

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Научная статья
УДК 631.4:504.53:539.16
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-1-7-22>



Стандартные образцы удельной активности техногенных радионуклидов и массовой доли элементов на основе почвенной матрицы Семипалатинского испытательного полигона

О. Н. Келлер , Ж. Ж. Суюндуков , А. О. Айдарханов , А. Ж. Ташекова ✉,
Н. Ж. Мухамедияров , Н. В. Захарова , А. Е. Темиржанова , Г. М. Есильканов ,
Е. З. Шакенов , В. В. Колбин

Институт радиационной безопасности и экологии,
Курчатов, Республика Казахстан
✉ esenzholova@nnc.kz

Аннотация. Основным средством обеспечения правильности получаемой аналитической информации при радиоэкологических, геологических и других исследованиях является использование стандартных образцов состава и свойств природных объектов с аттестованными характеристиками. В статье представлен опыт филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан в разработке и аттестации стандартных образцов, содержащих техногенные радионуклиды и массовые доли элементов. В качестве исходного материала для изготовления стандартных образцов была выбрана почва, отобранная с мест проведения подземных и наземных ядерных испытаний, на площадках «Опытное поле» и «Балапан» бывшего Семипалатинского испытательного полигона, которая имеет разнообразный радионуклидный состав (естественные и техногенные радионуклиды) с широким спектром химических элементов. Основная цель работы – аттестация двух стандартных образцов: стандартный образец удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове Семипалатинского испытательного полигона (KZ.04.01.00007–2020) и стандартный образец удельной активности радионуклидов ^{152}Eu , ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове Семипалатинского испытательного полигона (KZ.04.01.00008–2020).

Проведены все необходимые для создания стандартных образцов процедуры: отделение магнитной фракции от основной массы материала, измельчение материала, контрольный просев материала, а также гомогенизация с последующими аналитическими исследованиями по аттестации параметров стандартных образцов. В процессе работы применяли методы гамма-спектрометрии, бета-спектрометрии, масс-спектрометрии и комплексной обработки результатов измерения. Приведены данные межлабораторного сравнительного испытания по определению аттестованного значения концентраций заявленных радионуклидов и элементов.

Стандартные образцы представляют собой образцы почв, высушенных до воздушно-сухого состояния, измельченных до размеров частиц менее 60 мкм и расфасованных в герметично закрывающиеся полипропиленовые контейнеры, массой по 200 г. Стандартные образцы внесены в реестр государственной системы обеспечения единства измерений и утверждены в качестве государственных стандартных образцов Республики Казахстан. Областью применения стандартных образцов является обеспечение внутрилабораторного контроля качества испытаний аналитических лабораторий, специализированных на проведении радиоэкологических комплексных исследований, а также разработка и валидация аналитических методик выполнения измерений.

Ключевые слова: стандартный образец, межлабораторное сравнительное испытание, радионуклидный состав, элементный состав, однородность, стабильность, Семипалатинский испытательный полигон

Используемые сокращения: СО – стандартный образец; СИП – Семипалатинский испытательный полигон.

Ссылка при цитировании: Стандартные образцы удельной активности техногенных радионуклидов и массовой доли элементов на основе почвенной матрицы Семипалатинского испытательного полигона / О. Н. Келлер [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18, № 1. С. 7–22. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-1-7-22>

Статья поступила в редакцию 26.09.2021; одобрена после рецензирования 19.01.2022; принята к публикации 07.02.2022.

REFERENCE MATERIALS

Research Article

Reference Materials for the Activity Concentration of Technogenic Radionuclides and the Mass Fraction of Elements Based on the Soil Matrix of the Semipalatinsk Test Site

Oksana N. Keller , Zhastlek Zh. Suyundukov , Asan O. Aidarkhanov ,
Azhar Zh. Tashekova  ✉, Nurlan Zh. Mukhamediyarov , Natalia V. Zakharova ,
Arai Ye. Temirzhanova , Ghani M. Yesilkanov , Yerbol Z. Shakenov , Vladimir V. Kolbin 

Institute of Radiation Safety and Ecology,
Kurchatov, Republic of Kazakhstan
✉ esenzholova@nnc.kz

Abstract. The application of reference materials for the composition and properties of natural objects with certified characteristics is the main instrument for ensuring the correctness of the obtained analytical information in radioecological, geological, and other studies. The article presents the experience of the branch of the Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan in the development and certification of reference materials containing technogenic radionuclides and mass fractions of elements. The soil selected from the sites of underground and surface nuclear tests at the «Experimental field» and «Balapan» sites of the former Semipalatinsk Test Site, which has a diverse radionuclide composition (natural and technogenic radionuclides) with a wide range of chemical elements, was chosen as the starting material for production of reference materials. The main purpose of the work is the certification of two reference materials: reference material for the activity concentration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As in the soil cover of the Semipalatinsk Test Site (KZ.04.01.00007–2020) and reference material for the activity concentration of ^{152}Eu , ^{60}Co , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As in the soil cover of the Semipalatinsk Test Site (KZ.04.01.00008–2020).

All procedures necessary for the creation of reference materials were carried out: separation of the magnetic fraction from the bulk of the material, grinding of the material, control sieve of the material, as well as homogenization with subsequent analytical studies to certify the parameters of reference materials. The methods of gamma spectrometry, beta spectrometry, mass spectrometry, and combined measurement results processing were applied. The results of an interlaboratory comparative test to determine the certified value of the concentrations of the specified radionuclides and elements are given.

Reference materials are soil samples dried to an air-dry state, grinded to a particle size of less than 60 µm, and packaged in hermetically sealed polypropylene containers weighing 200 g. Reference materials have been included in the register of the state system for ensuring the uniformity of measurements and approved as state reference materials of the Republic of Kazakhstan. The scope of reference materials is to provide interlaboratory quality control of tests of analytical laboratories specialized in conducting radioecological complex studies, as well as the development and validation of analytical measurement procedures.

Keywords: reference material, interlaboratory comparative test, radionuclide composition, elemental composition, homogeneity, stability, Semipalatinsk Test Site

Abbreviations used in the article: RM – reference material; STS – Semipalatinsk Test Site.

For citation: Keller O. N., Suyundukov Z. Zh., Aidarkhanov A. O., Tashekova A. Zh., Mukhamediyarov N. Zh., Zakharova N. V. et al. Reference Materials for the Activity Concentration of Technogenic Radionuclides and the Mass Fraction of Elements Based on the Soil Matrix of the Semipalatinsk Test Site. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2022;18(1): 7–22. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-1-7-22> (In Russ.).

