

УДК 621.039.51

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА k0-ИНАА ДЛЯ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Алейников Юрий Владимирович¹,
aleinikov@nnc.kz

Попов Юрий Анатольевич¹,
Popov@nnc.kz

Медетбеков Берик Сакенович¹,
medetbekov@nnc.kz

Кожуханов Сымбат Балтабекович¹,
kozkhakhanov@nnc.kz

¹ Институт атомной энергии НЯЦ РК,
Казахстан, 711100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10.

Актуальность работы состоит во внедрении компараторного метода k0-стандартизации инструментального нейтронно-активационного анализа (k0-ИНАА) при проведении исследований на реакторе ИВГ.1М, что позволит расширить область его применения. Метод k0-ИНАА характеризуется надежностью и технологичностью всех этапов анализа. При проведении исследований будет приобретен уникальный опыт адаптации прикладных методик.

Цель работы: адаптация k0-ИНАА для элементного анализа различных материалов при использовании исследовательского реактора ИВГ.1М с учетом условий облучения, физических и технических особенностей реактора.

Методы исследования: компараторный метод k0-ИНАА; характеристика мест облучения в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М (определение параметров α и f); выбор оптимальных режимов облучения образцов горных пород; подготовка и облучение образцов горных пород в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М; обработка и анализ экспериментальных данных.

Научная новизна. Апробирован метод на реакторе ИВГ.1М, определены характеристики поля нейтронов в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М для расчета концентрации элементов по методу k0-ИНАА.

Результаты. Определены концентрации элементов-аналитов в стандартных образцах горных пород методом k0-ИНАА. Исследованы поля тепловых и резонансных нейтронов на реакторе ИВГ.1М, рассчитаны значения параметров α и f для определения концентрации по методу k0-ИНАА. Определено содержание элементов-аналитов в стандартных образцах горных пород, приведены отношения расчетных и аттестованных значений концентраций элементов. Оценка точности анализа выражена в виде Z-критерия и рассчитана для элементов аналитов. Для большинства аналитических результатов значения Z-критерия находятся в пределах от 0 до 2. Таким образом, результаты элементного анализа показали хорошее согласие между аналитическими и аттестованными значениями концентрации элементов-аналитов.

Ключевые слова:

Реактор ИВГ.1М, k0-ИНАА, характеристика мест облучения, стандартные образцы горных пород, концентрация элемента-аналита, расчет погрешности, Z-критерий.

Введение

В сравнении с традиционно применяемым классическим нейтронно-активационным анализом полуабсолютный метод k0-стандартизации или метод k0-ИНАА имеет целый ряд преимуществ. Так, метод k0-стандартизации заслуживает особого внимания при серийном определении большого числа элементов в пробах, когда использование эталонов для анализа требует больших затрат труда и времени на различные подготовительные операции, измерение активности либо когда эталоны отсутствуют вообще.

При использовании метода k0-ИНАА для определения элементного состава образцов отпадает необходимость в многоэлементных стандартах, как этого требует классический относительный метод эталонов. Кроме того, этот метод обеспечивает воспроизводимость результатов анализов и

точность на том же уровне, что и метод эталонов. Особенно метод предпочтителен, когда интенсивность активирующего излучения (поток нейтронов) в одной серии анализов меняется от одного облучения к другому. Даже с появлением самых передовых ядерно-физических методов анализа элементного состава различных материалов нейтронно-активационные методы анализа по-прежнему состоят в арсенале исследователей многих стран мира. Основные работы, связанные с применением метода k0-ИНАА, публикуются в ряде журналов, таких как Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Radiation Measurements and Applied Radiation and Isotopes и др. [1–7].

В данной работе представлены результаты адаптации метода k0-ИНАА на исследовательском реакторе ИВГ.1М с использованием стандартных образцов горных пород.

