

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА, ТОРИЯ, СКАНДИЯ И НЕКОТОРЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДВАДЦАТИ ЧЕТЫРЕХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ СРАВНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.Ф. Судыко

Томский политехнический университет, Томск, Россия, sudykoAF@yandex.ru

DETERMINATION OF URANIUM, THORIUM, SCANDIUM AND SOME RARE EARTH ELEMENTS IN TWENTY FOUR STANDARDS REFERENCE MATERIALS BY INSTRUMENTAL NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

A.F. Sudyko

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

An instrumental neutron activation analysis technique has been developed for simultaneous determination of uranium, thorium, scandium and 8 rare earth elements in 23 geological, vegetation and other materials. The samples were irradiated with reactor neutrons for 3 to 18 hours followed by cooling 7 day to 3 weeks. The gamma-ray activate was measured with Ge-detector. The technique is relatively simple and adaptable on the routine basis.

Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) был применен для анализа группы редкоземельных элементов, урана, тория и скандия. Благодаря своим уникальным химическим свойствам эти элементы могут использоваться в поисковой геохимии и геохимических исследованиях, при изучении живого вещества, геоэкологии, других научных направлениях.

Такие изучения требуют простого и точного аналитического метода для одновременного определения обозначенных элементов в большом числе образцов.

В настоящее время для анализа различных природных объектов наряду с классическими методами аналитической химии используются такие ядерно-физические методы как атомно-абсорбционная спектрометрия, рентгено-флуоресцентный анализ, атомная эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, синхротронное излучение, нейтронно-активационный анализ и другие. Сравнительный анализ показывает, что радиофизические методы признаны наиболее чувствительными [8, 10].

Нейтронно-активационный анализ один из предпочтительных методов так как позволяет получать одновременно информацию по большому числу элементов. К тому же редкоземельные элементы, а также уран, торий и скандий обладают высокой активационной способностью, поэтому чувствительность нейтронно-активационного метода определения большинства этих элементов на порядок ниже их кларков в любых горных породах [7].

ИНАА позволяет проводить исследование материала без его разрушения, чем избегается трудоемкое и времязатратное растворение и этапы химического разделения. Помехи от матричных или других элементов могут быть исключены или значительно нивелированы варьированием продолжительностями облучения и охлаждения.

Настоящая методика ИНАА на примере изучения двадцати четырех стандартных образцов, представляющих магматические, метаморфические, современные горные породы, техногенные объекты и растительные

материалы (табл. 1) на La, Ce, Nd, Eu, Sm, Tb, Yb, Lu, Sc, U и Th предназначена для массовых анализов большого количества проб.

Количественная привязка для определения указанных элементов осуществлялась по наиболее полно и качественно аттестованным стандартным образцам AGV-1 (андезит, США) и IAEA SD-M-2/ТМ (морские отложения, МАГАТЭ, Австрия) (“опорные стандарты”) [11, 12].

Исследуемые стандартные материалы в зависимости от их активируемости и истертости, в соответствии с паспортными рекомендациями, гарантирующими однородность состава, взвешивались по 100–300 мг. Приготавливались по шесть параллельных навесок для каждого образца, из растительных материалов изготавливались таблетки.

Образцы заворачивались в подготовленную алюминиевую фольгу. В контейнер для облучения помещалось двадцать образцов и эталоны. Облучение проводилось на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ФТИ Томского политехнического университета в постоянном вертикальном канале тепловыми нейтронами с интегральной дозой ($2 \cdot 10^{17}$ – $1,5 \cdot 10^{18}$) н/см². Облучением цинка в качестве монитора потока было установлено, что нейтронный поток по высоте наполнения пенала равномерен. Продолжительность выдержки после облучения (“охлаждение”) – 5–8 дней при определении U, La, Sm, Yb, и Lu, и, 17–22 дня – для Ce, Nd, Eu, Tb, Sc и Th.