The article was submitted 26.09.2021; approved after reviewing 19.01.2022; accepted for publication 07.02.2022.

Введение

Оценка радиоэкологической обстановки загрязненных территорий является важным элементом системы радиационной безопасности. Как правило, радиоэкологические исследования включают в себя детальное картирование уровней загрязнения и проведение систематических наблюдений за радиационной обстановкой. Главным элементом радиоэкологического исследования является определение уровня активности радионуклидов и элементов в тех или иных объектах. Радионуклидный и масс-спектрометрический анализы, в свою очередь, требуют наличия СО, которые используются либо для калибровки спектрометрического оборудования, либо в целях контроля качества.

До последнего времени на территории Республики Казахстан не существовало организации, проводящей переаттестацию и изготовление СО радионуклидного состава. В основном рынок СО представлен товаром, поставляемым со стороны стран ближнего зарубежья (Российская Федерация, Республика Беларусь), а также СО, поставляемыми Международным агентством по атомной энергетике [1].

На базе филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан при поддержке АО «Фонд науки» было создано подразделение производства и аттестации СО радионуклидного и элементного состава. Уникальной особенностью данного производства стало использование почвы СИП в качестве материала СО. Большое количество исследовательских данных по характеру перераспределения радионуклидов в экосистемах СИП, различных по ландшафтным особенностям и характеру радионуклидного загрязнения, позволили определить территории, перспективные для заготовки

материала, необходимого для формирования СО.

В ходе исследований для различных участков СИП получена целостная картина параметров перехода радионуклидов из почвы в растения естественных экосистем для всех территорий, характеризующихся различными типами радиоактивного загрязнения [2], что позволило в перспективе использовать в качестве матрицы исходного материала растительный покров СИП с учетом ранее полученных данных по радионуклидному загрязнению почв.

В ходе комплексных исследований поведения радионуклидов в компонентах экосистем установлен характер распределения искусственных радионуклидов по гранулометрическим фракциям почв различных объектов и территорий СИП [3]. Полученные из [3] данные послужили опорой для разработки СО удельной активности радионуклидов, обеспечили однородность распределения активности радионуклидов в СО.

Основная цель исследования – аттестация двух СО: СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове СИП и СО удельной активности радионуклидов ^{152}Eu , ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове СИП. При исследовании авторы рассматривают ключевые особенности разработки и аттестации СО радионуклидного и элементного состава, уникальных с точки зрения матрицы исходного материала – почвенного покрова СИП.

Материалы и методы

Материалы

Объектами отбора исходного материала СО были две испытательные площадки СИП, где проводились разнохарактерные ядерные взрывы: испытательная

площадка «Опытное поле», на которой проводились воздушные и наземные испытания, включающие как ядерные, так и гидроядерные взрывы, и испытательная площадка «Балапан» (район Атомного озера), где проводились подземные ядерные взрывы в скважинах и модельные эксперименты с использованием обычных взрывчатых веществ, в том числе экскавационный взрыв с выбросом грунта в рамках эксперимента по созданию искусственного водохранилища [4]. Учитывая различное содержание радионуклидов в компонентах экосистем и установление характера распределения искусственных радионуклидов по гранулометрическим фракциям почв различных объектов и территорий СИП, авторы приняли решение о разработке двух СО, характеризующихся различным радионуклидным составом.

При определении точек отбора материала для каждого СО руководствовались результатами предварительной пешеходной гамма-спектрометрической съемки [5, 6]. На основании этих данных с испытательной площадки «Опытное поле» был отобран исходный материал для СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As, с площадки «Балапан» — исходный материал для СО удельной активности радионуклидов ^{152}Eu , ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As.

В ходе выполнения экспедиционных выездов на испытательные площадки полигона были отобраны образцы почвы. Глубина отбора составляла 0–5 см слоя, площадь отбора — 200×200 см.

В полевых условиях была проведена предварительная пробоподготовка с просевом почвы с помощью вибросепаратора.

При сепарации исходного материала в полевых условиях посредством вибросепаратора отбирался материал фракцией 90–500 мкм.

Методы

Отбор исходного материала для разработки СО проводился в условиях испытательных площадок, отличающихся характером радионуклидного загрязнения и форм нахождения радионуклидов в почвенной матрице. Данный фактор вносил коррективы в подготовку материала для каждого исходного материала кандидата СО.

Основным различием в подготовке стало проведение магнитной сепарации исходного материала СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr . Отделение магнитной фракции из общей массы материала было обусловлено значительной степенью утяжеления процессов гомогенизации материала, а также процессов разложения почвенной матрицы при проведении радиохимического и элементного анализа за счет наличия в материале СО спёков и горячих частиц. После завершения сепарации были проведены отдельные гамма-спектрометрические измерения магнитной и немагнитной фракций. Результаты отдельных гамма-спектрометрических измерений магнитной и немагнитной фракций представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты гамма-спектрометрического анализа магнитной и немагнитной фракции для каждого исходного материала кандидата СО

Table 1. The results of gamma-spectrometric analysis of a magnetic and non-magnetic fraction for each starting candidate material to RM

№ образца	Размер фракции, мкм	Удельная радиоактивность ^{137}Cs , Бк/кг	
		Магнитная фракция	Немагнитная фракция
т. 1	90–250	195±40	170±30
	250–500	$2,3 \times 10^3 \pm 0,5 \times 10^3$	280±60
т. 2	90–250	355±70	300±60
	250–500	$2,5 \times 10^3 \pm 0,5 \times 10^3$	540±110
т. 3	90–250	$1,0 \times 10^3 \pm 0,2 \times 10^3$	580±120
	250–500	$2,7 \times 10^3 \pm 0,5 \times 10^3$	785±160
т. 4	90–250	370±70	280±60
	250–500	300±60	340±70

Результаты, представленные в табл. 1, наглядно показывают значительную разницу в значениях удельной активности ^{137}Cs в магнитной и немагнитной фракции, что, в свою очередь, подтвердило предположения авторов о необходимости выделения магнитной фракции из общего объема материала во избежание утяжеления процесса гомогенизации.

Основываясь на ранее проведенных исследовательских работах по определению соотношения $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ для отдельных испытательных площадок (в том числе и для площадки «Опытное поле» [7]), авторы допустили измерение магнитной фракции по одному радионуклиду ^{137}Cs , что позволило в качестве элемента-индикатора выбрать ^{137}Cs и по известному соотношению предварительно предположить концентрацию ^{90}Sr . Данный выбор также обусловлен возможностью проведения гамма-спектрометрического экспресс-анализа удельной активности ^{137}Cs без предварительной пробоподготовки.

