Production Association, State Atomic Energy Corporation “Rosatom” (31 Lenin Street, Ozyorsk, 456780, Chelyabinsk Region), e-mail: DDGaluzin@po-mayak.ru.

*Romadova Svetlana Ivanovna*, Head of the Group, Federal State Unitary Enterprise “Mayak” Production Association, State Atomic Energy Corporation “Rosatom” (31 Lenin Street, Ozyorsk, 456780, Chelyabinsk Region), e-mail: svetlanaromadova@mail.ru.

#### For citation

*Khorun A. A., Semenov M. A., Galuzin D. D., Romadova S. I.* Development and application of nondestructive measurements of nuclear materials in depositions, aggregations and wastes. Nuclear and Radiation Safety, 2020, no. 4 (98), p. 3–12. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.001 [in Russian].

