

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

MATERIAL ANALYSIS, DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF REFERENCE MATERIALS

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

DOI 10.20915/2077-1177-2015-0-4-22-27

УДК 006.9:53.089.6:556.18

DEVELOPMENT OF A REFERENCE MATERIAL FOR WATER INDUSTRY

M. Mazánová, V. Zdychová, P. Dryák, R. Blůdovský

The aim of our work was to develop and evaluate a homogenised material for the new IONEX resin reference material for NORM industries. The IONEX resin is a material from water purification filters. This work is a part of the European Research Project MetroNORM “Metrology for Processing Materials with High Natural Radioactivity”, contract identifier JRP IND57. The current research resulted from the necessity of installing the technology for removing uranium from water in some areas in Europe [1, 2]. The European project JRP IND57 MetroNORM is perfectly suited for an accurate and precise determination of hazardous NORM materials. Proper evaluation of NORM materials is highly needed for the protection of health and minimization of economic and ecological burdens.

Key words: NORM industry, reference material, IONEX resin, natural uranium.

✓ **When quoting reference:** Mazánová M., Zdychová V., Dryák P., Blůdovský R. Development of a reference material for water industry. *Stand. obraz. – Reference materials*, 2015, No. 4, pp. 22–33. (In Russian).

Authors:

MAZÁNOVÁ M.

Mgr., metrologist, Czech Metrology Institute (CMI),
Regional Branch Prague
Radiová 1a, 102 00 Prague 10, Czech Republic
E-mail: mmazanova@cmi.cz

ZDYCHOVÁ V.

Ing., metrologist, Czech Metrology Institute (CMI),
Regional Branch Prague
Radiová 1a, 102 00 Prague 10, Czech Republic
E-mail: vzdychova@cmi.cz

DRYÁK P.

RNDr., CSc., metrologist, Czech Metrology Institute (CMI),
Regional Branch Prague
Radiová 1a, 102 00 Prague 10, Czech Republic
E-mail: pdryak@cmi.cz

BLŮDOVSKÝ R.

RNDr., CSc., metrologist, Czech Metrology Institute (CMI),
Regional Branch Prague
Radiová 1a, 102 00 Prague 10, Czech Republic
E-mail: rbludovsky@cmi.cz

Introduction

Naturally occurring radionuclides are present at varying concentrations in many natural resources. Industrial activities that exploit these resources may increase the concentrations of radioactive materials and thus increasing the danger of exposure to Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in products, by products, residues and wastes. Industry sectors focus on the measurement of ionizing radiation originating from artificial radionuclides. Naturally occurring radionuclides are often taken as a part of the natural background, regardless of their concentrations. NORM industries, however, produce large amounts of waste, therefore higher concentrations may significantly add to a range of hazards. When such materials are being handled or processed, it is clearly necessary to determine as accurately as possible the nuclides present and their activity concentrations. This creates the need to develop reference materials enabling accurate measurements of natural radionuclides. The project MetroNORM offers novel reference materials for lots of candidate materials including residue/waste from Ta/Nb ore processing, residue/waste from phosphogypsum processing, coal ash of the type used in building, tuff of the type used in building, residue/waste from TiO₂ production, building aggregates, IONEX resin from water industry, FeO(OH)/MnO₂ sludge from water industry and oil wastes. All this will help to increase the production effectiveness and improve and optimize production technology in NORM and TENORM industries. The IONEX technology (Fig. 1) is beneficial because it is highly selective for uranium, does not change the taste or properties of drinking water and is easy to operate. IONEX is a material from water purification filters used for removing uranium from water and can be regenerated. The obtained uranium can be used in another industry



Figure 1. The process of water purification in waterworks

sector. Regarding water composition, there are two types of IONEX: weakly basic annex and strongly basic annex. The sample in Fig. 2 is a strongly basic annex. It is a styren-divinylbenzene copolymer with trialkyl-amin-groups. The insoluble matrix in the form of small beads provides a high surface area. Mean bead size is 0.64 mm.

Experimental part

Radioactivity measurements were performed by gamma-ray spectrometry employing a high-purity germanium coaxial detector (model GC4018, crystal length 63 mm and diameter 60.5 mm) with a cryostat (model 7500SL), preamplifier (model 2002CLS), and digital signal analyser Lynx of 8192 channels manufactured by CANBERRA. The relative efficiency is 40 %, the resolution is 1.8 keV (FWHM) for the 1.33 MeV gamma-ray and 0.75 keV (FWHM) for the 122 keV gamma-ray of ⁶⁰Co. A shield containing lead bricks of 10 cm thickness, a Cd material of 0.1 cm thickness and a brass material of 0.1 cm thickness were used to reduce gamma-ray background. The sample of IONEX contained a large amount of carbonates (sediments from water, approx. 250 g per 1 kg of IONEX), which caused inhomogeneity of the sample and had to be removed from the sample before γ -spectrometry measurement. The sample immersed in distilled water was placed into the ultrasonic bath. Then, the sample was washed with distilled water on a sieve (0.3 mm). Most of carbonates were removed. No significant amount of uranium was detected in the waste water nor in the removed carbonates. The activity was measured with the liquid scintillation counter. The sediments were homogenously distributed in the scintillation cocktail (Ready Gel) and waste water was measured as scintillation cocktail (Ultima Gold). A sample of the treated IONEX was finally air dried and mixed up.