В отличие от исходного материала СО, отобранного с испытательной площадки «Опытное поле», исходный материал с площадки «Балапан» содержал минимальное количество спёков, размеры которых превосходили размеры ячеек сита, используемого при предварительном просеве, что позволило избавиться от их присутствия в условиях полевой пробоподготовки и исключить из схемы подготовки СО удельной активности радионуклидов ^{152}Eu , ^{60}Co этап магнитной сепарации.

Далее процесс лабораторной подготовки двух материалов кандидатов СО проходил одинаково. Осуществлялся процесс измельчения исходного материала с помощью ударной роторной мельницы VERDER REACH SR300 с ситом 200 мкм, после чего полученный материал просеивался на рассеивающей машине AS450 control, при этом выделялась фракция менее 60 мкм. Материал фракцией большего размера проходил повторный цикл измельчения на мельнице VERDER REACH SR300 и просев через рассеивающую машину AS450 control. Таким образом, итоговая фракция сырья составила менее 60 мкм.

Итоговым процессом подготовки материала кандидата СО являлось его тщательное перемешивание в барабанном смесителе NORMIT для получения однородного материала.

Результаты и обсуждение

Исследование однородности материала СО

Одним из ключевых свойств, отражающих качество СО, является однородность (гомогенность) материала. Этот параметр является одним из важнейших при

аттестации СО и играет важную роль при определении содержания сертифицируемого параметра в общем объеме исходного материала.

Для установления аттестованных значений аттестуемых радионуклидов и элементов рассчитывалось необходимое число проб для определения однородности в соответствии с ГОСТ 8.531-2002.

По результатам проведенных измерений вычисляли среднее арифметическое значение результатов для каждой пробы:

$$\bar{X}_n = \sum_{j=1}^J \frac{X_{nj}}{J}, \quad (1)$$

где X_{nj} – результаты измерений;

n – номер пробы ($n=1, 2, \dots, N$);

j – измерения в каждой пробе ($j=1, 2, \dots, J$).

Вычисление суммы квадратов отклонений результатов измерений от средних значений SS_e проводили по:

$$SS_e = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J (X_{nj} - \bar{X}_n)^2, \quad (2)$$

и сумму квадратов средних арифметических для каждой пробы от среднего арифметического всех результатов:

$$SS_H = J \cdot \sum_{n=1}^N (\bar{X}_n - \bar{X})^2, \quad (3)$$

характеристику однородности вычисляем по формуле:

$$S_H = \left[\frac{SS_H - SS_e}{J} \cdot \left(\frac{M_o}{M} \right) \right]^{0,5}, \quad (4)$$

где M_o – масса пробы;

M – наименьшая представительная проба для данного аттестуемого компонента.

SS_e – средний квадрат отклонений результатов измерений от средних значений для каждой пробы, вычисляемый согласно формуле:

$$\overline{SS_e} = SS_e / [N \cdot (J - 1)], \quad (5)$$

$\overline{SS_H}$ – средний квадрат отклонений результатов измерений от средних значений между пробами:

$$\overline{SS_H} = \frac{SS_H}{(N - 1)}, \quad (6)$$

стандартная неопределенность от неоднородности u_h была определена согласно РМГ 93–2015:

$$u_h = \sqrt{\frac{SS_H - SS_e}{J}}, \quad (7)$$

Для установления аттестованных значений удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{152}Eu и ^{60}Co использовалась МВИ «Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectraLine» и МВИ «Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного бета-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». Методики основаны на регистрации гамма и бета-излучающих радионуклидов в счетных образцах с помощью сцинтилляционных и полупроводниковых спектрометров в аттестованной геометрии измерения и последующей обработкой измерительной информации с использованием специализированного программного обеспечения «SpectraLine» и «Прогресс».

Для установления аттестованных значений массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As использовалась МВИ № 499-АЭС/МС МКХА «Методика количественного химического анализа. Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами (МС-ИСП)». Методика основана на использовании аргоновой

индуктивно связанной плазмы в качестве источников фотонов (АЭС-ИСП) и ионов (МС-ИСП), с предварительным переводом анализируемого образца в виде раствора, путем кислотного разложения.

Оценка характеристики однородности СО по удельной активности радионуклидов и элементному составу представлена в табл. 2, 3.

Межлабораторные исследования по установлению аттестованных значений СО

Значение аттестованных характеристик СО и их погрешностей (неопределенности) были установлены путем проведения межлабораторного сравнительного эксперимента с участием аккредитованных лабораторий Республики Казахстан и Российской Федерации.

В межлабораторном сравнительном испытании приняли участие 8 аккредитованных исследовательских лабораторий, недостающее количество результатов было получено на базе отдела аналитических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» в условиях воспроизводимости результатов.

Статистическая обработка независимых результатов измерений X_i , полученных от исследовательских лабораторий, участвующих в межлабораторном сравнительном эксперименте, была проведена согласно ГОСТ 8.532-2002.

Таблица 2. Результаты оценки характеристик однородности СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Table 2. The assessment results of the RM homogeneity characteristics for the activity concentration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Радионуклид	SS_e , Бк/кг	SS_n , Бк/кг	$\overline{SS}_e$, Бк/кг	$\overline{SS}_n$, Бк/кг	S_n , Бк/кг	S_n , %	u_n , %
^{137}Cs	3910	993	51	99	3,5	0,98	0,69
^{90}Sr	15900	2725	207	272	3,5	0,73	0,60
Zn	548	254	11	23	1,5	3,5	3,5
Cu	68	437	1,4	40	2,8	6,6	6,7
Pb	238	55	4,9	4,9	0,07	0,4	0,4
Cd	0,22	0,05	0,004	0,005	0,01	1,2	1,2
Co	120	28	2,5	2,5	0,07	0,31	0,31
Fe	2530	5891	53	536	10	0,03	0,03
Mn	1130	4225	24	384	8,5	0,62	0,62
As	111	27	2,3	2,4	0,20	1,6	1,6

Таблица 3. Результаты оценки характеристик однородности СО удельной активности радионуклидов ^{152}Eu , ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Table 3. The assessment results of RM homogeneity characteristics for the activity concentration of ^{152}Eu , ^{60}Co , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Радионуклид	SS_e , Бк/кг	SS_m , Бк/кг	$\overline{SS}_e$, Бк/кг	$\overline{SS}_m$, Бк/кг	S_m , Бк/кг	S_m , %	u_h , %
^{152}Eu	3280	1513	43	151	5,2	0,72	0,50
^{60}Co	280	980	3,6	98	4,2	4,5	3,6
Zn	314	894	6,5	81	3,9	3,2	3,2
Cu	168	255	3,5	23	1,9	3,2	3,2
Pb	22	6,9	0,46	0,63	0,19	1,0	1,0
Cd	0,02	0,01	0,00041	0,00049	0,004	0,88	0,90
Co	40	11	0,83	1,0	0,19	0,66	0,70
Fe	5840	2141	122	194	3,8	0,01	0,008
Mn	18840	6658	392	605	6,5	0,66	0,70
As	60	16	1,3	1,5	0,2	1,6	1,6