Регистрация гамма-излучения проводилась на детекторе из сверхчистого германия GX3518, рабочий диаметр 58,5 мм, высота 59 мм (Canberra Inc.), сопряженным с зарядочувствительным предусилителем (модель 2002 CSL) и спектрометрическим усилителем (модель 2022). Источники высокого и низкого напряжения – модель 3106D и модель 1000, соответственно. Многоканальный анализатор амплитуд импульсов в стандарте NIM “Multiport II” при поддержке программного обеспечения Genie-2000, модель S501 v3.1, проводит калибровку спектра по энергии, поиск пиков и расчет их площади, а также величину фона под пиками, ширину пиков и погрешность. Идентификация радионуклидов,

привязка к эталонам, расчет содержаний заданного набора элементов производится по разработанной в лаборатории специальной программы ЛЯГИ 2012 v1,0 LIFE [4].

Используемая измерительная система имела полное энергетическое разрешение 1,8 кэВ по линии 1332,5 кэВ ^{60}Co , отношение пик/фон – 63 при относительной эффективности 35%.

Ступенчатое устройство по смене геометрий дает возможность измерять образцы на различных расстояниях от детектора, что позволяло проводить исследования при близких загрузках. При поддержке загрузки по “мертвому” времени в диапазоне 15–20% погрешность за счет потерь в спектрометрическом тракте менее двух процентов.

Предварительные исследования позволили определить оптимальные времена облучения и охлаждения, исходя из возможностей используемого оборудования определить аналитические гамма-линии изучаемых элементов, когда влияние мешающих фотопиков минимально. В таблице 2 представлены определяемые элементы и используемые для этого радиоизотопы, их основные и дополнительные наиболее интенсивные гамма-линии [1, 2].

Лантан. Для определения лантана использовался свободный от интерференций фотопик ^{140}La 1596,2 кэВ. Определению по энергии 328,3 кэВ может мешать ^{194}Ir с энергией 328,4 кэВ, а по энергии 487,0 кэВ – ^{131}Ba , 486,5 кэВ. Возможная помеха в определении лантана в объектах, содержащих повышенный уран от ^{140}La – продукта деления урана по реакции $^{235}\text{U}(n,f)^{140}\text{Ba}(^{140}\text{La})$, ^{130}Te , ^{132}Xe и др. Вклад этой реакции контролируется облучением чистого урана, измерением интенсивности по линии 1596,2 кэВ и введени-

Таблица 1. Используемые для исследования стандартные образцы [3, 9]

№ п/п	Шифр стандарта образца	Состав	Производитель
1	JR-1	Риолит	Япония,
2	JR-2	Риолит	Геологическая служба
3	JG-2	Гранит	
4	JG-3	Гранодиорит	
5	IAEA-356	Загрязненные морские отложения	Австрия, Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ)
6	SD-M-2/ТМ	Морские отложения	
7	СГД-1А	Габбро-эксекситовое	Россия,
8	ССВ-1	Святоносит	Институт геохимии РАН
9	СГ-4	Субщелочной гранит	(г. Красноярск)
10	ССн-1	Сыннырит	
11	СЛг-1	Черный сланец (Руда сухого лога)	
12	ГБПг-1	Гранат-биотитовый плагиогнейс	
13	БИЛ-1	Байкальский ил	
14	БИЛ-2	Донные отложения о. Байкал	
15	ЗУК-1	Зола угля	
16	ЗУК-2	Зола угля уноса КАТЭКа	
17	КМЦ-1	Концентрат магнитных ценосфер	
18	КМЦ-2	Концентрат магнитных ценосфер	
19	КММ-1	Концентрат магнитных микросфер	
20	ЛБ-1	Лист березы	
21	Тр 1	Травосмесь	
22	ЭК-1	Элодея канадская	
23	ОСВБ-1	Сухой остаток воды озера Байкал	
24	ХСС-1	Хвоя сосны сибирской	

Примечание: стандартные образцы ОСВБ-1 и ХСС-1 находятся в стадии обработки и накопления данных.