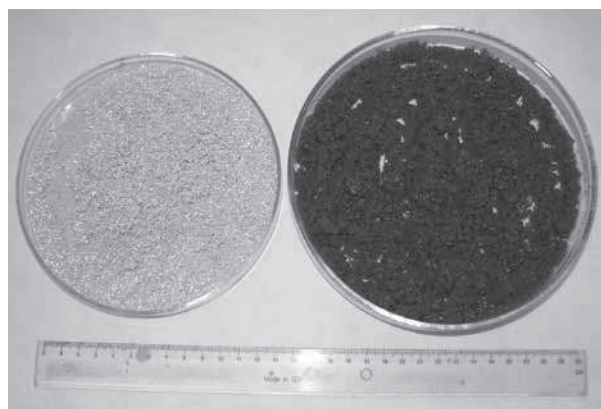


Figure 2. IONEX before (right side) and after (left side) regeneration

Discussion of the results

The same amount of the reference material IONEX resin (94.58 (19) g) was filled in seven identical containers to check radiation homogeneity (Fig. 3). Each of these containers was measured for 50,000 seconds. Then the spectra were analysed and net peak counts of the most intense peaks were compared. The coefficient of variation was up to 1 %. The evaluation data of homogeneity for the reference material IONEX resin from gamma-spectrometry measurement are given in Table 1.

Using the MCNP code, total efficiencies and peak efficiencies were calculated with a suitable accuracy. The obtained efficiency curves were used for the calculation of the coincidence summing correction factors and the appropriate activities of the samples (Fig. 4). The source was placed at the distance of 3 cm from the detector. To obtain the efficiency calibration curve for the 3 cm geometry, calculated efficiencies covering the energy range 46.54–1.764 keV were used (Table 2). The reliability of the Monte Carlo code in calculating summing corrections was tested by comparing the results computed for the mixture of radionuclides with the known activities (radionuclides contained in the sample with silicone rubber: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{239}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{203}Hg and ^{88}Y).

For measuring geometry 3 cm and the detector GC4018, correction factors were calculated for ^{235}U . They



Figure 3. The reference material IONEX resin filled in seven identical containers

were calculated for predominant γ -emissions significantly affected by coincidence-summing effects. In order to obtain reliable activity values for some natural radionuclides coincidence summing cannot be neglected in environmental measurements at small source-detector distances. The sample of IONEX resin was kept in an 85-ml metal container of 6 cm diameter, 3-cm height and 1-mm thickness of the bottom (Fig. 5). The chemical composition of the container is given in Table 3. Bulk density of the active IONEX sample was 0.79 g cm^{-3} . The content of water in IONEX resin sample was determined as 10 %. The samples were

Table 1

Evaluation data from the measurement of the homogeneity

Radionuclide		Peak area							
		Th-234, Pa-234	Th-234, U-235	U-235	U-235	U-235	U-235	Pa-234m	Pa-234m
Energy, keV		63.3, 62.7	92.38, 92.8, 93.351	143.767	163.356	185.72	205.316	766.361	1001.026
Sample	1	433768	805194	88602	41075	424673	34351	17562	38444
	2	433224	815118	88954	41085	426467	34046	17734	38540
	3	432327	806705	89403	40195	423955	34071	17763	38725
	4	434702	811453	89754	40775	427172	34355	17874	38635
	5	435186	809963	89264	40323	426861	34131	17537	38851
	6	437325	812135	89514	40447	427504	34559	17577	38908
	7	437749	813453	88022	40192	427184	33775	17928	38907
Average		434897	810574	89073	40584	426259	34184	17711	38716
Standard Deviation		1883	3304	553	363	1280	239	145	170
Coefficient of Variation, %		0.43	0.41	0.62	0.89	0.3	0.7	0.82	0.44