Обработка результатов включала в себя определение следующих параметров:

проверка на наличие выбросов по критерию Граббса до выполнения условия

$$GR_{m,max} \leq GR_{\text{табл}} \text{ и } GR_{m,min} \leq GR_{\text{табл}}$$

медиана результатов $\tilde{X}$

$$\tilde{X} = \text{med} \{X_i\} =$$

$$\begin{cases} X_{(N/2)} + X_{(N/2+1)} / 2 - \text{для четных } N \\ X_{(N+1/2)} - \text{для нечетных } N \end{cases}, \quad (8)$$

где X_i – независимые результаты измерений;

N – общее количество результатов межлабораторной аттестации,

абсолютные отклонения результатов измерений от медианы dO_i

$$dO_i = |X_{(i)} - \tilde{X}|, \quad (9)$$

медиана абсолютных ненулевых отклонений $MAD0$

$$MAD0 = \text{med} \{dO_j\}, \quad (10)$$

где $\text{med} \{dO_j\}$ – вычисляют по формуле, аналогичной формуле медианы результатов $\tilde{X}$, в зависимости от числа ненулевых значений dO_j ,

величина критического отклонения результатов от медианы C_k

$$C_k = 3 \cdot MAD0, \quad (11)$$

аттестованное значение СО

$$\hat{A} = \left(\frac{1}{W} \right) \cdot \sum_{j=1}^N w_i \cdot X_{(i)}, \quad (12)$$

где W – сумма весовых коэффициентов w_i , нормированное отклонение от медианы

$$U_i = dO_i / (5,2 \cdot MAD0), \quad (13)$$

весовые коэффициенты

$$w_i = \begin{cases} (1 - U_i^2)^2 - \text{для } U_i < 1 \\ 0 - \text{для } U_i \geq 1 \end{cases}, \quad (14)$$

абсолютные отклонения результатов измерений от средневзвешенного $d2_i$

$$d2_i = |X_{(i)} - \hat{A}|, \quad (15)$$

медиана абсолютных ненулевых отклонений $MAD2$

$$MAD2 = \text{med} \{d2_i\}, \quad (16)$$

где $med\{d2_i\}$ – в зависимости от числа ненулевых значений $d2_i$ вычисляются по формуле, аналогичной формуле медианы результатов $\tilde{X}$.

Среднеквадратическое отклонение $S_{\hat{A}}$

$$S_{\hat{A}} = 1,48 \cdot MAD2, \quad (17)$$

характеристика погрешности межлабораторной аттестации

$$\Delta_{\hat{A}} = B_f \cdot \hat{A}, \quad (18)$$

где $f = K-1$;

K – количество отличных от нуля коэффициентов w_i , а значения коэффициента B_f – табличная величина согласно ГОСТ 8.532-2002.

Погрешность аттестованного значения СО с учетом погрешности от неоднородности

$$\Delta_{ат} = \sqrt{\Delta_{\hat{A}}^2 + 4 \cdot S_n^2}, \quad (19)$$

где S_n – среднеквадратическое отклонение погрешности от неоднородности.

Стандартная неопределенность от способа определения аттестованного значения СО

$$u_{char} = 1,48 \cdot MAD2. \quad (20)$$

Результаты межлабораторного эксперимента по установлению аттестованных характеристик СО

удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As приведены в табл. 4.

Результаты межлабораторного эксперимента по установлению аттестованных характеристик СО удельной активности радионуклидов ^{152}Eu , ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As приведены в табл. 5.

Для иллюстрации, позволяющей наглядно сравнить результаты всех участников межлабораторного эксперимента, на рис. 1 представлены диаграммы результатов исследований по определению удельной активности радионуклидов в СО почвы СИП.

Как видно из рис. 1, результаты сравнительных испытаний по определению удельной активности радионуклидов в образце СО почвы в большинстве случаев удовлетворительны, что доказывает корректность установленных аттестованных характеристик СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{60}Co и массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As, приведенных в табл. 4, 5.

Оценка стабильности СО

Для подтверждения стабильности кандидатов СО или определения остаточной степени нестабильности исходного материала СО проводился анализ по оценке стабильности.

Таблица 4. Результаты расчетов аттестованного значения параметров СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Table 4. The calculation results of the certified value of the RM parameters for the activity concentration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Элемент	Ед. измерения	$\tilde{X}$	MADO	Ск	$\hat{A}$	B_f	$\Delta_{\hat{A}}$	$\Delta_{ат}$	$\Delta_{ат}$	u_{char}
									%	
^{137}Cs	Бк/кг	340	12	36	340	0,84	15	16	4,8	5,1
^{90}Sr		440	13	40	440	0,93	14	15	3,5	3,4
Zn	млн ⁻¹	44,5	0,50	1,5	44,4	1,1	0,91	3,2	7,2	2,0
Cu		41,5	0,73	2,2	41,3	0,84	0,93	0,90	2,2	2,7
Pb		18,3	0,75	2,3	18,3	0,84	0,92	0,93	5,1	6,0
Cd		0,48	0,02	0,06	0,48	0,93	0,03	0,03	6,6	6,6
Co		22	2,0	6,0	22	1,2	1,1	1,1	4,8	3,8
Fe		33500	600	1800	33704	1,1	1165	1165	3,5	3,3
Mn		1300	50	150	1315	1,2	64	65	4,9	3,9
As		10	1,0	3,0	10	2,5	0,50	0,6	5,9	2,0