Таблица 2. Ядерные данные для редкоземельных элементов, скандия, урана и тория

Стабильный изотоп (природное содерж., %)	Сечение активации, барн	Полученный радиоизотоп (период полураспада)	Используемый фотопик (выход гамма-линии, %)	Дополнительные фотопики (выход гамма-линии, %)
^{139}La (99,8)	12	^{140}La (1,68 сут.)	1596,2(96)	328,7(21); 487,0(48); 815,7 (23)
^{140}Ce (88,5)	0,31	^{141}Ce (32,5 сут.)	145,4 (48)	–
^{146}Nd (17,2)	1,8	^{147}Nd (11,0 сут.)	531,0 (12)	91,1 (28); 319,4 (2)
^{151}Eu (47,8)	7200	^{152}Eu (12,7 лет)	1408,1 (23)	121,8 (28); 344,3 (24); 779,1 (14)
^{152}Sm (26,7)	140	^{153}Sm (1,96 сут.)	103,2 (28)	69,7(5,4)
^{159}Tb (100)	220	^{160}Tb (72,1 сут.)	879,4 (32)	298,6 (26); 962,3 (13); 966,2 (28); 1177,9 (17)
^{174}Yb (31,6)	60	^{175}Yb (4,1 сут.)	396,1 (8,4)	282,6 (5,2)
^{176}Lu (2,59)	4000	^{177}Lu (6,74 сут.)	208,4 (100)	113,0 (51)
^{45}Sc (100)	12	^{46}Sc (83,9 сут.)	889,2 (100)	1120,5 (100)
^{238}U (99,3)	2,74	^{239}Np (2,36 сут.)	228,2 (10,8)	106,1 (22,9); 277,6 (14,2)
^{232}Th (100)	7,33	^{233}Pa (27,0 сут.)	311,9 (38,6)	86,6 (1,86); 300,1 (6,6)

Таблица 3. Результаты определения содержания элементов в стандартных образцах, n=10–4%