Экспериментальная часть

Полуабсолютный метод КО-ИНАА требует предварительного знания некоторых характеристик поля нейтронов для определения эффективного сечения (n, γ) реакций на изотопах элементов-аналитов. Это параметры, входящие в основное расчетное соотношение: α – коэффициент, определяющий степень отличия формы спектра надтепловых нейтронов от идеального спектра Ферми, и f – отношение теплового и надтеплового потоков в канале.

Характеристики поля нейтронов в месте облучения образцов в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М определялись активационным методом с использованием активационных индикаторов (АИ). Исследования включали в себя следующие этапы:

- подготовку АИ к облучению в реакторе;
- облучение АИ в реакторе;
- измерение гамма-спектра облученных АИ;
- измерение гамма-спектра образцовых источников и калибровку спектрометра;
- определение скорости реакции на изотопах АИ;
- расчет плотности потока тепловых нейтронов;
- расчет параметра поля надтепловых нейтронов α , определяющего степень отличия формы спектра надтепловых нейтронов от идеального 1/Е-спектра;
- расчет отношения плотности потока тепловых и надтепловых нейтронов f .

Параметр f был определен методом кадмиевого отношения. Применение кадмиевого фильтра и нескольких резонансных индикаторов позволило выполнить одновременное определение параметров f и α . Были использованы наборы АИ, перекрывающие энергетический диапазон нейтронов от 1,6 эВ (индий) до 6200 эВ (цирконий): Au, Cu, In, Lu, Mn, Ru, Ta, Zr [8–11].

Среднее значение параметра α по результатам двух реакторных экспериментов составило 0,0038. Среднее значение f составило приблизительно 41.

В качестве референсных материалов были выбраны стандартные образцы горных пород (СО) [12–15], которые облучались в экспериментальном канале реактора совместно с золотосодержащим

компаратором. Контейнер с образцами находился на уровне центра активной зоны реактора.

Образцы, предназначенные для облучения в реакторе, подвергались процедуре гомогенизации (последовательное измельчение, размол, перемешивание, просеивание и сушка) и дальнейшей расфасовке в полиэтиленовые пакеты.

Мощность реактора при облучении составила 0,3 МВт, время облучения – 4000 с.

После облучения образцы проб переупаковывались в «чистые» полиэтиленовые пакеты для измерений. Измерение спектров гамма-излучения образцов проводилось на многоканальном спектрометре с полупроводниковым детектором из особо чистого германия через 1–3 сут., 6–9 сут. и 30 сут. после окончания облучения. Экспозиция при измерениях составила от 600 до 85 000 с.

Анализ результатов экспериментов

Концентрация элемента-аналита в анализируемом образце определялась в соответствии с основным уравнением [16]:

$$C_a = C_m \frac{\left(\frac{N_p/t_c}{SDCW} \right)_a}{\left(\frac{N_p/t_c}{SDCW} \right)_m} \frac{1}{k_{0,a}} \frac{1 + \theta_{0,m}(\alpha)/f \varepsilon_m}{1 + \theta_{0,a}(\alpha)/f \varepsilon_a}, \quad (1)$$

где символы a и m относятся к элементу-аналиту в образце и монитору соответственно; C_a , C_m – концентрации элемента-аналита в образце и референсного элемента монитора соответственно, мкг·г⁻¹; N_p – площадь пика полного поглощения (ППП), имп.; t_c – время экспозиции, с; S – поправка, учитывающая насыщение за время облучения, отн. ед.; D – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время «охлаждения» t_{cool} , отн. ед.; C – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время измерения, отн. ед.; W – масса образца (монитора), г; $k_{0,a}$ – экспериментально определенные константы для элемента-аналита и монитора (для монитора из золота $k_{0m}=1$) [17–19]; $\theta_{0,m}$, $\theta_{0,a}$ – физические константы, определяющие