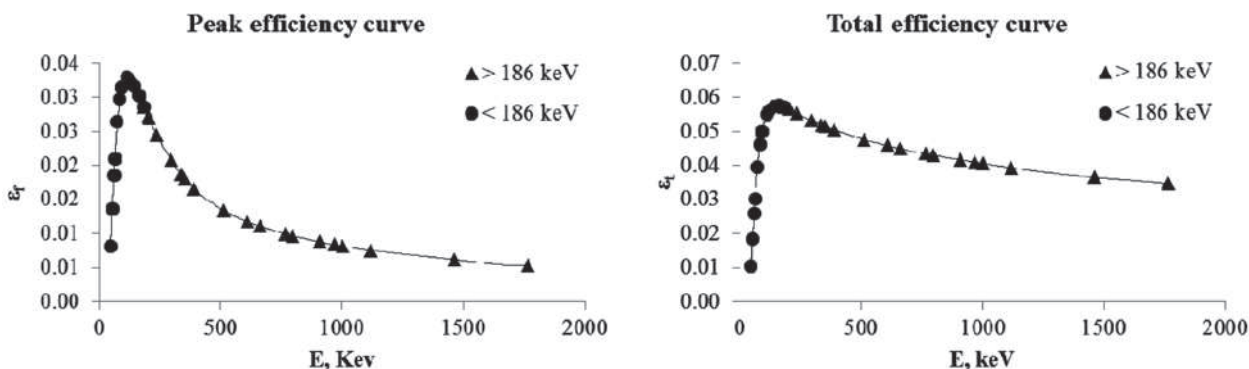


Figure 4. Peak efficiency and total efficiency curves calculated in MCNP code

Table 2
Thirty-three energies used for MCNP efficiency calculations

E, keV						
46.54	84.21	143.8	202.1	351.9	766.4	1120
53.2	92.38	163.4	205.3	391.7	798.1	1461
59.54	92.8	165.9	238.6	514	911.2	1764
63.3	112.8	185.7	295.2	609.3	969	–
73.92	120.9	186.2	338.3	661.7	1001	–

Table 3
Elemental composition of the IONEX resin and metal container

IONEX resin		Metal container			
Element	Abundance, %	Element	Abundance, %	Element	Abundance, %
C	59.7	Si	1.1	Zn	0.05
N	11.5	Fe	0.24	Ti	0.02
O	12.2	Cu	0.03	Pb	0.01
H	11.4	Mn	0.53	Al	97.51
S	4.6	Mg	0.61	Cr	0.02
U	0.5				



Figure 5. Sample with reference material IONEX resin

Table 4
Calculated coincidence summing corrections factors for the sample in 3-cm geometry

Radionuclide	E, keV	Cs
U-235	143.77	1.0035
U-235	163.35	1.0014
U-235	185.72	1.0035

dried in a desiccator with P₂O₅. The elemental composition of the IONEX analysed by Elementar vario EL III is also given in Table 3.

The summing correction factors were calculated for the main γ -emissions of ²³⁵U (Table 4). ²³⁸U does not yield any significant γ -lines, and its activity can be estimated by means of its progeny ^{234m}Pa.

The air-dried sample was measured for 50,000 seconds. The activity of each radionuclide for a peak at energy E was computed according to the following formula [3]:

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot t \cdot Y} \cdot C_s$$

$$C_s = 1 / (K_c \cdot K_s)$$

$$K_s(E_0) = 1 + \frac{Ps(1) \cdot P(E_{1_1}) \cdot P(E_{2_1})}{P(E_0)} + \frac{Ps(2) \cdot P(E_{1_2}) \cdot P(E_{2_2})}{P(E_0)} + \dots$$

$$K_c(E_0) = 1 - Pc(LX) \cdot T(LX) - Pc(KX_\alpha) \cdot T(KX_\alpha) - Pc(KX_\beta) \cdot T(KX_\beta) - Pc(E_{1_1}) \cdot T(E_{1_1}) - Pc(E_{1_2}) \cdot T(E_{1_2}) \dots$$

where N is the number of counts in a given peak area corrected for background peaks of a peak at energy E , ε is the peak efficiency at energy E , t is the counting live time, Y is a number of gammas per disintegration of the nuclide for a transition at energy E , $C_s = K_c \cdot K_s$ – true

Table 5
Activity of U_{nat} (^{235}U , ^{238}U) in the air-dried sample

Radionuclide	Mass activity, kBq/kg
U-235	6.5 (1) (k = 1)
U-238	145 (4) (k = 1)

summing coincidence correction factor for summing in K_s and summing out K_c effects, $Ps(i)$ denotes the summing coefficients, $P(E_{1_1})$, $P(E_{2_1})$, $P(E_{1_2})$, $P(E_{2_2})$ and $P(E_0)$ denote peak efficiencies for photons with energy E_{1_1} , E_{2_1} , E_{1_2} , E_{2_2} and E_0 , $E_0 = E_{1_1} + E_{2_1} = E_{1_2} + E_{2_2} = \dots$, Pc denotes the summing coefficients of the E_0 with LX , KX_α , KX_β , E_{1_1} , E_{1_2} . The results of calculated activities are given in Table 5. The spectrum of the sample, gathered for a long time period of 50,000 s, contains many gamma energy lines (Table 6) and is shown in Fig. 6.

Conclusion

Homogenised material for the new reference material for water industry was evaluated. This candidate refer-