	La	Ce	Nd	Eu	Sm	Tb	Yb	Lu	Sc	U	Th
JR-1	19,7±1,7 ⁽¹⁾ 19,8±0,2⁽²⁾	47,2±4,3 50,8±0,7	23,3±2,8 25,6±3,5	0,30±0,09 0,34±0,03	6,03±0,81 5,80±0,08	1,01±0,20 1,07±0,03	4,55±0,46 4,32±0,02	0,71±0,08 0,69±0,02	5,07±0,54 5,40±0,09	8,88±1,32 9,11±0,38	26,7±1,32 27,9±0,38
JR-2	16,3±2,3 14,9±0,4	38,8±5,1 39,8±0,9	20,4±3,4 20,3±2,7	0,14±0,06 0,18±0,02	5,63±0,62 5,35±0,15	1,10±0,19 1,10±0,03	5,33±0,65 4,85±0,06	0,88±0,09 0,80±0,01	5,59±1,22 5,50±0,09	10,9±1,4 10,8±0,5	31,4±5,6 31,9±0,9
JG-2	19,9±2,6 19,6±1,8	48,3±5,3 52,2±5,1	26,4±5,2 26,7±2,9	0,10±0,04 0,12±0,01	7,78±1,10 7,93±0,55	1,62±0,32 1,89±0,07	6,85±2,15 7,33±0,33	1,22±0,14 1,17±0,05	2,42±0,42 2,40±0,04	11,3±1,6 12,0±0,4	31,6±2,7 36,2±1,4
JG-3	20,6±2,2 19,4±1,4	40,3±4,8 41,1±2,2	17,2±1,8 15,3±2,8	0,90±0,08 0,91±0,02	3,39±0,44 3,30±0,08	0,46±0,05 0,44±0,01	1,77±0,35 1,56±0,06	0,26±0,05 0,26±0,01	8,76±0,55 8,70±0,12	2,21±0,41 2,57±0,23	8,28±0,65 7,97±0,36
IAEA-356	19,3(B) ⁽³⁾ 15,9–20,6 ⁽⁴⁾ 19,6±0,9	41,5(B) 38,3–49,8 39,8±1,9	– ⁽⁵⁾ – 19,1±1,9	0,73(C) 0,63–0,86 0,74±0,03	3,5(C) 3,40–3,83 3,33±0,32	– – 0,50±0,02	– – 1,26±0,10	– – 0,19±0,05	6,9(B) 6,75–9,94 7,38±0,16	3,2(B) 2,40–3,50 3,44±0,20	6,64(B) 6,24–6,92 6,48±0,34
SD-M-2/TM	26,2(A) 24,0–28,4 24,9±0,7	54,3(A) 47,2–55,8 52,4±1,4	24,6(B) 18,9–39,4 26,5±4,0	0,85(A) 0,79–1,19 0,96±0,07	4,27(B) 3,28–4,90 5,50±0,15	0,52(B) 0,48–0,58 0,50±0,06	1,62(A) 1,41–1,92 1,75±0,04	0,243(A) 0,186–0,32 0,254±0,01	10,3(A) 9,9–11,4 11,0±0,2	2,49(A) 1,44–3,9 2,69±0,17	8,15(B) 7,20–9,10 8,69±0,30
ССБ-1	108±17 114±4	219±34 233,9±9,1	02±201 117,9±7,1	4,5±8 4,67±0,12	16±3 17,7±0,9	(1,7) ⁽⁶⁾ 1,31±0,07	2,3±0,4 2,1±0,1	0,33±0,06 0,25±0,01	4,0±0,7 3,03±0,09	(2) 2,3±0,2	(12) 9,2±0,3
СД-1А	80±20 78,8±1,1	150±10 159,7±2,5	70±10 73,6±5,5	5±1 4,42±0,06	17±1 16,8±0,5	1,4±0,2 1,4±0,1	2,9±0,5 1,8±0,1	(0,3) 0,24±0,01	27±3 24,0±0,3	2,0±0,5 2,1±0,3	9±1 7,7±0,5
СГ-4	91±7 87,5±2,7	177±27 184,5±5,1	84±14 –⁽⁷⁾	0,64±0,06 0,60±0,04	19±3 18,3±0,5	2,5±0,3 2,42±0,13	7,4±1,4 9,85±0,35	1,3±0,3 1,30±0,01	1,9±0,4 1,69±0,04	6,8±0,9 7,77±0,71	20±3 18,8±0,5
ССН-1	6,8±0,9 6,78±0,16	12,3±1,4 11,4±0,4	4,7±0,7 –	0,22±0,04 0,23±0,02	0,84±0,16 0,98±0,07	0,07±0,01 0,07±0,02	0,08±0,01 0,11±0,01	(0,012) 0,019±0,002	(0,46) 0,48±0,01	(0,07) –	0,31±0,05 0,30±0,03
ГБПг-1	53±8 51,6±1,9	104±11 100,4±3,1	43,8±7,3 41,8±5,3	1,8±0,2 1,9±0,1	6,9±0,7 6,8±0,1	0,6±0,1 0,65±0,02	2,02±0,24 2,4±0,6	0,31±0,05 0,33±0,07	14,3±2,2 14,5±0,2	0,8±0,1 1,12±0,43	11,3±1,5 11,2±0,4
СЛг-1	28±5 28,3±1,3	53±8 55,8±2,5	25±4 22,8±4,3	1,2±0,2 1,51±0,1	5,4±0,8 5,8±0,9	(0,74) 0,86±0,04	2,7±0,4 3,0±0,4	0,40±0,07 0,47±0,05	20±3 21,0±0,5	1,65±0,23 1,69±0,27	7,1±1,5 7,3±0,5
БИЛ-1	45±6 43,2±0,8	80±5 71,1±3,6	39±5 38,4±2,2	1,4±0,2 1,35±0,04	7±1 7,0±0,2	0,9±0,1 0,89±0,06	2,9±0,4 2,68±0,10	0,40±0,05 0,40±0,01	13±2 12,6±0,26	12,0±1,1 11,2±0,7	12,7±1,3 14,9±2,1
БИЛ-2	19±3 18±4	(41) 36±7	(21) 16±9	(1,4) 1,1±0,5	(4,3) 5,0±0,7	– 0,6±0,1	2,7±0,5 3,2±0,8	(0,41) 0,40±0,05	19±3 18±2	(3) 2,5±0,7	(4,8) 5,2±0,6
ЗУК-1	20±3 18,9±0,6	38±5 39,1±1,2	20±3 26,1±4,2	0,9±0,1 0,86±0,06	4,1±0,5 5,3±0,9	0,68±0,12 0,66±0,03	2,6±0,3 2,4±0,1	0,40±0,05 0,31±0,05	11±1 11,1±0,3	3,3±0,4 3,46±0,3	5,8±1,0 5,58±0,23
ЗУК-2	20±2 20,8±0,6	37±5 39,5±1,9	17±1 19,7±0,8	(0,8±0,2) 0,69±0,02	3,2±0,2 3,28±0,11	0,45±0,06 0,46±0,04	1,5±0,2 1,64±0,09	0,26±0,02 0,26±0,01	8,6±0,9 8,94±0,22	3,1±0,4 2,86±0,2	7,0±0,9 6,96±0,54