Таблица 5. Результаты расчетов аттестованного значения параметров СО удельной активности радионуклидов ¹⁵²Eu, ⁶⁰Co, массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As
Table 5. The calculation results of the certified value of the RM parameters for the activity concentration of ¹⁵²Eu, ⁶⁰Co, the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Элемент	Ед. измерения	$\tilde{X}$	MADO	Ск	$\hat{A}$	B_f	$\Delta_{\hat{A}}$	Δ_{at}	Δ_{at}	u_{char}
									%	
¹⁵² Eu	Бк/кг	705	220,5	67,5	705	0,84	28	30	4,2	4,7
⁶⁰ Co		94	1,0	3,0	94	0,92	1,2	8,5	9,0	1,4
Zn	млн ⁻¹	124	2,0	6,0	124	0,92	3,2	8,4	6,8	2,8
Cu		63	1,0	3,0	63	1,1	1,5	1,5	2,5	2,4
Pb		19	1,0	3,0	19	0,92	1,2	1,2	6,6	6,8
Cd		0,42	0,02	0,06	0,42	0,92	0,03	0,03	6,5	6,8
Co		29	2,0	6,1	28	0,95	1,7	1,7	6,2	6,5
Fe		44500	500	1500	44607	0,92	832	832	1,9	2,0
Mn		1015	25	75	1019	0,84	31	31	3,1	3,6
As		13	1,0	3,1	13	0,92	0,19	0,45	3,4	1,5

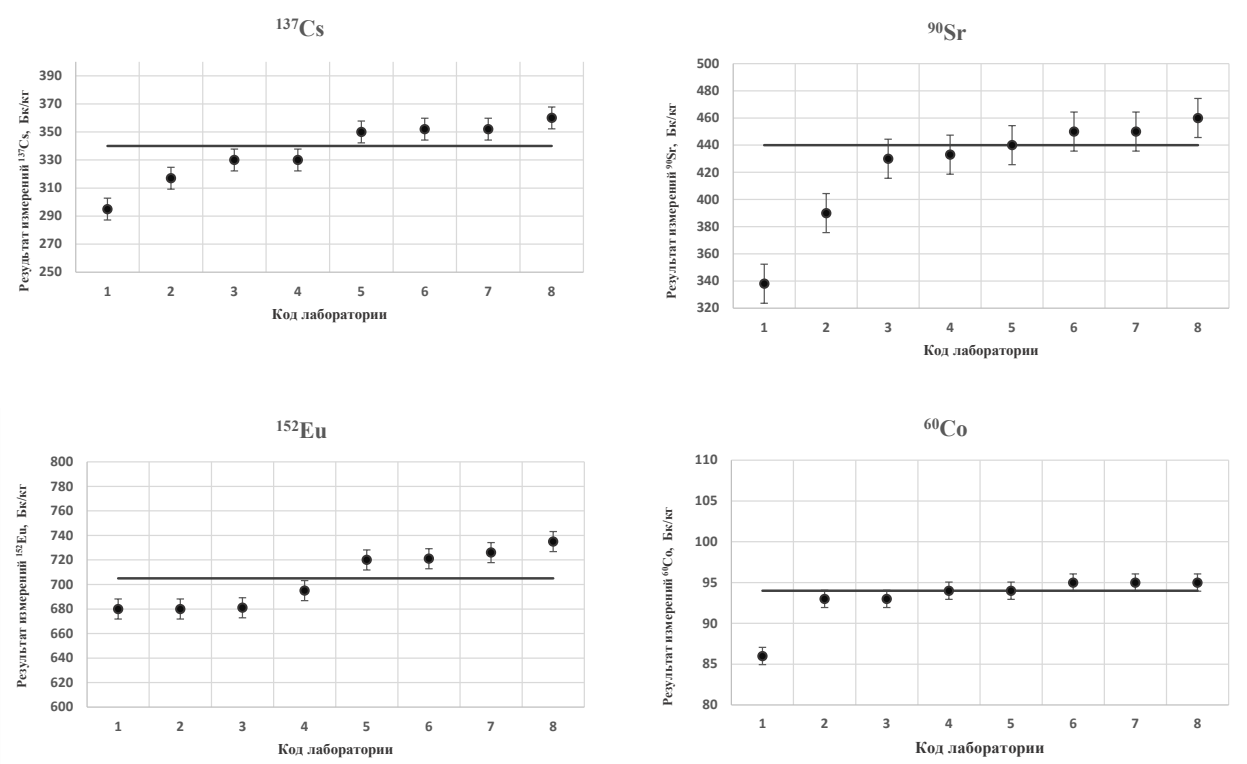


Рис. 1. Диаграммы результатов определения удельной активности радионуклидов в СО почвы СИП (Республика Казахстан), где: — Аттестованное значение СО
Fig. 1. The diagrams of the activity concentration determinations of radionuclides in RM of soil of the STS (the Republic of Kazakhstan). Where: — is the certified value of the reference material

Исследование стабильности материала СО проводилось согласно СТ РК 2.188-2010 и РМГ 93–2015.

Для определения числа измерений, необходимых в условиях оценки стабильности, было рассчитано отношение:

$$Q = \Delta_{\text{доп}} / S_{\text{МВИ}}, \quad (21)$$

где $\Delta_{\text{доп}}$ – допускаемое значение погрешности аттестованного значения СО, заданное в техническом задании на разработку СО;

$S_{\text{МВИ}}$ – стандартное отклонение случайной составляющей погрешности методики измерений.

Данное соотношение давало различное выходное значение числа измерений для выполнения анализа по радионуклидному составу и элементному составу СО. Это связано с различной погрешностью применяемых методик измерений. Согласно СТ РК 2.188-2010, при исследовании стабильности радионуклидного состава в течение 14 месяцев измерения проводились каждую неделю, а для элементного состава – проводилось один раз в месяц.

По результатам полученных измерений были определены следующие параметры:

– экспоненциальное сглаживание полученных результатов по формуле:

$$U_n = \alpha d_n + (1 - \alpha) U_{n-1}, \quad (22)$$

где U_n – сглаженное значение разности результатов измерений в момент времени n ($n = 1, 2, \dots, N$). Для начального значения U_1 принимают $d_1 = 0$;

α – коэффициент, выбираемый в зависимости от отношения $S/\Delta_{\text{доп}}$ согласно СТ РК 2.188-2010;

d_n – погрешность от нестабильности в n -й момент времени.

– скользящие размахи R_n :

$$R_n = |U_n - U_{n-1}|, \quad (23)$$

– средний размах:

$$\bar{R} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=2}^N R_n, \quad (24)$$

В ходе анализа предполагалась линейная модель зависимости сглаженных оценок погрешности от нестабильности U_n согласно формуле:

$$U_n = at_n + \varepsilon_n, \quad (25)$$

где a – коэффициент линейной зависимости погрешности от нестабильности;

ε_n – значение случайной погрешности результатов измерений в момент времени $t_n = \tau/N \cdot (n - 1)$.