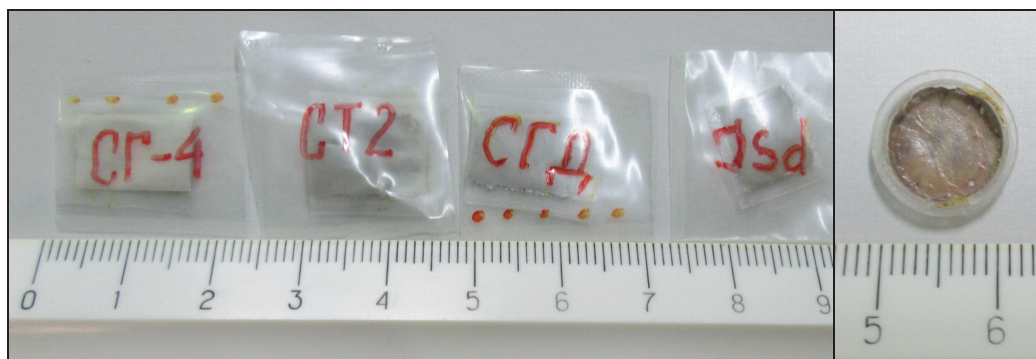


Рис. 1. Стандартные образцы горных пород и золотосодержащий компаратор

Fig. 1. Standard materials of rocks and gold-bearing comparator

отношение сечений для эпитепловых и тепловых нейтронов для монитора и аналита соответственно [17–19]; f – отношение потоков тепловых и эпитепловых нейтронов в местах облучения, отн. ед. (для ИВГ.1М $f=40$); ε_m , ε_a – эффективность регистрации гамма-квантов радиоактивных изотопов монитора и элемента-аналита, отн. ед.

Следующим этапом анализа был расчет погрешности результатов определения концентрации элементов-аналитов. При этом решались следующие задачи:

- анализ и оценка погрешностей исходных величин, входящих в расчетные соотношения;
- оценка точности результата анализа с помощью Z-критерия.

Расчет относительной погрешности определения концентрации элемента-аналита в образце (δC_a) проводился в соответствии с [20–22]. Основные принципы методики расчета погрешности, приведенной в [20]:

- 1) полная погрешность результата измерений определяется как сумма случайной и систематической погрешностей, приведенных к одинаковой доверительной вероятности $p=0,68$;
- 2) закон распределения составляющих случайной погрешности результата – нормальный;
- 3) закон распределения составляющих систематической погрешности – равномерный.

Полная погрешность результата рассчитывалась исходя из погрешности сомножителей правой части уравнения (1):

$$\delta C = \sqrt{\sum_l S_l^2} + 1,1 \sqrt{\sum_m \theta_m^2}, \quad (2)$$

где l , m – количество слагаемых; S_l – случайная относительная погрешность сомножителя; θ_m – систематическая погрешность (максимальная граница).

Абсолютная погрешность определения концентрации элемента-аналита в образце ΔC_a рассчитывалась по формуле

$$\Delta C_a = \delta C \cdot C_a / 100, \quad (3)$$

где δ – относительная погрешность определения концентрации элемента-аналита.

Точность результата анализа, проведенного методом инструментального нейтронно-активационного анализа, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [23], может быть оценена путем сравнения результата количественного анализа СО с аттестованными значениями, приведенными в сертификатах. Оценка точности анализа выражается в виде Z-критерия, который представляет собой разность полученного результата и аттестованного значения с учетом неопределенности полученного результата и абсолютной погрешности аттестованного значения, приведенного в сертификате. Z-критерий рассчитывается в соответствии с выражением

$$Z_i = \frac{C_i - C_{ref,i}}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_{ref,i}^2}}, \quad (4)$$

где C_i , σ_i – полученные расчетные значения концентрации и их погрешности; $C_{ref,i}$, $\sigma_{ref,i}$ – сертифицированные значения концентрации элементов и их погрешности соответственно.

В случае если $Z < 2$, результат анализа считается приемлемым. Если $2 < Z < 3$, то результат анализа можно рассматривать как «ориентировочный», и если $Z > 3$, то результат считается неприемлемым [23].