КМЦ-1	60±6	115±10	48±3	1,5±0,2	8,4±0,9	(1,1±0,3)	3,5±0,4	0,56±0,07	13±2	4,3±0,6	19±2
	70,4±1,2	123,0±1,3	-	1,53±0,05	9,4±0,5	1,04±0,05	3,43±0,19	0,59±0,03	13,7±0,84	4,35±0,37	19,0±0,2
КМЦ-2	46±4	89±6	39±2	1,4±0,2	7,2±0,6	0,92±0,18	3,3±0,4	0,53±0,07	15±2	4,6±0,4	14±2
	45,8±0,7	88,7±1,2	-	1,43±0,05	8,04±0,21	0,89±0,05	3,08±0,13	0,46±0,03	14,7±0,1	4,38±0,31	14,1±0,2
КММ-1	5,7±0,8	11±1	(5,3)	(0,5)	1,0±0,2	(0,16)	0,50±0,08	0,10±0,01	2,5±0,5	(1,0)	1,4±0,3
	6,4±0,3	9±3	-	0,46±0,18	1,48±0,06	-	0,56±0,09	0,09±0,03	3,28±0,06	1,2±0,4	1,63±0,12
ЛБ-1	0,82±0,09	1,5±0,12	0,69±0,06	0,026±0,005	0,132±0,015	0,022±0,003	0,074±0,007	0,011±0,001	0,3±0,04	0,082±0,012	0,22±0,03
	0,68±0,08	1,49±0,05	1,67±0,03	0,023±0,004	0,139±0,019	0,020±0,004	0,074±0,004	0,010±0,001	0,24±0,02	0,080±0,026	0,19±0,02
Тр-1	0,26±0,09	0,50±0,05	0,22±0,02	0,0095±0,001	0,041±0,003	(0,01)	0,018±0,002	(0,0029)	0,082±0,008	(0,017)	0,055±0,005
	0,30±0,06	0,60±0,09	-	0,007±0,002	0,060±0,011	-	0,025±0,005	-	0,096±0,005	0,010±0,005	0,053±0,004
Эк-1	2,05±0,14	3,40±0,30	1,59±0,17	0,047±0,008	0,31±0,03	0,041±0,005	0,074±0,006	0,019±0,003	0,38±0,02	1,4±0,1	0,40±0,03
	2,03±0,16	3,69±0,21	1,2±0,3	0,049±0,005	0,33±0,03	0,050±0,007	0,071±0,030	0,015±0,004	0,41±0,02	1,30±0,09	0,40±0,01
ОСББ-1 ⁽⁸⁾	0,42±0,05	0,93±0,10	-	-	0,27±0,07	-	-	-	0,093±0,010	5,12±0,30	0,094±0,005
ХСС-1	0,085±0,003	0,169±0,004	-	0,0028±0,0002	0,0134±0,0009	-	0,0060±0,0012	0,0010±0,0001	0,0308±0,0008	-	0,0205±0,0014

Примечание: ⁽¹⁾ – паспортные данные; ⁽²⁾ – результаты ИНАА; ⁽³⁾ – паспортные данные с указанием категории точности; ⁽⁴⁾ – смешанный доверительный интервал; ⁽⁵⁾ – нет данных; ⁽⁶⁾ – предварительные данные; ⁽⁷⁾ – определения не проводились; ⁽⁸⁾ – стандартный образец находится в стадии разработки и накопления данных.

ем поправки. Значимость поправки зависит от продолжительности охлаждения. Предел определения, вычисленный по критерию 3(B)S, (где B – количество зарегистрированных импульсов под аналитическим пиком) для различных типов исследуемых объектов составляет 0,05–0,09, а для растительных материалов (PM) – 0,005 г/т.

Церий. Анализ проводился по фотопику ¹⁴¹Ce 145,4 кэВ. Единственная помеха – уран. Вычисленный вклад осколочного церия-141 составляет 0,32 г/т Ce на 1 г/т U в анализируемой пробе. Предел определения 0,5–0,9 г/т, для PM – 0,06 г/т.

Неодим. Определение неодима проводилось по линии от ¹⁴⁷Nd с энергией 531,0 кэВ. Интенсивный пик с энергией 91,1 кэВ не используется, так как он не разрешается от пиков ¹³¹Ba (92,3 кэВ), ¹⁷⁵Hf (89,4 кэВ) и осколочного ¹⁴⁷Nd (91,1 кэВ). Основная помеха при определении по линии 319,4 кэВ – это хром (⁵¹Cr, энергия 320,1 кэВ).

Повышенное содержание урана может исказить результаты в определении неодима. Вклад помехи составляет 0,21 г/т неодима на 1 г/т урана в пробе. Предел определения 4–7, для PM – 0,2 г/т.

Европий. Радиоизотоп ¹⁵²Eu имеет большое число фотопиков. Для определения европия могут использоваться свободные от помех гамма-линии 121,8; 779,1 В и 1408,1 кэВ. Определению по линии 344,3 кэВ может мешать радиоизотоп ¹⁷⁵Hf с энергией 343,4 кэВ в случае его повышенного содержания. Предел определения 0,10–0,15 г/т, для растительных материалов предел определения – 0,005 г/т.

Самарий. Использовался аналитический изотоп ¹⁵³Sm с энергией 103,2 кэВ. Определению может мешать присутствие в пробе урана. Продукт его активации ²³⁹Np дает неразрешаемую линию 103,7 кэВ. Поправка на вклад производилась облучением чистого элемента урана и учетом отношений интенсивностей пиков радиоизотопа ²³⁹Np 106,1/103,7; 228,2/103,7; 277,6/103,7. Предел определения в заданных условиях по различным объектам 0,01–0,05 г/т, для PM – 0,001 г/т.

Тербий. Тербий имеет достаточное количество аналитических линий. Наиболее подходящие для определения являются 298,6; 879,3 и 1177,9 кэВ. Из них чаще всего при исследованиях нами использовалась наиболее интенсивная аналитическая линия 879,3 кэВ. Линия 298,6 кэВ используется редко, в случаях высокого содержания скандия, либо железа и кобальта, когда под пиком 879,3 кэВ высокий комптоновский фон. Предел определения составляет 0,1–0,2 г/т, 0,01 г/т для PM.

Иттербий. Определение проводилось по изотопу ¹⁷⁵Yb. По своим ядерно-физическим характеристикам он предпочтителен другому радиоизотопу ¹⁶⁹Yb. В качестве аналитической использовалась гамма-линия 396,1 кэВ. Предел определения 0,07–0,09, для исследованных растительных материалов – 0,008 г/т.

Лютеций. Высокоинтенсивный пик 208,4 кэВ от ¹⁷⁷Lu использовался для определения лютеция. В образцах с низким содержанием урана этот пик при помощи программы обработки пиков разрешается от пика 209,8 кэВ от ²³⁹Np. В случаях высокого содержания урана (особен-

но, когда интенсивность пика от нептуния-239 на порядок превышает интенсивность пика лютеция-1770 происходит полное наложение пиков друг на друга. В этом случае вклад ^{239}Np определяется с использованием энергии 228,2 кэВ и вычислением его из комбинированного пика. Предел определения составил 0,01–0,02 г/т. Предел определения для РМ – 0,001 г/т.