Коэффициент a определялся по полученным значениям U_n методом наименьших квадратов:

$$a = \frac{6 \cdot \sum_{n=1}^{N-1} n \cdot U_{(n+1)}}{\tau \cdot (N-1) \cdot (2N-3)}, \quad (26)$$

Стандартное отклонение S_a коэффициента a определялось по формуле:

$$S_a = \frac{S_U}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{6N}{2N-3}}, \quad (27)$$

где S_U – стандартное отклонение сглаженных оценок, вычисляемое по среднему размаху $\bar{R}$:

$$S_u = 0,89\bar{R}, \quad (28)$$

Стандартная неопределенность от нестабильности была рассчитана по формуле:

$$u_{\text{stab}} = S_a \cdot t, \quad (29)$$

Результаты характеристик стабильности СО удельной активности техногенных радионуклидов и массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As приведены в табл. 6, 7.

Оценка неопределенности результатов определения удельной активности радионуклидов и элементов в СО почвы

Для расчета суммарной стандартной неопределенности аттестованного значения СО ранее были определены: неопределенность от неоднородности материала (U_n), неопределенность, связанная с установлением аттестованного значения (U_{char}) и стандартная неопределенность от нестабильности (U_{stab}) исходного материала СО:

$$u_c(\hat{A}) = \sqrt{u_{\text{char}}^2 + u_h^2 + u_{\text{stab}}^2}, \quad (30)$$

Далее рассчитывалась расширенная стандартная неопределенность аттестованного значения СО, в зависимости от значения доверительной вероятности:

$$u_p(\hat{A}) = k \cdot u_c(\hat{A}), \quad (31)$$

Полученные результаты расчетов расширенной стандартной неопределенности при доверительной вероятности $P=95\%$ и $k=2$ для СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{60}Co и массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As приведены в табл. 8.

Таблица 6. Результаты характеристик стабильности СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Table 6. The results of the RM stability characteristics for activity concentration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Радионуклид	$\bar{R}$	a	S_U	S_a	$u_{\text{stab}}, \%$
^{137}Cs	0,7	-0,09	0,7	0,10	0,6
^{90}Sr	1,1	-0,57	1,0	0,15	0,7
Zn	0,52	-0,14	0,46	0,07	4,5
Cu	0,33	-0,27	0,29	0,05	2,7
Pb	0,19	-0,14	0,17	0,03	3,3
Cd	0,003	0,001	0,003	0,0004	1,9
Co	0,13	0,02	0,11	0,02	1,9
Fe	166	-92	148	23	1,6
Mn	1,3	0,46	1,2	0,18	0,3
As	0,11	0,03	0,1	0,02	3,5

Таблица 7. Результаты характеристик стабильности СО удельной активности радионуклидов ^{152}Eu , ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Table 7. The results of the RM stability characteristics for activity concentration of ^{152}Eu , ^{60}Co , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Радионуклид	$\bar{R}$	a	S_U	S_a	$u_{\text{stab}}, \%$
^{152}Eu	1,1	2,7	0,99	0,14	0,46
^{60}Co	0,70	1,3	0,62	0,09	2,2
Zn	0,57	0,24	0,53	0,08	1,6
Cu	0,48	0,06	0,43	0,07	2,6
Pb	0,10	0,03	0,09	0,01	1,9
Cd	0,002	-0,0012	0,002	0,0003	1,7
Co	0,14	0,06	0,13	0,02	1,6
Fe	85	67	76	12	0,6
Mn	7,6	2,2	6,7	1,0	2,4
As	0,14	0,05	0,13	0,02	3,9

Обсуждение и заключение

В условиях разработки СО удельной активности техногенных радионуклидов и массовой доли элементов на основе почвенной матрицы апробирована и успешно реализована методика подготовки исходного материала СО, в качестве которого использовали почвенную

матрицу двух различных испытательных площадок СИП. На рис. 2 представлены фотографии основных этапов производства СО.

В ходе работы подобраны оптимальные аналитические условия для проведения исследования однородности материала СО. Проведены расчеты по установлению

Таблица 8. Относительная расширенная стандартная неопределенность аттестованного значения СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{60}Co и массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Table 8. The relative extended standard uncertainty of the RM certified value for the activity concentration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{60}Co , the mass fraction of Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As

Компонент СО	^{137}Cs	^{90}Sr	Zn	Cu	Pb	Cd	Co	Fe	Mn	As
$u_p, \%$	10	7	12	8	14	13	8	7	8	9
Компонент СО	^{152}Eu	^{60}Co	Zn	Cu	Pb	Cd	Co	Fe	Mn	As
$u_p, \%$	10	9	8	9	14	14	13	4	9	9



Рис. 2. Основные этапы производства СО удельной активности техногенных радионуклидов и массовой доли элементов на основе почвенной матрицы СИП, разработанного филиалом «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, где: 1 – отбор исходного материала с территории СИП; 2 – лабораторная пробоподготовка СО; 3 – лабораторные анализы СО; 4 – внешний вид СО

Fig. 2. The main production stages of a reference material for the activity concentration of technogenic radionuclides and the mass fraction of elements based on the soil matrix of the Semipalatinsk Test Site, developed by the branch of the Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. Where: 1 is the selection of the source material from the territory of the STS; 2 is the RM laboratory sample preparation; 3 is RM laboratory analysis; 4 is the RM appearance

аттестованного значения СО путем проведения межлабораторного сравнительного эксперимента, а также суммарной стандартной неопределенности и расширенной стандартной неопределенности аттестованного значения СО. Проведены исследования стабильности СО в условиях промежуточной прецизионности в течение 14 месяцев. Поскольку срок исследования стабильности материала СО должен составлять более половины срока годности СО, срок годности аттестуемых СО был определен равным двум годам.

Разработанные СО прошли метрологическую экспертизу на базе Казахстанского института стандартизации и метрологии и внесены в Реестр государственной системы единства измерений и утверждены в качестве государственных стандартных образцов:

– СО удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове СИП, KZ.04.01.00007–2020;

– СО удельной активности радионуклидов европия ^{152}Eu , кобальта ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове СИП, KZ.04.01.00008–2020.

Областью применения СО является обеспечение внутрилабораторного контроля качества испытаний аналитических лабораторий, специализирующихся на проведении радиоэкологических комплексных исследований, а также разработка и валидация аналитических методик выполнения измерений.

Благодарности: авторы выражают благодарность В. В. Каширскому и С. Н. Лукашенко за ценные

советы при планировании исследования и чуткое наставничество, а также ведущему специалисту ВКФ РГП «КазСтандарт» О. В. Савинковой за полезные замечания в процессе аттестации стандартных образцов; работа выполнена при поддержке АО «Фонд Науки» (Республика Казахстан), грант от 03.11.2017 № 469 «Создание участка разработки и аттестации стандартных образцов».