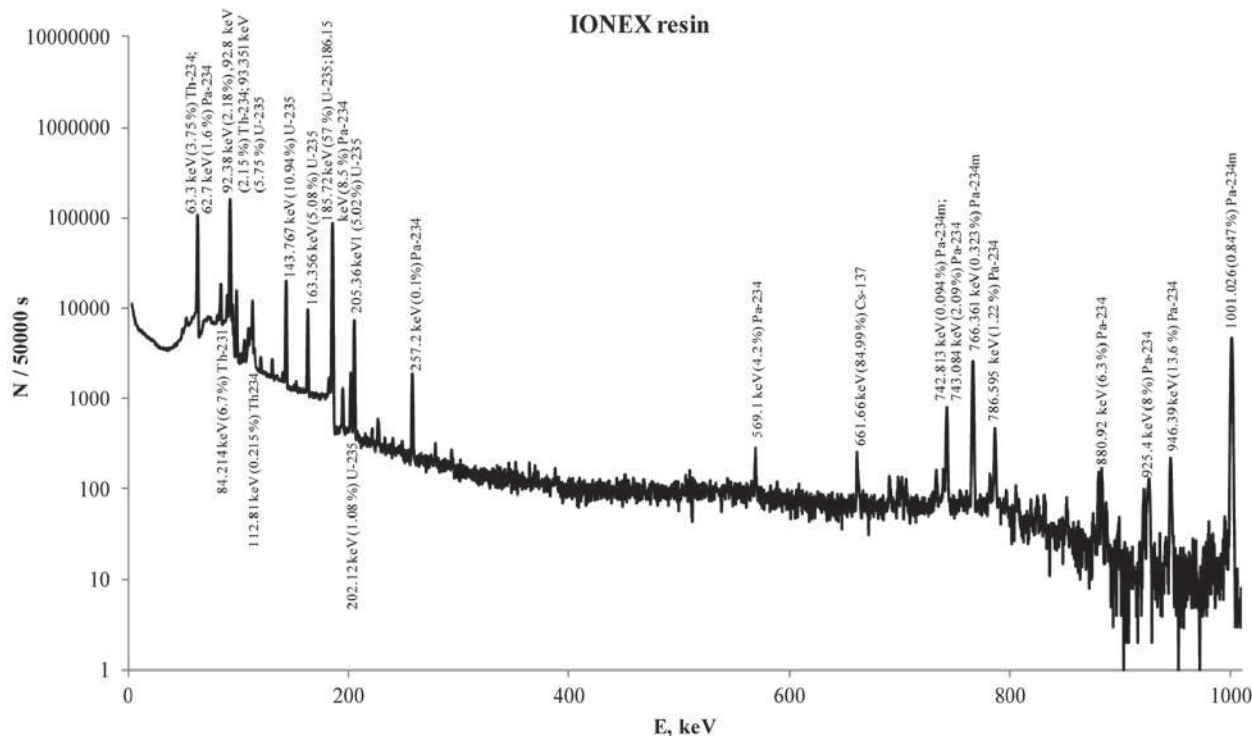


Figure 6. Characteristic net gamma spectra of the source with IONEX containing natural radionuclides

Table 6

Natural radionuclides with energies (E) and gamma emission probabilities (Y) derived from the spectra [4]

RN	E , keV	Y , %	RN	E , keV	Y , %
Th-234	63.3 (2)	3.75 (8)	U-235	163.356 (3)	5.08 (3)
Th-234	73.92 (2)	0.0133 (14)	U-235	185.72 (4)	57 (3)
Th-231	84.214 (13)	6.7 (7)	U-235	202.12 (1)	1.08 (2)
Th-234	92.38 (1)	2.18 (19)	U-235	205.316 (4)	5.02 (5)
Th-234	92.8 (2)	2.15 (19)	Pa-234m	766.361 (20)	0.323 (4)
Th-234	112.81 (5)	0.215 (22)	Pa-234m	1001.026 (18)	0.847 (8)
U-235	143.767 (3)	10.94 (6)			

ence material was prepared from a real NORM material. IONEX material is usually contained in the filters for water purification where it removes uranium from drinking water. The radioactive homogeneity of the reference material was validated from the measurements of seven identical samples. Evaluation results show that the samples with IONEX reference material are radioactive homogenised up to 1 %. For the activity measurement of the ^{235}U and ^{238}U , the HPGe detector was used, and the MCNP model was applied for the calculation of the correction factors. The MCNP code

was tested by comparing the results computed for a mixture of radionuclides, contained in the sample as silicon rubber, with the known activities of the radionuclides. The activity of the ^{235}U is in units of kBq kg^{-1} and the activity of the ^{238}U is in hundreds of kBq kg^{-1} .

Acknowledgements

The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union.

REFERENCES:

1. Czech Government Decree No. 18/1997 SB. Czech Republic 2002.
2. Guidelines for drinking-water quality – 4th edition. ISBN 978 92 4 154815 1. WHO 2011.
3. Dryák P., Kovář P. Table for true summation effect in gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 279, No.2 (2009), pp. 385–394.
4. Table de Radionucléides, 2015. Available at: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm.

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНОГО ОБРАЗЦА ДЛЯ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Мазанова М., Здыхова В., Дрыак П., Блудовский Р.

Данная работа была проведена с целью создания и оценивания однородности материала для нового стандартного образца смолы IONEX, предназначенного для контроля при производстве радиоактивных материалов природного происхождения. Смола IONEX – это материал из фильтров для очистки воды. Данная работа является частью Европейского исследовательского проекта MetroNORM «Метрология для обработки радиоактивных материалов природного происхождения», контракт JRP IND57. Настоящее исследование обусловлено необходимостью в технологиях для очистки воды от урана в некоторых районах Европы [1, 2]. Европейский проект JRP IND57 MetroNORM полностью подходит для правильного и точного определения потенциально опасных материалов с природной радиоактивностью. Достоверная оценка радиоактивных материалов природного происхождения необходима для охраны здоровья и минимизации экономических и экологических затрат.