Скандий. Определение проводилось по изотопу ^{46}Sc , линия 889,2 кэВ. Хотя она и находится на склоне комптоновского фона, она наиболее благоприятна для определения скандия, так как на второй интенсивный пик 1120,5 кэВ оказывает влияние трудноразрешимый пик от ^{182}Ta , $E=1124,3$ кэВ. Предел определения для рассматриваемых объектов 0,01–0,03, для РМ – 0,001 г/т.

Уран. Определение этого элемента в объектах различного состава подробно описывалось ранее [5, 6]. Как и прежде исследования проводились по линии ^{239}Np 228,2 кэВ. Однако здесь необходимо учитывать влияние тантала-182. Его линия с энергией 229,3 кэВ не разрешается с линией определения урана. Облучение чистого элемента тантала, и зная соотношение различных фотопиков ^{182}Ta , позволило вводить эффективную поправку. Предел определения 0,1–0,3 г/т, для РМ – 0,02 г/т.

Торий. Определение проводилось по линии 311,9 кэВ от продукта активации тория ^{233}Pa . Помехи от мешающих радионуклидов незначительны. Предел определения 0,09–0,10 г/т и 0,01 г/т для РМ.

Результаты исследования стандартных образцов (табл. 1) представлены в таблице 3.

Сравнение данных инструментального нейтронно-активационного анализа с аттестованными содержаниями элементов в стандартных образцах показывает их совпадение в пределах стандартного отклонения практически для всех определяемых элементов. Это подтверждает высокую точность полученных результатов и правильность методики ИНАА.

Таким образом, метод ИНАА, разработанный для одновременного определения восьми редкоземельных элементов, скандия, урана и тория относительно прост и точен при минимальных трудозатратах. Методика может быть эффективно использована для массового анализа большого числа образцов, встречающихся в разведке руд, геохимических исследованиях, геоэкологии и других областях деятельности человека.

Литература

1. Меднис И.В. Справочные таблицы для нейтронно-активационного анализа. – Рига : Зинатне, 1974. – 412 с.
2. Меднис И.В. Гамма-излучение радионуклидов, применяемых в нейтронно-активационном анализе : справочник. – Рига : Зинатне, 1987. – 212 с.
3. Каталог стандартных образцов состава природных и техногенных сред [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.igc.irk.ru/images/Innovation/Standards...Catalog> (дата обращения: 18.02.16).
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661108. Лаборатория Ядерно-Геохимических Исследований 2012 v1,0 LITE/ В.В. Жуков, А.Ф. Судыко – Заявка № 2012618936; зарегистрировано 6.12.2012.
5. Судыко А.Ф. Определение урана и тория в природных объектах нейтронно-активационным методом // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы II Международной конференции. – Томск : Тандем-Арт, 2004. – С. 587–592.
6. Судыко А.Ф. Определение элементного состава углей и зол углей нейтронно-активационным методом // Проблемы и перспективы развития материально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири : матер. Межрегиональной научно-практической конференции. – Томск : Из-во ТПУ, 2007. – С. 293–297.
7. Таблица определения химических элементов методом нейтронно-активационного анализа // Изв. АН Каз.ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1980. – № 6. – С. 3–7.
8. Фронтасьева М.В. Нейтронно-активационный анализ в науках о жизни // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42. – С. 636–701.
9. 1994 recommended of preferable (with asterisks) values for major, minor and trace elements in five reference samples (in % from SiO_2 to $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$ and mg/g^1 from Ag to Zr, unless otherwise noted) / N. Imai et al. // Geostandards Newsletter. – 1995. – № 19. – P. 135–213.
10. Kaytipuly C.J., Westland A.D. Review of methods for the determination of lanthanides in geological samples // Talanta. – 1988. – Т. 35, № 1. – P. 1–13.
11. Mee L.D., Oregioni B. World-wide intercomparison of trace element measurements in marine sediments SD-M-2/TM. Report №49 // International Atomic Energy Agency (IAEA). – Vienna, 1991.
12. USGS[2010]. USGS Certificate of analysis andesite, AGV-1 (Geochemical Reference Standards) [Электронный ресурс]. – URL: <http://minerals.cr.usgs.gov/geo>.