Результаты количественного анализа методом К0-ИНАА приведены в таблице.

Таблица. Результаты расчета концентрации элементов-аналитов ($\text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}$) и Z-критерия

Table. Results of calculation of concentration of element-analyses ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) and Z-criterion

Элемент Element	Catt	ΔCatt	Cexp	ΔCexp	Cexp/Catt	Z
Время выдержки образцов – 1 сут. Cooling time of samples is 1 day						
Ga	26	4	24,9	6,5	0,96	0,14
K ⁺	4,27	0,06	4,15	0,31	0,97	0,38
Na ⁺	3,06	0,1	3,04	0,16	0,99	0,11
Время выдержки образцов – от 5 до 10 сут. Cooling time of samples is from 5 to 10 days						
As	6,6	2,3	6	0,94	0,91	0,24
Au ⁺⁺	HA	–	<ПО	–	–	HO
Ba	123	16	106	19	0,86	0,68
Br	HA	–	<ПО	–	–	HO
Ca ⁺	0,315	0,14	<ПО	–	–	HO
Ho	2,6	0,5	2,92	0,6	1,12	0,41
La	91	7	91,5	5	1,01	0,06
Lu	1,3	0,3	2,54	0,16	1,95	3,65
Nd	84	14	91,5	8,9	1,09	0,45
Rb	194	8	177	15	0,91	1,00
Sm	19	3	18,8	1	0,99	0,06
U	6,8	0,9	6,24	0,5	0,92	0,54
W	3	0,5	<ПО	–	–	HO
Yb	7,4	1,4	8,6	0,46	1,16	0,81
Время выдержки образцов – до 30 сут. Cooling time of samples is to 30 days						
Eu	0,64	0,06	0,639	0,06	1,00	0,01
Ce	177	27	221	11	1,25	1,51
Co	0,9	0,2	0,83	0,12	0,92	0,30
Cr	29,4	3,4	35	2,2	1,19	1,38
Cs	6,7	0,7	6,8	0,46	1,01	0,12
Fe ⁺	2,14	0,02	2,29	0,13	1,07	1,14
Hf	18	2	17	0,93	0,94	0,45
Sb	0,6	0,4	0,48	0,12	0,80	0,29
Sc	1,9	0,4	1,78	0,1	0,94	0,29
Se	HA	–	<ПО	–	–	HO
Sr	34	7	<ПО	–	–	HO
Ta	1,7	0,3	1,58	0,14	0,93	0,36
Tb	2,5	0,3	2,4	0,14	0,96	0,30
Th	20	3	21,9	1,2	1,1	0,59
Zn	145	6	142	9,9	0,98	0,26
Zr	710	50	712	76	1	0,02

*Концентрация в %; <ПО – меньше предела обнаружения; HA – не аттестован; HO – не обнаружен.

*Concentration is in %; <ПО – less than the detection limit; HA – not certified; HO – not found.