Ключевые слова: производство радиоактивных материалов природного происхождения, стандартный образец, смола IONEX, природный уран.

✓ **Ссылка при цитировании:** Разработка стандартного образца для водного хозяйства / М. Мазанова [и др.], пер. с англ. // Стандартные образцы. 2015. № 4. С. 22–33.

Авторы:

МАЗАНОВА М.

Метролог Чешского метрологического института (СМИ),
Пражское региональное отделение, магистр
Чешская Республика, 102 00, Прага 10, Радиовая, 1а
E-mail: mmazanova@cmi.cz

ЗДЫХОВА В.

Инженер, метролог Чешского метрологического
института (СМИ),
Пражское региональное отделение
Чешская Республика, 102 00, Прага 10, Радиовая, 1а

ДРЫАК П.

Метролог Чешского метрологического института (СМИ),
Пражское региональное отделение, канд. хим. наук
Чешская Республика, 102 00, Прага 10, Радиовая, 1а
E-mail: pdryak@cmi.cz

БЛУДОВСКИЙ Р.

Метролог Чешского метрологического института (СМИ),
Пражское региональное отделение, канд. хим. наук
Чешская Республика, 102 00, Прага 10, Радиовая, 1а
E-mail: rbludovsky@cmi.cz

Введение

Радионуклиды, встречающиеся в природе, присутствуют в различных концентрациях во многих природных ресурсах. При использовании данных ресурсов в производстве концентрация радиоактивных материалов может возрасти, и таким образом возрастет опасность воздействия радиоактивных материалов природного происхождения (РМПП) в продуктах, побочных продуктах, остатках и отходах производства. Промышленные секторы ориентируются на измерения радиоактивного излучения, происходящего из искусственных радиону-

клидов. Естественные радионуклиды часто воспринимаются как естественно-природный фон независимо от их концентрации. Индустрия РМПП, однако, вырабатывает огромное количество отходов, следовательно, повышенные концентрации могут значительно увеличивать риски. При обработке таких материалов необходимо определить как можно точнее присутствующие нуклиды и их активную концентрацию. Все это обуславливает необходимость создания стандартного образца, обеспечивающего точные измерения радионуклидов естественного происхождения. Проект MetroNORM представляет новые стандартные образцы для многих перспективных



Рис. 1. Установка для очистки воды в системе водоснабжения

материалов, включая остатки/отходы переработки руды Ta/Nb, отходы фосфогипсовой переработки, каменной золы и вулканического туфа, используемых при строительстве, отходы производства диоксида титана и каменных материалов, смолы IONEX от водного хозяйства, FeO(OH)/MnO₂ шлам от водного хозяйства и отходы нефти. Все это поможет увеличить эффективность производства и улучшить и оптимизировать технологии производства РМПП и обогащенных радиоактивных материалов. Технология IONEX (рис. 1) целесообразна, потому что является высокоизбирательной по урану, не изменяет вкус и свойства питьевой воды и проста в обслуживании. IONEX – это материал из фильтров, очищающих воду от урана, с возможностью регенерации. Полученный уран можно использовать в других промышленных секторах. Что касается состава воды, существует два типа материалов IONEX: слабоосновная и сильноосновная установка. На рис. 2 показано сильноосновная установка. Это стирол-дивинилбензола сополимеры с группами триалкил-амин. Нерастворимая матрица в форме небольших шариков обуславливает большую площадь поверхности. Средний размер шариков равен 0,64 мм.

Экспериментальная часть

Радиоактивные измерения проведены методом гамма-спектрометрии с высокочувствительным германиевым коаксиальным детектором (модель GC4018, длина кристалла 63 мм и диаметр 60,5 мм) с криостатом (модель 7500SL), предварительным усилителем (модель 2002CLS), анализатором цифровых сигналов Lynx 8192 каналов производства CANBERRA. Относительная эффективность составляет 40 %, разрешение 1,8 кэВ (FWHM) для