Acknowledgments: the authors express their gratitude to V. V. Kashirsky and S. N. Lukashenko for valuable advice in planning the study and mentoring, as well as to O. V. Savinkova, the leading specialist of the KazStandard, for useful comments on the certification of reference materials; the study was conducted with support from JSC «Foundation of Science» (the Republic of Kazakhstan), grant dated 03.11.2017 No 469 «Creation of a site for the development and certification of reference materials».

Вклад соавторов: Келлер О. Н. – составление технического задания; организация экспериментальных работ по аттестации СО в межлабораторном эксперименте; выполнение вычислений; оформление документов по испытаниям СО в целях утверждения типа. Суюндуков Ж. Ж. – сбор литературных данных, отбор исходного материала, подготовка почвы, усреднение исходного материала, фасовка, упаковка. Айдарханов А. О. – разработка концепции исследования, критический анализ и доработка текста. Ташекова А. Ж. – получение и обработка экспериментальных данных, критический анализ текста, компьютерная работа с текстом, написание текста. Захарова Н. В. – организация экспериментальных работ по аттестации СО в межлабораторном эксперименте, координация работ в области обеспечения качества. Мухамедияров Н. Ж. – определение замысла и методологии статьи, критический анализ материалов статьи, координация работ по проведению масс-спектрометрических

исследований СО. Темиржанова А. Е. – координация работ по проведению гамма-, бета-спектрометрических исследований, анализ данных, доработка текста статьи. Есильканов Г. М. – аналитические исследования, обработка экспериментальных данных. Шакенов Е. З. – аналитические исследования СО радиохимическим анализом, обработка экспериментальных данных. Колбин В. В. – обработка экспериментальных данных, доработка текста статьи.

Author Contribution: Keller O. N. – preparation of technical specifications; organization of experimental work on RM certification in an interlaboratory test; performing calculations; preparation of documents for testing of RMs for type approval. Suyundukov Zh. Zh. – collection of literary data, selection of starting material, soil preparation, homogenization of starting material, pre-packing, packing. Aidarkhanov A. O. – development of the research concept, critical analysis and revision of the text. Tashekova A. Zh. – obtaining and processing of testing data, critical analysis of the text, writing the text. Zakharova N. V. – organization of experimental work on RM certification in an interlaboratory test, coordination of work in the field of quality assurance. Mukhamediyarov N. Zh. – development of the concept and methodology of the article, critical analysis of the article, coordination of work on conducting mass spectrometric studies of RMs. Temirzhanova A. E. – coordination of work on carrying out gamma-, beta-spectrometric studies, data analysis, revision of the text. Yesilkanov G. M. – analytical studies, processing of experimental data. Shakenov Ye. Z. – analytical studies of RMs by radiochemical analysis, processing of experimental data. Kolbin V. V. – processing of experimental data, revision of the text.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare no conflicts of interests.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. К вопросу о необходимости создания стандартных образцов радионуклидного состава для радиоэкологических исследований в Республике Казахстан / О. Н. Келлер [и др.] // Метрология – научно-технический журнал. 2019. № 1 (68). С. 83–85.
2. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site / N. V. Larionova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. № 186. P. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.006>
3. Distribution of artificial radionuclides in particle-size fractions of soil on fallout plumes of nuclear explosions / A. M. Kabdyrakova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. № 186. P. 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.022>
4. Семипалатинский испытательный полигон. Современное состояние / под ред. Лукашенко С. Н. Павлодар: Дом печати, 2008. 24 с.
5. Исследование площадного радиоактивного загрязнения испытательной площадки «Опытное поле» (2012–2014 гг.) / М. А. Умаров [и др.] // Вестник НЯЦ РК. 2016. Вып. 1. С. 142–148.
6. Development of Measures for Limiting Negative Impacts of the «Atomic» Lake on Population and Environment / S. B. Subbotin [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 223–224. 106389. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106389>

7. $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ ratios in soil of epicentral zones of «Experimental Field» testing site of Semipalatinsk Test Site / Yu. V. Baklanova [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 213. 106103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106103>

REFERENCES

1. Keller O. N., Kashirsky V. V., Zakharova N. V., Savinkova O. V. Revisited the Necessity of Making Reference Materials Containing Radionuclides for Radioecological Research in the Republic of Kazakhstan. *Metrology – Scientific-Technical Journal*. 2019;1(68):83–85. (In Russ.).
2. Larionova N. V., Lukashenko S. N., Kabdyrakova A. M., Kunduzbayeva A. Y., Panitskiy A. V., Ivanova A. R. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;186:163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.006>
3. Kabdyrakova A. M., Lukashenko S. N., Mendubaev A. T., Kunduzbayeva A. E., Panitskiy A. V., Larionova N. V. Distribution of Artificial Radionuclides in Particle-Size Fractions of Soil on Fallout Plumes of Nuclear Explosions. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;186:45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.022>
4. Lukashenko S. N. ed. Semipalatinsk Test Site. Current situation. Pavlodar: Dom pechati; 2008. 24 p. (In Russ.).
5. Umarov M. A., Lukashenko S. N., Moshkov A. S., Batyrbekov E. G., Berezin S. A., Dmitropavlenko V. N., Osintsev A. Yu., Novikov A. A. Study of Areal Radioactive Contamination at «Experimental Field» Testing Site (2012–2014). *NNC RK Bulletin*. 2016;(1):142–148. (In Russ.).
6. Subbotin S. B., Aidarkhanov A. O., Romanenko V. V., Krivitskiy P. Ye., Umarov M. A., Monachenko V. N. et al. Development of Measures for Limiting Negative Impacts of the «Atomic» Lake on Population and Environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;223–224:106389. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106389>
7. Baklanova Yu. V., Umarov M. A., Dyuisembaeva M. T., Lukashenko S. N. $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ ratios in soil of epicentral zones of «Experimental Field» testing site of Semipalatinsk Test Site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;213:106103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106103>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ГОСТ 8.531-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава монолитных и дисперсных материалов. Способы оценивания однородности = State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference materials of composition of solid and disperse materials. Ways of homogeneity assessment : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 13 августа 2002 г. № 299-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 8.532-2002 введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 марта 2003 г. : переиздание : дата введения 2003.03.01. / разработан Уральским научно-исследовательским институтом метрологии (УНИИМ). Москва : Стандартинформ, 2008. 10 с. Текст : непосредственный.

ГОСТ 8.532-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава веществ и материалов. Межлабораторная метрологическая аттестация. Содержание и порядок проведения работ = State system for ensuring the uniformity of measurements. Certified reference materials of composition of substances and materials. Interlaboratory metrological certification. Content and order of work : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 13 августа 2002 г. № 299-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 8.532-2002 введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 марта 2003 г. : переиздание : дата введения 2003.03.01. / разработан Уральским научно-исследовательским институтом метрологии (УНИИМ). Москва : Стандартинформ, 2008. 10 с. Текст : непосредственный.

МВИ Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectralLine» : методика измерений / разработана Лабораторией спектрометрии и радиометрии (ЛСРМ), Научно-производственный центр Аспект им. Ю. К. Недачина (НПЦ Аспект). Менделеево : 2014. 26 с. Текст : непосредственный.

МВИ Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного бета-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» : методика измерений / разработана Центром метрологии ионизирующих излучений, Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП ВНИИФТРИ). Менделеево : 2004. 21 с. Текст : непосредственный.

МВИ № 499-АЭС/МС МКХА Методика количественного химического анализа. Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами : методика измерений / разработана Институтом проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (ИПТМ РАН), Всероссийским научно-исследовательским институтом минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС). Москва : 2015. 69 с. Текст : непосредственный.

СТ РК 2.188-2010 ГСИ РК (Р 50.2.031-2003 ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Методика оценивания характеристики стабильности) Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Методика оценивания

характеристики стабильности = Reference materials of the composition and properties of substances and materials. Method for assessing the characteristics of stability : приказом Комитета по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и новых технологий Республики Казахстан от 09 августа 2010 года № 353-од : введено впервые : дата введения 2010.08.09. / разработан Уральским научно-исследовательским институтом метрологии (УНИИМ). Москва : Издательство стандартов, 2004. 12 с. Текст : непосредственный.

РМГ 93–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Оценивание метрологических характеристик стандартных образцов = State system for ensuring the uniformity of measurements. Estimation of metrological characteristics of reference materials: межгосударственный стандарт по стандартизации, метрологии и сертификации: утвержден и введен в действие 4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июля 2016 г. № 864-ст межгосударственные рекомендации РМГ 93–2015 введены в действие в качестве национальных рекомендаций Российской Федерации с 1 января 2017 г. : переиздание : дата введения 2017.01.01. / разработан Уральским научно-исследовательским институтом метрологии (УНИИМ). Москва : Стандартинформ, 2016. 27 с. Текст : непосредственный.

KZ.04.01.00007–2020. Стандартный образец удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове СИП // Информационная система технического регулирования : официальный сайт. 2021. URL: <https://techreg.qoldau.kz/ru/metrology/gsi/registry4-list>

KZ.04.01.00008–2020. Стандартный образец удельной активности радионуклидов европия ^{152}Eu , кобальта ^{60}Co , массовой доли элементов Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Fe, Mn, As в почвенном покрове СИП // Информационная система технического регулирования : официальный сайт. 2021. URL: <https://techreg.qoldau.kz/ru/metrology/gsi/registry4-list>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Оксана Николаевна Келлер – руководитель группы разработки и аттестации стандартных образцов, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ). Республика Казахстан, 071100, г. Курчатова, ул. Бейбіт атом, 2Б e-mail: keller_091985@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9352-3086>

Жастлек Жасланович Суюндуков – лаборант группы разработки и аттестации стандартных образцов, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ). Республика Казахстан, 071100, г. Курчатова, ул. Бейбіт атом, 2Б e-mail: Suyundukov@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0002-6983-5941>

Асан Оралханович Айдарханов – кандидат биологических наук, директор филиала Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ). Республика Казахстан, 071100, г. Курчатова, ул. Бейбіт атом, 2Б e-mail: Asan@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0003-3047-5869>

Ажар Жумановна Ташекова – кандидат биологических наук, инженер отдела аналитических исследований, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ). Республика Казахстан, 071100, г. Курчатова, ул. Бейбіт атом, 2Б e-mail: Esenzholova@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0002-2367-6498>

Нурлан Жумагазыевич Мухамедияров – ведущий инженер отдела аналитических исследований, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ). Республика Казахстан, 071100, г. Курчатова, ул. Бейбіт атом, 2Б e-mail: mukhamediyarov@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0001-5073-5978>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana N. Keller – Lead of the Team for Development and Certification of Reference Materials, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE). 2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan e-mail: keller_091985@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9352-3086>

Zhastlek Zh. Suyundukov – Lab Assistant in the Team for Development and Certification of Reference Materials, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE). 2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan e-mail: Suyundukov@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0002-6983-5941>

Asan O. Aidarkhanov – Cand. Sci. (Biol.), Director, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE). 2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan e-mail: Asan@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0003-3047-5869>

Azhar Zh. Tasheкова – Cand. Sci. (Biol.), Engineer of the Department for Analytical Research, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE). 2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan e-mail: Esenzholova@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0002-2367-6498>

Nurlan Zh. Mukhamediyarov – Engineer of the Department for Analytical Research, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE). 2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan e-mail: mukhamediyarov@nnc.kz <https://orcid.org/0000-0001-5073-5978>

Наталья Владиславна Захарова – и. о. начальника отдела аналитических исследований, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ).
Республика Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
e-mail: zaharova@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0002-7764-5857>

Арай Еркемовна Темиржанова – инженер отдела аналитических исследований, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ).
Республика Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
e-mail: temirzhanova@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0003-2820-2731>

Гани Мухтарович Есильканов – инженер отдела аналитических исследований, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ).
Республика Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
e-mail: yessilkanov@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0001-6834-2312>

Ербол Зейнелгазинович Шакенов – инженер отдела аналитических исследований, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ).
Республика Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
e-mail: shakenov@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0002-5707-8955>

Владимир Валерьевич Колбин – инженер отдела аналитических исследований, филиал Института радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ).
Республика Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
e-mail: kolbin@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0003-0447-1187>

Natalia V. Zakharova – Acting Head of the Department for Analytical Research, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE).
2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan
e-mail: zaharova@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0002-7764-5857>

Arai Ye. Temirzhanova – Engineer of the Department for Analytical Research, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE).
2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan
e-mail: temirzhanova@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0003-2820-2731>

Ghani M. Yesilkanov – Engineer of the Department for Analytical Research, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE).
2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan
e-mail: yessilkanov@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0001-6834-2312>

Yerbol Z. Shakanov – Engineer of the Department for Analytical Research, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE).
2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan
e-mail: shakenov@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0002-5707-8955>

Vladimir V. Kolbin – Engineer of the Department for Analytical Research, Branch Institute of Radiation Safety and Ecology (IRSE).
2B Beibit Atom str., Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan
e-mail: kolbin@nnc.kz
<https://orcid.org/0000-0003-0447-1187>