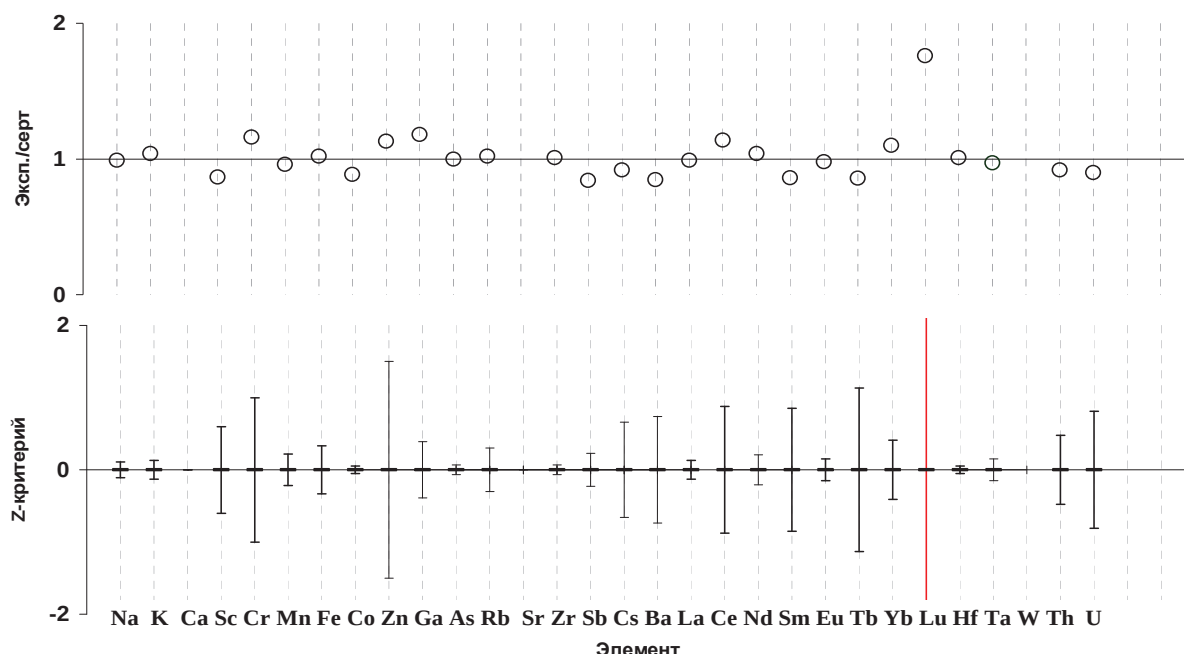


Рис. 2. Результаты расчета отношения $C_{\text{эксп}}/C_{\text{серт}}$ и Z-критерия

Fig. 2. Results of calculation of experimental to certificate concentration ratio and Z-criterion

В качестве иллюстрации ниже в графическом виде приведены результаты расчета Z-критерия и отношение значений концентрации элементов в СО, полученные расчетно-экспериментальным путем, к паспортным значениям.

Заключение

Проведены расчетно-экспериментальные исследования с целью адаптации метода k0-ИНАА для реактора ИВГ.1М. Определены концентрации элементов-аналитов в СО и отношения расчетных и аттестованных значений.

Проведенный анализ показывает, что для таких элементов, как Ca, K, Na, Ho, Eu, Fe, La, Sm, Co, Cs, Hf, Zn и Zr, отличия экспериментально полученных значений концентрации элементов от аттестованных, составляют в среднем не более 5 %. Для таких элементов, как As, Nd, Rb, U, Th, Cr, Sc, Tb, Yb и Sb, значения концентраций отлича-

ются на 10–15 %, а для Ga, Ba, Ce и Se соответствующие отличия составляют от 20 до 35 %.

Точность определения концентрации элементов в СО была оценена с помощью Z-критерия. Кроме лютеция, для всех определенных элементов-аналитов значение Z-критерия находится в пределах от 0 до 2. Таким образом, результаты элементного анализа, полученные методом k0-ИНАА, показали хорошее согласие между расчетными и аттестованными значениями концентрации элементов-аналитов. Полученные удовлетворительные результаты элементного анализа СО методом k0-ИНАА позволяют утверждать об адаптации метода на реакторе ИВГ.1М.

В дальнейшем на реакторе ИВГ.1М предполагается проведение исследований по определению содержания примесей в конструкционных материалах ядерной техники, таких как графит, бериллий, цирконий, с использованием метода k0-ИНАА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фронтасьева М.В. Нейтронный активационный анализ в науках о жизни: обзор // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42. – № 2. – Р. 636–716.
2. De Corte F. The standardization of standardless NAA. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2001. – V. 248. – № 1. – Р. 13–20.
3. Instrumental neutron activation analyses of uranium and thorium in samples from tin mining and processing sites / F.S. Olise, O.F. Oladejo, S.M. Almeida, O.K. Owoade, H.B. Olaniyia, M.C. Freitas // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 142. – Р. 36–42.
4. Experimental k0 and k0-fission factors for the determination of the n (235U)/n (238U) enrichment levels and correction for 235U

- fission interferences in samples containing uranium / F. Arbocco, P. Vermaercke, K. Smits, L. Sneyers, K. Strijckmans // J Radioanal Nucl Chem. – 2014. – V. 302. – Р. 721–735.
5. Yavar A., Sarmani S.B., Khoo K.S. The Better Efficiency Calibration for HPGe Detector by Comparing the Single Point Gamma Sources and Multi-nuclides Gamma Source for k0-NAA Method // Journal of Applied Physics. – 2014. – V. 6 (3). – Р. 54–56.
6. Adazabra A.N., Ntifofo A., Bamford S.A. Analysis of essential elements in Pito – a cereal food drink and its brands by the single-comparator method of neutron activation analysis // Food Science & Nutrition. – May 2014. – V. 2. – Iss. 3. – Р. 230–235.
7. Hamidatou L., Slamene H., Mohamed Lahcen Si. Major, minor and trace elements in four kinds of cement powder using INAA

- and k0-standardization methods // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2014, May. – V. 304 (2). – P. 717–725.
8. Егоров Ю.А. Экспериментальные исследования полей нейтронов и гамма-излучений. – М.: Атомиздат, 1974. – 392 с.
 9. Методики радиационных исследований на стенде: сб. методик / под ред. У.Я. Маргулиса [и др.]; разработ.: В.Н. Грознов, Л.Л. Нефёдов, В.Т. Хрущ [и др.]. – М.: Институт биофизики Минздрава СССР, 1985. – 196 с.
 10. Mustra C.O., Freitas M.C., Almeida S.M. Neutron flux and associated k0 parameters in the RPI after the last configuration change // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2003. – V. 257. – № 3. – P. 539–543.
 11. Ho Manh Dung, Fumio Sasajima. Determination of k_0 and f for k0-NAA in irradiation sites with high thermalized neutrons // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2003. – V. 257. – № 3. – P. 509–512.
 12. Стандартный образец горной породы «Трапп». Паспорт. ГСО 8671–2005. Иркутск, 2012 г.
 13. Стандартный образец горной породы «Габбро эссекситовое». Паспорт. ГСО 8670–2005. Иркутск, 2012 г.
 14. Стандартный образец горной породы «Субщелочной гранит (СГ-4)». Паспорт. ГСО 10135–2012. Иркутск, 2012 г.
 15. GSJ Geochemical Reference samples DataBase. URL: <https://gbank.gsj.jp/geostandards/igneous.html> (дата обращения: 03.12.2015).
 16. Simonits A., De Corte F., Hoste J. Single-comparator methods in reactor neutron activation analysis // J. Radioanal. Chem. – 1975. – V. 24. – P. 31–46.
 17. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n, γ) reactor neutron activation analysis // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 1984. – V. 82/2. – P. 385–452.
 18. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n, γ) reactor neutron activation analysis // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 1989. – V. 133. – P. 3–41.
 19. Menno Blaauw. The k0-Consistent IRI Gamma-ray Catalogue for INAA. – Delft: Interfaculty Reactor Institute, 1996. – 142 p.
 20. Внутрореакторная дозиметрия: практическое руководство / Б.А. Брисман, В.В. Генералов, Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин. – М.: Энергоиздат, 1985. – 200 с.
 21. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках / под ред. Р.Д. Васильева // Материалы I Всесоюзной школы. Т. 2. – М.: ЦНИИАТОМ-ИНФОРМ, 1976. – 176 с.
 22. Тустановский В.Т. Оценка точности и чувствительности активационного анализа. – М.: Атомиздат, 1976. – 192 с.
 23. Quality aspects of research reactor operations for instrumental neutron activation analysis / Ed. by E.H.K. Akaho, P. Bode, Dodd Bdu, J.F. Bruyn, B. Saichi, M.K. Shaat // IAEA-TECDOC-1218. – Vienna, 2001. – P. 60.

Поступила 03.02.2016 г.

Информация об авторах

Алейников Ю.В., начальник лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

Попов Ю.А., заместитель начальника лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

Медетбеков Б.С., инженер 2-й категории лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

Кожыханов С.Б., младший научный сотрудник лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

UDC 621.039.51

ADAPTATION OF k₀-INAA METHOD TO IVG.1M REACTOR

Yuriy V. Aleynikov¹,
aleynikov@nnc.kz

Yuriy A. Popov¹,
Popov@nnc.kz

Berik S. Medetbekov¹,
medetbekov@nnc.kz

Symbat B. Kozhakhonov¹,
kozkhonov@nnc.kz

¹ National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan,
10, Krasnoarmeiskaya street, Kurchatov, 711100, Republic of Kazakhstan.

Relevance of the research consists in implementation of comparator method k₀-standardization of instrumental neutron activation analysis (k₀-INAA) when studying at the reactor IVG.1M that will expand the scope of its application. The k₀-INAA method is characterized by durability and technological effectiveness at all stages of analysis. When carrying out the investigations the unique experience to adapt the application techniques will be acquired.

The main aim of the study is to adapt the k₀-INAA to elemental analysis of various materials based on the IVG.1M reactor taking into account the conditions of exposure, physical and technical features of the reactor.

The methods used in the study: comparator method of k₀-INAA; characterization of irradiation site in experimental channel of IVG.1M reactor; determination of the parameters α and f ; selection of optimal irradiation regimes of standard rock samples; preparation and irradiation of rock samples in the experimental channel of IVG.1M reactor; processing and analysis of the experimental data.

Scientific novelty. The authors have implemented the comparator method and determined the features of neutron field in the experimental channel of IVG.1M reactor for calculating the concentration of elements by k₀-INAA method.

The results. The authors determined the concentration of analyte-elements in standard rock sample by k₀-INAA method and investigated the fields of thermal and resonance neutrons in IVG.1M reactor. The values of α and f parameters were determined for calculation of concentration by k₀-INAA method. The authors defined the content of analyte-elements standard rock samples. The paper introduces the ratios between the calculated and the certified values of element concentrations. The accuracy of analysis is expressed as Z-criterion and evaluated for analyte-elements. For the majority of analytical results Z-criterion values range from 0 to 2. Thus, the results of elemental analysis showed good agreement between the analytical and the certified values of concentration of analyte-elements.

Key words:

IVG.1M reactor, k₀-INAA, characterization of irradiation site, standard rock samples, concentration of analyte element, calculation of uncertainties, Z-criterion.