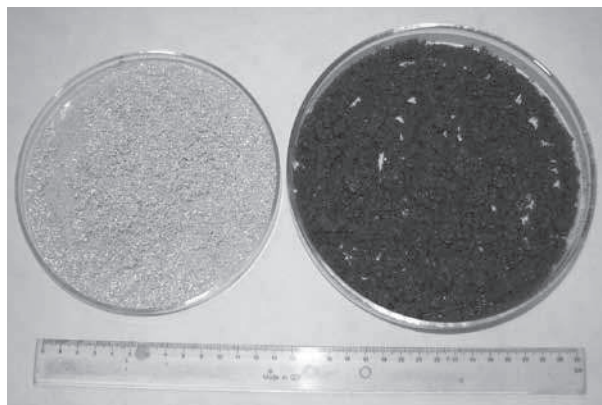


Рис. 2. Материал IONEX до (справа) и после (слева) регенерации

1,33 МэВ гамма-лучей и 0,75 кэВ (FWHM) для 122 кэВ гамма-лучей ⁶⁰Co. Для снижения фона гамма-лучей применяли экран, содержащий кубики свинца, толщиной 10 см, материал Cd толщиной 0,1 см и медный материал толщиной 0,1 см. Образец IONEX содержал большое количество карбонатов (осадки из воды, примерно 250 г на 1 кг IONEX), что спровоцировало неоднородность образца. Карбонаты были удалены из образца перед измерением методом γ -спектрометрии. Образец был погружен в дистиллированную воду в ультразвуковой ванне. Затем образец был вымыт дистиллированной водой на сите (0,3 мм). Большая часть карбонатов была удалена. Никаких значительных сигналов урана не было выявлено ни в остатках воды, ни в удаленных карбонатах. Активность измеряли при помощи жидкостного сцинтилляционного счетчика. Осадки были однородно распределены в сцинтилляционную смесь (готовый гель), и остатки воды измерялись как сцинтилляционная смесь (Ultima Gold). Образец обработанного материала IONEX был окончательно высушен на воздухе и размешан.

Обработка результатов

Одинаковое количество материала стандартного образца смолы IONEX (94,58 (19) г) было упаковано в семь одинаковых контейнеров для проверки радиационной однородности (рис. 3). Измерения по каждому контейнеру проводили в течение 50 000 секунд. Затем проанализировали спектры и сравнили число чистых пиков наиболее интенсивных пиков. Вариационный коэффициент в пределах 1 %. В табл. 1 представлены оценочные данные по однородности стандартного образца смолы IONEX, полученные при помощи измерений методом γ -спектрометрии.

Таблица 1
Оценочные данные, полученные при измерении однородности

Радионуклид		Th-234, Pa-234	Th-234, U-235	U-235	U-235	U-235	U-235	Pa-234m	Pa-234m
Энергия, кэВ		63,3; 62,7	92,38; 92,8; 93,351	143,767	163,356	185,72	205,316	766,361	1001,026
Образец	1	433 768	805 194	88 602	41 075	424 673	34 351	17 562	38 444
	2	433 224	815 118	88 954	41 085	426 467	34 046	17 734	38 540
	3	432 327	806 705	89 403	40 195	423 955	34 071	17 763	38 725
	4	434 702	811 453	89 754	40 775	427 172	34 355	17 874	38 635
	5	435 186	809 963	89 264	40 323	426 861	34 131	17 537	38 851
	6	437 325	812 135	89 514	40 447	427 504	34 559	17 577	38 908
	7	437 749	813 453	88 022	40 192	427 184	33 775	17 928	38 907
Среднее стандартное отклонение		434 897	810 574	89 073	40 584	426 259	34 184	17 711	38 716
		1883	3304	553	363	1280	239	145	170
Вариационный коэффициент, %		0,43	0,41	0,62	0,89	0,3	0,7	0,82	0,44

Полная и максимальная эффективность были рассчитаны при помощи MCNP-кода с соответствующей точностью. Полученные кривые эффективности были использованы для расчета коэффициента суммирующей коррекции совпадений и соответствующих активностей образцов (рис. 4). Источник находился на расстоянии 3 см от детектора. Расчетные эффективности, покрывающие диапазон энергии 46,54–1,764 кэВ, использовались для поддержания кривой калибровки эффективности для геометрии 3 см (табл. 2). Надежность кода Монте-Карло в расчете суммирующих коррекций была проверена посредством сравнения результатов,

подсчитанных для смеси радионуклидов с известными активностями (радионуклиды, содержащиеся в образце с силиконовым каучуком: 241Am, 109Cd, 239Pu, 57Co, 60Co, 137Cs, 113Sn, 85Sr, 203Hg and 88Y).

Для измерения геометрии 3 см и детектора GC4018 были рассчитаны поправочные коэффициенты для 235U. Они были рассчитаны для преобладающего γ -излучения, на которое в значительной степени влияет суммирование эффектов совпадений. Чтобы поддерживать надежные значения активности для некоторых естественных радионуклидов, нельзя пренебрегать совпадением суммирования в измерениях окружающей среды при



Рис. 3. Стандартный образец смолы IONEX, упакованный в семь одинаковых контейнеров

Таблица 2
Значения энергии, используемые для расчетов эффективности MCNP

E, keV						
46,54	84,21	143,8	202,1	351,9	766,4	1120
53,2	92,38	163,4	205,3	391,7	798,1	1461
59,54	92,8	165,9	238,6	514	911,2	1764
63,3	112,8	185,7	295,2	609,3	969	–
73,92	120,9	186,2	338,3	661,7	1001	–

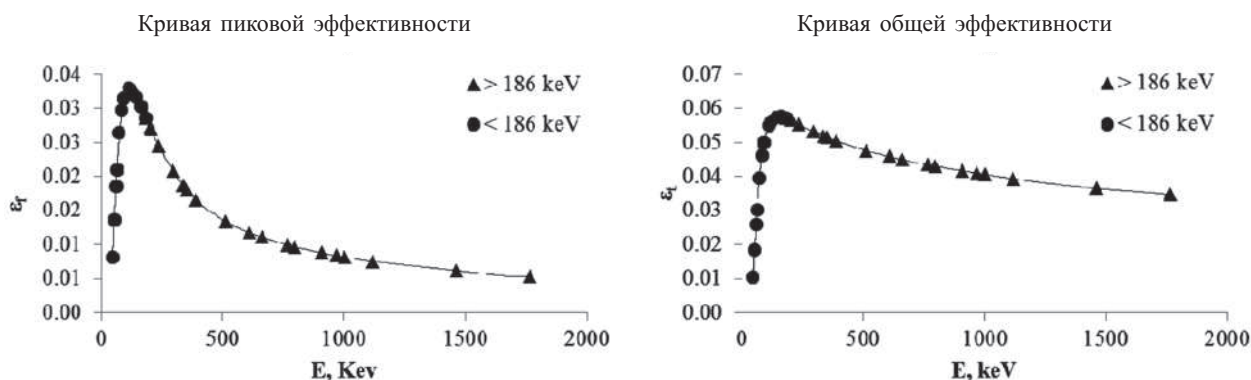


Рис. 4. Кривые пиковой и общей эффективности, рассчитанные при помощи MCNP-кода

малых расстояниях между источником и приемником. Образец смолы IONEX был помещен в металлический контейнер объемом 85 мл, 6 см в диаметре, высотой 3 см, толщина дна 1 мм (рис. 5). Химический состав контейнера указан в табл. 3. Объемный вес активного образца IONEX составил 0,79 г/см³. Содержание воды в образце смолы IONEX определено как 10 %. Образцы были высушены в сушильной печи с присутствием P205. Элементный состав материала IONEX проанализирован при помощи прибора Elementar vario EL III и приведен в табл. 3.

Суммирующие поправочные коэффициенты были рассчитаны для основного γ -излучения ²³⁵U (табл. 4). Присутствие ²³⁸U не приносит каких-либо значительных γ -линий, и его активность можно оценить, используя продукт его распада ^{234m}Pa.



Рис. 5. Образец со стандартным образцом смолы IONEX

Высушенный на воздухе образец измеряли в течение 50 000 секунд. Активность каждого радионуклида для пика при энергии E рассчитывалась по следующей формуле [3]:

Таблица 3
Элементный состав смолы IONEX и металлического контейнера

смола IONEX		Металлический контейнер			
Элемент	Концентрация, %	Элемент	Концентрация, %	Элемент	Концентрация, %
C	59,7	Si	1,1	Zn	0,05
N	11,5	Fe	0,24	Ti	0,02
O	12,2	Cu	0,03	Pb	0,01
H	11,4	Mn	0,53	Al	97,51
S	4,6	Mg	0,61	Cr	0,02
U	0,5				

Таблица 4
Рассчитанные коэффициенты суммирующей коррекции совпадений для образца в 3 см геометрии

Radionuclide	E, keV	Cs
U-235	143,77	1,0035
U-235	163,35	1,0014
U-235	185,72	1,0035

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot t \cdot Y} \cdot C_s$$

$$K_S(E_0) = 1 + \frac{Ps(1) \cdot P(E_{1_1}) \cdot P(E_{2_1})}{P(E_0)} + \frac{Ps(2) \cdot P(E_{1_2}) \cdot P(E_{2_2})}{P(E_0)} + \dots$$

$$K_C(E_0) = 1 - Pc(LX) \cdot T(LX) - Pc(KX_\alpha) \cdot T(KX_\alpha) - Pc(KX_\beta) \cdot T(KX_\beta) - Pc(E_{1_1}) \cdot T(E_{1_1}) - Pc(E_{1_2}) \cdot T(E_{1_2}) \dots$$

где N – число отсчетов в заданной площади пика, скорректированное для фоновых пиков пика при энергии E ;

ε – эффективность пика при энергии E ;

t – отсчет живого времени;

Y – число гамм в распаде нуклида для перехода при энергии E ;

$C_s = K_C \cdot K_S$ – истинный коэффициент коррекции суммирующих совпадений для суммирования в KS и исключения эффектов KC ;

$Ps(i)$ – суммирующие коэффициенты;

Таблица 5

Активность $U_{nat}(^{235}U, ^{238}U)$ в образце, высушенном на воздухе

Радионуклид	Массовая активность, kBq/kg
U-235	6,5 (1) ($k = 1$)
U-238	145 (4) ($k = 1$)

$P(E_{1_1}), P(E_{2_1}), P(E_{1_2}), P(E_{2_2})$ и $P(E_0)$ – эффективности пиков для фотонов с энергией $E_{1_1}, E_{2_1}, E_{1_2}, E_{2_2}$ и $E_0, E_0 = E_{1_1} + E_{2_1} = E_{1_2} + E_{2_2} = \dots$,

Pc – суммирующие коэффициенты E_0 с $LX, KX_\alpha, KX_\beta, E_{1_1}, E_{1_2}$.

Результаты рассчитанных активностей приведены в табл. 5. Спектр образца, собираемый в течение длительного времени – 50 000 секунд, содержит множество линий гамма-излучения (табл. 6, рис. 6).