REFERENCES

1. Frontasyeva M.V. Neutron activation analysis in the life sciences: a review. *Physics of elementary particles and atom nucleus*, 2011, vol. 42, no. 2, p. 636–716.
2. De Corte F. The standardization of standardless NAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2001, vol. 248, no. 1, pp. 13–20.
3. Olise F.S., Oladejo O.F., Almeida S.M., Owoade O.K., Olaniyia H.B., Freitas M.C. Instrumental neutron activation analyses of uranium and thorium in samples from tin mining and processing sites. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 142, pp. 36–42.
4. Arbocco F.F., Vermaercke P., Smits K., Sneyers L., Strijckmans K. Experimental k₀ and k₀-fission factors for the determination of the n (235U)/n (238U) enrichment levels and correction for 235U fission interferences in samples containing uranium. *J Radioanal Nucl Chem.*, 2014, vol. 302, pp. 721–735.
5. Yavar A., Sarmani S. B., Khoo K.S. The Better Efficiency Calibration for HPGe Detector by Comparing the Single Point Gamma Sources and Multi-nuclides Gamma Source for k₀-NAA Method. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 6 (3), pp 54–56.
6. Adazabra A.N., Ntifofo A., Bamford S.A. Analysis of essential elements in Pito – a cereal food drink and its brands by the single-comparator method of neutron activation analysis. *Food Science & Nutrition*, 2014, May, vol. 2, Iss. 3, pp. 230–235.
7. Hamidatou L., Slamene H., Mohamed Lahcen Si. Major, minor and trace elements in four kinds of cement powder using INAA and k₀-standardization methods. *J Radioanal Nucl Chem.*, 2014, May, vol. 304 (2), pp. 717–725.
8. Egorov Yu.A. *Eksperimentalnye issledovaniya poley neytronov i gamma-izlucheniya* [Experimental studies of neutron fields and gamma radiations]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 392 p.
9. Metodiki radiatsionnykh issledovaniy na stende [Methods of radiation research at the stand]. Eds. U.Ya. Margulis. Moscow, Institut Biofiziki Minzdrav SSSR Publ., 1985. 196 p.
10. Mustra C.O., Freitas M.C., Almeida S.M. Neutron flux and associated k₀ parameters in the RPI after the last configuration change. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2003, vol. 257, no. 3, pp. 539–543.
11. Ho Manh Dung, Pham Duy Hien. The application and development of k₀-standardization method of neutron activation analysis at Dalat research reactor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2010, vol. 622, pp. 381–384.
12. Standartny obrazets gornoy porody «Trapp» [Standard rock sample «Trapp»]. Passport. GSO 8671–2005. Irkutsk, 2012.
13. Standartny obrazets gornoy porody «Gabbro esseksitovoe» [Standard rock sample «gabbro esseksite»]. Passport. GSO 8670–2005. Irkutsk, 2012.

14. Standartny obrazets gornoy porody «Subshchelochnoy granit» [Standard rock sample «subalkaline granite»]. Passport. GSO 10135–2012. Irkutsk, 2012.
15. GSJ Geochemical Reference samples DataBase. Available at: <https://gbank.gsj.jp/geostandards/igneous.html> (accessed 03 December 2015).
16. Simonits A., De Corte F., Hoste J. Single-comparator methods in reactor neutron activation analysis. *J. Radioanal. Chem.*, 1975, vol. 24, pp. 31–46.
17. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n,γ) reactor neutron activation analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1984, vol. 82/2, pp. 385–452.
18. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n,γ) reactor neutron activation analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1989, vol. 133, pp. 3–41.
19. Menno Blaauw. The k0-Consistent IRI Gamma-ray Catalogue for INAA. Delft, Interfaculty Reactor Institute, 1996. 142 p.
20. Briskman B.A., Generalov V.V., Kramer-Ageev E.A., Troshin V.S. Vnutrireaktornaya dozimetriya: prakticheskoe rukovodstvo [Core dosimetry: a Practical Guide]. Moscow, Energoizdat Publ., 1985. 200 p.
21. Vasilev R.D. Metrologiya neytronnykh izmereniy na yadernofizicheskikh ustanovkakh [Methodology of neutron measurements on nuclear and physical facilities]. *Materialy I Vsesoyuznoy shkoly* [Materials of the I All-Union school]. Moscow, TSNIIA-TOMM-INFORM Publ., 1976. Vol. 2, p. 176.
22. Tustanovsky V.T. *Otsenka tochnosti i chustvitelnosti aktivatsionnogo analiza* [Assessment of accuracy and sensitivity of activation analysis]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 192 p.
23. Quality aspects of research reactor operations for instrumental neutron activation analysis. Ed. E.H.K. Akaho, P. Bode, Dodd Bdu, J.F. Bruyn, B. Saichi, M.K. Shaat. *IAEA-TECDOC-1218*. Vienna, 2001. p. 60.

Received: 3 February 2016.

Information about the authors

Yuriy V. Aleynikov, Head of the Laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Yuriy A. Popov, Deputy Head of the Laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Berik S. Medetbekov, Engineer, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Symbat B. Kozhakhhanov, Junior scientist, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.