Заключение

Проведены исследования гомогенизированного материала для нового стандартного образца для водного

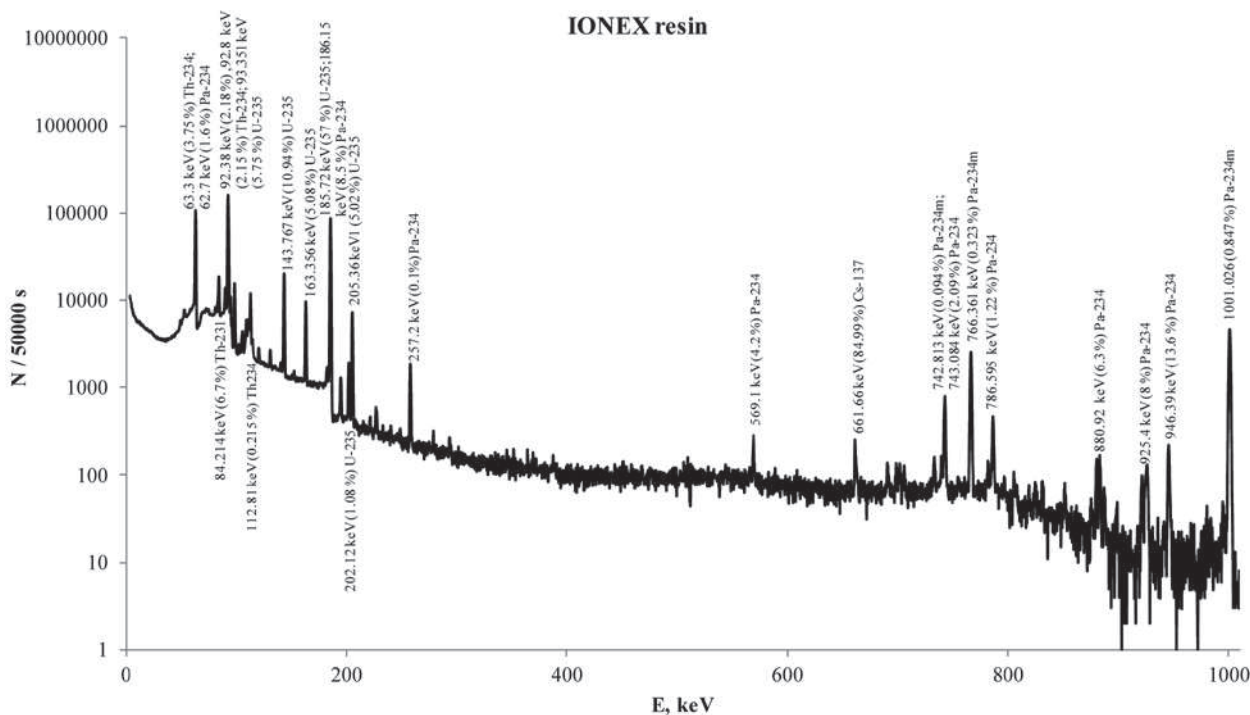


Рис. 6. Характерные чистые гамма-спектры источника с материалом IONEX, содержащим естественные радионуклиды

Таблица 6

Естественные радионуклиды с энергиями (E) и вероятностями гамма-излучений (Y), полученными из спектра [4]

RN	E , keV	Y , %	RN	E , keV	Y , %
Th-234	63,3 (2)	3,75 (8)	U-235	163,356 (3)	5,08 (3)
Th-234	73,92 (2)	0,0133 (14)	U-235	185,72 (4)	57 (3)
Th-231	84,214 (13)	6,7 (7)	U-235	202,12 (1)	1,08 (2)
Th-234	92,38 (1)	2,18 (19)	U-235	205,316 (4)	5,02 (5)
Th-234	92,8 (2)	2,15 (19)	Pa-234m	766,361 (20)	0,323 (4)
Th-234	112,81 (5)	0,215 (22)	Pa-234m	1001,026 (18)	0,847 (8)
U-235	143,767 (3)	10,94 (6)			

хозяйства. Данный перспективный стандартный образец был изготовлен из настоящего РМПП материала. Материал IONEX обычно содержится в фильтрах для очистки воды (для удаления урана из питьевой воды). Радиоактивная однородность стандартного образца подтверждена измерениями семи идентичных образцов. Результаты оценивания показывают, что материалы стандартного образца IONEX однородны по радиоактивности в пределах 1 %. Для измерения активности ^{235}U и ^{238}U применяли HPGe-детектор, для расчета коэффициентов коррекции применяли MCNP-модель. MCNP-код был проверен сравнением результатов, вычисленных для смеси радионуклидов, содержащихся в образце сили-

конового каучука, с известными активностями радионуклидов. Активность ^{235}U представлена в единицах kBq kg⁻¹ и активность ^{238}U в сотнях kBq kg⁻¹.

Благодарности

Организация EMRP совместно финансируется странами-участниками EMRP в рамках Европейской ассоциации национальных метрологических институтов и Европейского союза.

*Перевод Д.В. Сторожковой,
ФГУП «УНИИМ»*

ЛИТЕРАТУРА

1. Czech Government Decree No. 18/1997 SB. Czech Republic 2002.
2. Guidelines for drinking-water quality – 4th edition. ISBN 978 92 4 154815 1. WHO 2011.
3. Dryák P., Kovář P. Table for true summation effect in gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 279, No.2 (2009), pp. 385–394.
4. Table de Radionucléides, 2015. Available at: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm.