Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 2, 1969 г.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОКНА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

Г. Ф. Новиков, А. Я. Синицын, Ю. О. Козында

Гамма-спектрометрия все шире применяется при опробовании урано-ториевых руд. В ее основу положены измерения скорости счета импульсов в оптимальных для урана и тория участках спектра гамма-излучения. Одним из основных условий, обеспечивающих высокую точность опробования, является правильный выбор энергетических окон гамма-спектрометра. Этот вопрос наиболее остро возникает при создании спектрометрической аппаратуры с малым размером сцинтилляторов в связи с низкой скоростью счета импульсов в узких энергетических окнах, рекомендуемых обычно в литературе [Хитев, Федоров, 1966].

В настоящей статье на основе анализа дифференциальных аппаратурных спектров гамма-излучения урановых и ториевых руд с кристаллами NaJ(Tl) размером 40×50, 30×25 и 18×30 *мм* при ширине энергетических окон от 20 до 700 *кэв* указано оптимальное положение окон гамма-спектрометра, их ширина и для этих условий — размер погрешностей определения содержания урана и тория.

Аппаратурные спектры излучения урана и тория при разной ширине окна. Спектры излучения исследованы в насыщенных по гамма-лучам моделях, в 4π-геометрии анализатором импульсов АИ-100-1 при ширине канала 30 *кэв*. Содержания урана, равновесного с радием, и тория в моделях соответственно равны 0,100 и 0,075%. Амплитудное разрешение сцинтилляционного счетчика 10—12% по фотопику Cs-137. Продолжительность измерения излучения урановой модели 5—10 *мин*, ториевой 10—12 *мин*. При этом число импульсов в каналах спектрометра, соответствующих фотопику 1,76 *Мэв* для урана и 2,62 *Мэв* для тория, в среднем 2500. С малыми кристаллами спектры снимались 3—5 раз, с большим 2—3 раза. Просчеты импульсов определены с помощью пересчетного устройства ПС-10000 с разрешающим временем 1 *мксек*.

Полученные осредненные аппаратурные спектры гамма-излучения урана и тория при нижнем пороге 900 *кэв* и ширине окна 30 *кэв* (высокий порог связан с большим градиентом скорости счета в спектрах излучения урана и тория при $E_\gamma < 900$ *кэв*), приведенные на рис. 1, послужили основой для составления спектров излучения при ширине

энергетических окон 20, 200, 300, 400, 500, 600, 700 *кэв*. Скорость счета в окне шириной ΔE *кэв*

$$N = \frac{S\,m\,n}{l}\ имп/мин, \qquad (1)$$

где S — площадь, ограниченная спектральной кривой и вертикальными прямыми, проведенными из концов отрезка ΔE на оси E, соответствующего ширине окна, $см^2$; m — масштаб по вертикальной оси, $имп/(мин \cdot см)$; n — масштаб по горизонтальной оси, *кэв/см*; l — ширина окна спектрометра, при которой сняты спектры излучения, *кэв*.

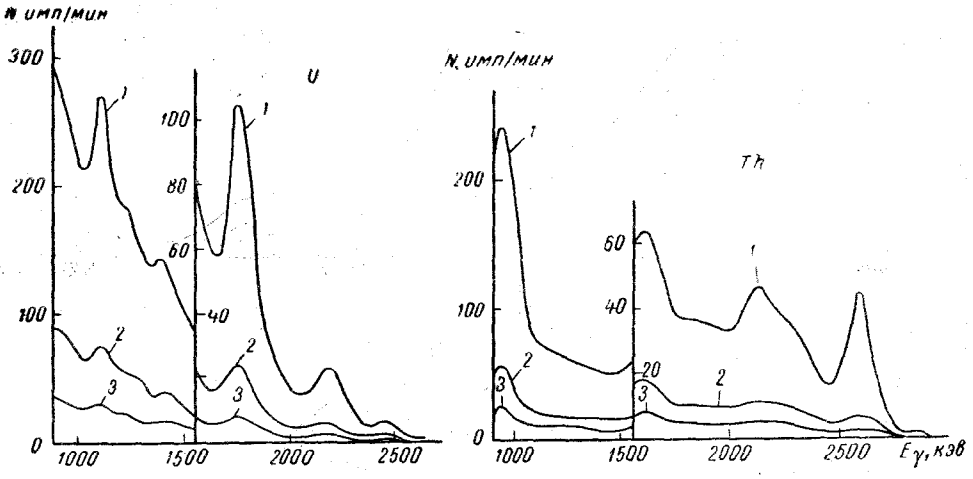


Рис. 1. Аппаратурные спектры гамма-излучения урана и тория при ширине энергетического окна 30 *кэв*

Кристаллы NaJ (Tl), *мм*: *1*—40×50, *2*—30×25, *3*—18×30

Кроме того, спектры с шириной окна, кратной 100 *кэв*, рассчитывали методом скользящего среднего на основе спектров, построенных при ширине окна 20 *кэв*. Во всех случаях шаг построения новых спектров был 20 *кэв*. Полученные скорости счета отнесены к нижнему уровню окон ΔEi.

Аппаратурным спектрам излучения урана и тория, приведенным на рис. 2 для кристалла 30×25 *мм*, аналогичны спектры других кристаллов. В дальнейшем обсуждении они использованы наравне с первыми. Различия в спектрах наблюдаются лишь в области крайних фотопиков, где проявляется снижение фотоэффективности с уменьшением размера кристалла. Для удобства изображения все спектры нормированы на скорости счета в окне соответствующей ширины с порогом 900 *кэв*. Значения скоростей счета при этом пороге для всех кристаллов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость счета на 0,01% U и Th при нижнем пороге 900 *кэв* для кристаллов NaJ(Tl), *имп/мин*

ΔE, *кэв*	40 x 50 *мм*		30 x 25 *мм*		18 x 30 *мм*	
	U	Th	U	Th	U	Th
20	186	151	53,6	34,8	22	13,7
200	1578	990	462	260	180	94
300	2375	1200	684	319	260	118
400	2932	1387	843	374	319	140
500	3392	1548	972	425	368	160
600	3815	1701	1088	465	412	177
700	4108	1886	1170	515	442	198

кому изменению первоначальной формы аппаратурного спектра. Экстремальные точки в спектрах γ-излучения U и Th, соответствующие

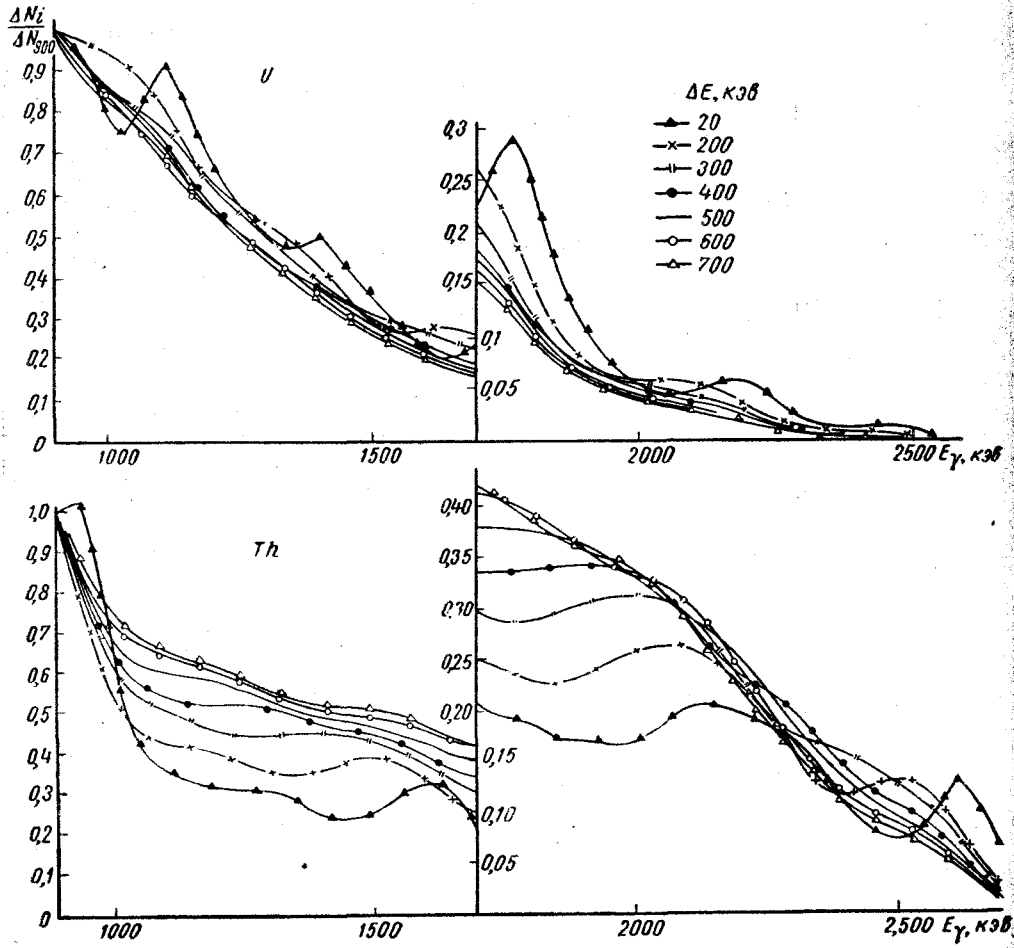


Рис. 2. Аппаратурные спектры гамма-излучения урана и тория, нормированные по скорости счета в энергетическом окне $(900 + \Delta E)$ *кэв*. Кристалл NaJ(Tl) 30×25 *мм*

интенсивным линиям 1,12, 1,76, 2,19, 2,68 *Мэв*, с некоторым искажением и смещением по энергетической шкале фиксируются лишь при ширине окна до 200 *кэв*. При ширине окна 300 *кэв* и более спектральные кривые становятся ниспадающими, и форма аппаратурных спектров изменяется мало с увеличением ширины окна до 700 *кэв*. Это, в первую очередь, относится к спектру излучения урана. Следовательно, при конструировании спектрометров целесообразно предусматривать широкие окна, так как с увеличением ширины окна возрастает скорость счета импульсов и уменьшается статистическая составляющая погрешности счета.

Важным гамма-спектральным параметром при раздельном определении урана и тория является урановый эквивалент тория [Новиков, Капков, 1965]. От его значения зависит коэффициент разделения

$$\eta = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \qquad (2)$$

(урановом) и втором (ториевом) окнах спектрометра.

Как видно из рис. 3, наиболее низкие величины γ (0,3—0,4) имеют место в области 1000—1200 *кэв*. Значения γ более 3—4 начинаются в интервале энергий 2000—2200 *кэв* и затем быстро нарастают до 20—25 около 2500 *кэв*. При широких окнах урановые эквиваленты выше, чем при узких. Это в первую очередь относится к области спектра 1700—2400 *кэв*, где величины γ в зависимости от ширины окна различаются в два и более раз. Данные рис. 2 и 3 и аналогичные им для других кристаллов служат основой выбора положения и ширины энергетических окон спектрометра, при которых погрешность гамма-спектрометрических определений содержания U и Th будет наименьшей. К числу главных условий выбора окон относятся: 1) низкий градиент скорости счета при изменении положения окна; 2) большая скорость счета; 3) высокий коэффициент разделения η.

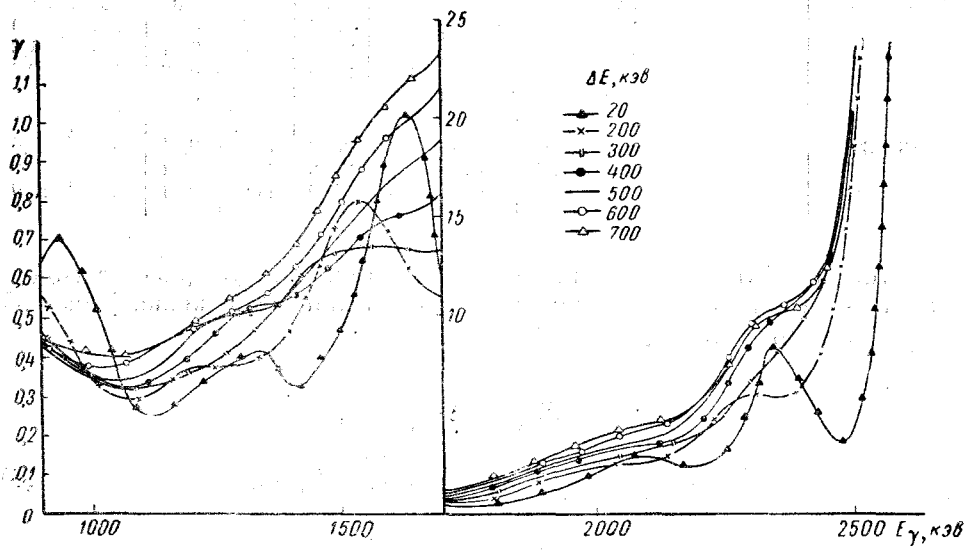


Рис. 3. Урановые гамма-эквиваленты тория. Ширина окон 20—700 *кэв*. Кристалл NaJ(Tl) 30×25 *мм*

С точки зрения первого условия в спектре урана обращают на себя внимание участки в области 1500—1700 *кэв* (нижний уровень окон) при ширине окон 200—300 *кэв* и в области 1050—1150 *кэв* при ширине окон 300 и 600—700 *кэв*, в спектре тория — участки 1800—2100 *кэв* для окон шириной 400—600 *кэв* и область 2500 *кэв* при ширине окна 200 *кэв*.

Выполнение второго положения требует увеличения ширины окон, особенно при работе с малыми кристаллами. Как следует из рис. 3, третье условие наилучшим образом выполняется при выборе нижнего порога первого окна в интервале 1000—1200 *кэв*, второго — в области 2000 *кэв* и выше.

Энергетические окна, выбранные нами для дальнейшего исследования ошибок определения U и Th по гамма-спектральным данным, приведены в табл. 2.

Удельные скорости счета импульсов в различных энергетических интервалах

Размер кристалла NaJ (Tl), *мм*	Номер интервала	Первое окно				Второе окно				γ_i
		Нижний уровень, *кэв*	Ширина, *кэв*	Число импульсов в 1 *сек* на 0,01%		Нижний уровень, *кэв*	Ширина, *кэв*	Число импульсов в 1 *сек* на 0,01%		
				U	Th			U	Th	
40×50	1	1660	200	8,8	4,4	2040	600	3,25	10,5	6,7
	2	1500	300	13,1	8,4	2040	600	3,25	10,5	5,2
	3	1060	300	32,1	9,9	2040	600	3,25	10,5	10,7
	4	1380	700	27,4	14,8	2010	600	3,25	10,5	4,9
	5	1040	700	54,5	21,6	2040	600	3,25	10,5	8,3
30×25	1	1640	200	2,1	1,3	2500	200	0,03	0,56	31
	2	1640	200	2,1	1,3	2020	600	0,71	2,55	6,0
	3	1120	700	13,3	5,6	2020	600	0,71	2,55	8,5
	4	1120	700	13,3	5,6	2020	700	0,73	2,94	9,6
	5	1040	700	12,6	5,5	2100	700	0,73	2,94	9,2
18×30	1	1620	200	0,68	0,57	2000	600	0,21	1,0	5,6
	2	1080	300	3,1	1,1	2000	600	0,21	1,0	12,9
	3	1080	700	5,2	2,5	2000	600	0,21	1,0	10,0

Погрешность определения содержания U и Th. Для расчета содержаний q_U и q_{Th} обычно используют следующие выражения [Соколов и др., 1964; Новиков, Капков, 1965]

$$q_U = 0{,}01\left(\frac{b_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} N_1 - \frac{b_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2} N_2\right) = A_1 N_1 - B_1 N_2, \qquad (3)$$

$$q_{Th} = 0{,}01\left(\frac{a_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2}\right) N_2 - \frac{a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} N_1\Big) = A_2 N_2 - B_2 N_1,$$

где N_1 и N_2 — скорости счета импульсов в оптимальных для U и Th участках спектра; a_1, a_2 и b_1, b_2 — пересчетные коэффициенты, устанавливаемые с высокой точностью на эталонных моделях урановых и ториевых руд в тех же условиях, при каких измеряются скорости счета N_1 и N_2, *имп/мин* или *имп/сек* на 0,01% U и Th (табл. 2).

Для оценки квадратичной погрешности σ определения U и Th можно использовать исходную формулу

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial\psi}{\partial x_1}\Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\psi}{\partial x_2}\Delta x_2\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial\psi}{\partial x_n}\Delta x_n\right)^2} \qquad (4)$$

при $y = \psi(x_1, x_2, \ldots, x_n)$.

Полагая, применительно к выражениям (3), $y = q_U$ или q_{Th}, $x_1 = N_1$, $x_2 = N_2$, $\Delta x_1 = \Delta N_1$, $\Delta x_2 = \Delta N_2$, a_1, a_2, b_1, b_2 постоянными величи-

ной погрешности урана и тория

$$\delta_U = \frac{\sigma_U}{U_{ист}} = \sqrt{\frac{(b_2\,\Delta N_{1\,общ})^2 + (b_1\,\Delta N_{2\,общ})^2}{(b_2 N_{1\,ист} - b_1 N_{2\,ист})^2}},$$
$$\delta_{Th} = \frac{\sigma_{Th}}{Th_{ист}} = \sqrt{\frac{(a_1\,\Delta N_{2\,общ})^2 + (a_2\,\Delta N_{1\,общ})^2}{(a_1 N_{2\,ист} - a_2 N_{1\,ист})^2}}, \quad (5)$$

где погрешность измеренной скорости счета

$$\Delta N_{i\,общ} = N_i - N_{i\,ист}; \quad (6)$$

истинная скорость счета импульсов в i-ом канале спектрометра ($i=1,2$)

$$N_{i\,ист} = (a_i q_U + b_i q_{Th})\,100. \quad (7)$$

Главными источниками ошибок опробования являются: 1) статистический характер распада радиоактивных элементов и счета гамма-квантов; 2) смещение нижнего и верхнего порога энергетических окон гамма-спектрометра; 3) изменение ширины окна; 4) нестабильность усилительного тракта. Три последних фактора определяют размер аппаратурных ошибок $\Delta N_{i\,ап}$ гамма-спектрометра, первый — статистической $\Delta N_{i\,ст}$.

Следовательно,

$$N_i = N_{i\,ист} \pm \Delta N_{i\,ст} \pm \Delta N_{i\,ап}. \quad (8)$$

Статистическая погрешность, в свою очередь,

$$\Delta N_{i\,ст} = \sqrt{\frac{N_{i\,ист}}{t}}, \quad (9)$$

где t — время измерения числа импульсов n_i, причем

$$N_i = \frac{n_i}{t}. \quad (10)$$

Статистическую погрешность $\Delta N_{ст}$ вычисляли по формулам (7) и (9) при содержаниях урана и тория соответственно 0,10 и 0,03; 0,03 и 0,03; 0,03 и 0,10%. Время фиксации числа импульсов 1 *мин*, для кристалла 18×30 *мм* 1 и 10 *мин*. Аппаратурную погрешность определяли по графикам спектров, построенным при указанной в табл. 2 ширине окон и смещении границ окон $\Delta E'$, равном ±20, 40 и 60 *кэв*. Результаты вычислений относительной среднеквадратичной погрешности определения U и Th, при содержании этих элементов 0,03%, приведены на рис. 4. Графики погрешности берут начало из точек, соответствующих размеру статистической ошибки. Влияние содержаний U и Th и торий-уранового отношения на величину погрешности иллюстрируется рис. 5, на примере кристалла 30×25 *мм*. Анализ этих и других, имеющихся в нашем распоряжении графиков для $q_U = 0{,}10\%$, $q_{Th} = 0{,}03\%$ и $q_U = 0{,}03\%$ и $q_{Th} = 0{,}10\%$, показывает следующее.

1. Статистическая погрешность $\delta_{ст}$, являющаяся по своему характеру случайной, колеблется от единиц до десятков процентов и в целом снижается с увеличением размера кристалла, ширины окна, содержания определяемого радиоактивного элемента, времени измерения и уменьшением содержания сопутствующего элемента. При широких окнах (600—700 *кэв*) и экспозиции 1 *мин*, значения $\delta_{ст.\,U}$ равны 2%

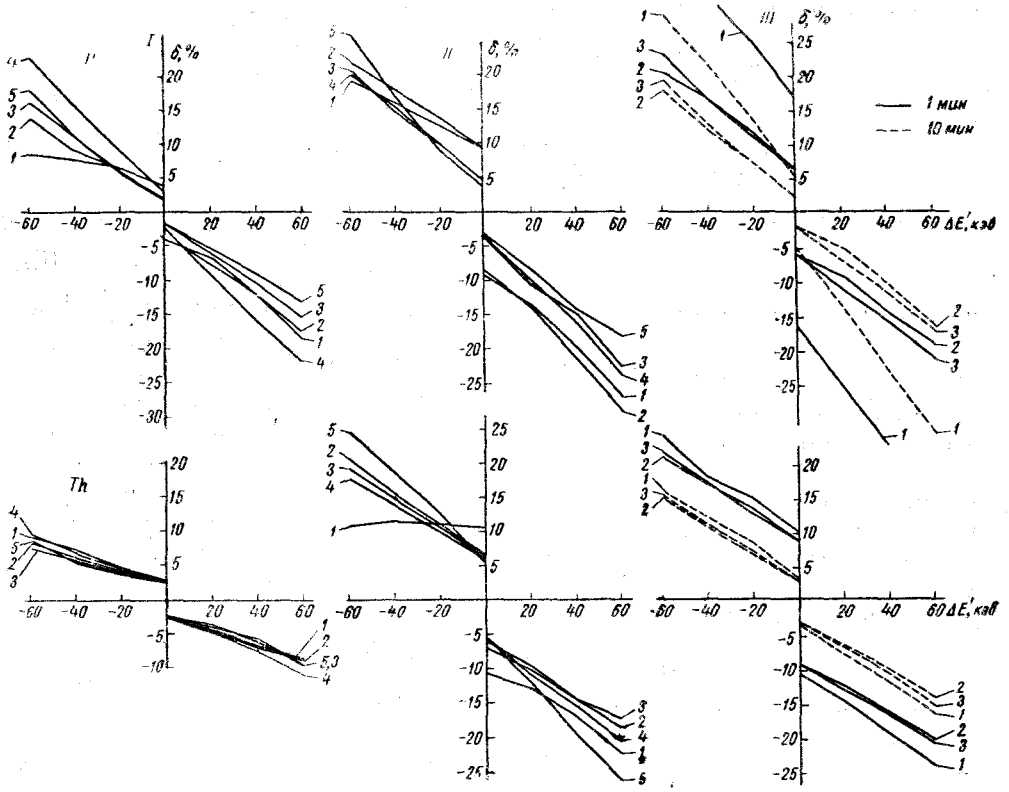


Рис. 4. Погрешности определения урана и тория. Кристалл NaJ(Tl):
I—40×50 *мм*; *II*—30×25 *мм*; *III*—18×30 *мм*. Время измерений 1—10 мин. Номер и положение энергетических окон соответствуют данным табл. 2

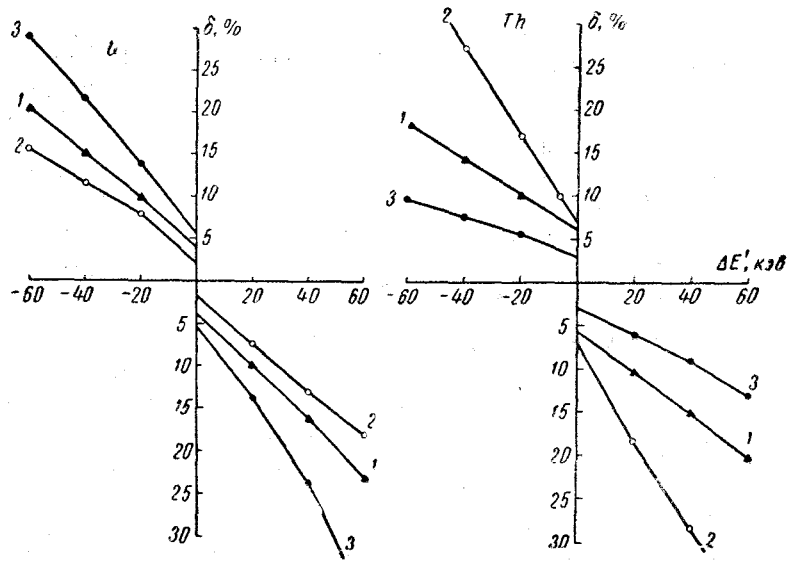


Рис. 5. Погрешность определения урана и тория при нижних порогах 1120 и 2000 *кэв* и ширине энергетического окна 700 *кэв*. Кристалл NaJ(Tl) 30×25 *мм*. Время измерений 1 мин.
Содержания урана и тория соответственно, %: *1*—0,03, 0,03; *2*—0,10, 0,03; *3*—0,03, 0,10

ветственно равны 2,5; 6 и 9%. Для окон же шириной 200 *кэв* статистическая погрешность определения U и Th с кристаллом 40×50 *мм* не превышает 5%, но с кристаллом 18×30 *мм* достигает 20—30%. Лишь увеличивая время наблюдений с последним кристаллом до 10 *мин* удается снизить $\delta_{ст.\,U}$ и $\delta_{ст.\,Th}$ до 2—3% при широких окнах и 5—9% — при узких.

Примерно такая же статистическая погрешность ожидается для кристалла 18×30 *мм*, если при расчете содержания U и Th по каротажным данным использовать не скорости счета в пункте наблюдения, а площади кривых интенсивности излучения по оси скважины, измеренные при данной ширине энергетических окон спектрометра *.

2. Наклон графиков аппаратурной погрешности, являющейся по своему характеру переменной во времени систематической погрешностью, зависит от положения и ширины окна, но мало зависит от размера кристалла, если окна широкие и нижний уровень их находится в области 1000—1100 *кэв*. Если первое окно приходится на узкую область фотопика 1,76 *Мэв*, спектрометрические качества кристалла ухудшаются с уменьшением его размера.

Для кристаллов 40×50 и даже 30×25 *мм* наклон кривых оказывается минимальным при выборе узкого окна (200 *кэв*) в области фотопика 1,76 *Мэв*. Однако статистическая погрешность в этом случае наибольшая.

3. Увеличение относительного содержания сопутствующего элемента приводит к увеличению наклона кривой ошибки $\delta_{U,\,Th}(\Delta E')$ определяемого элемента (рис. 5).

Представляет интерес оценка допустимых пределов смещения энергетических окон $\Delta E'$, при которых суммарная ошибка определения содержания U и Th не превысит ±10%. Эта цифра соответствует точности определения содержания урана по каротажу, если эти данные используются при подсчете запасов атомного сырья [Овчинников и др., 1963]. Суммарные статистическая и аппаратурная погрешности U и Th не более ±10% обеспечиваются при разном размере $\Delta E'$, в зависимости от размера кристалла, положения и ширины окон спектрометра, времени регистрации излучения, величины торий-уранового отношения и абсолютных содержаний этих элементов в рудах. Для кристалла 40×50 *мм* и экспозиции 1 *мин* — это обычно 30—60 *кэв* (для тория до 100 *кэв*), если в руде примерно одинаковое содержание U и Th, и 20—30 *кэв*, если содержание мешающего элемента превышает в 2—3 раза содержание определяемого. Для кристаллов 30×25 и 18×30 *мм* при экспозиции 1 *мин* и содержания U и Th, равном 0,08%, величина $\Delta E'_{10\%}$ находится в интервале 15—25 *кэв*, если окна широкие, и 5—10 *кэв*, если окна узкие. Решающее значение при этом на снижение $\Delta E'_{10\%}$ оказывает статистическая погрешность. Лишь увеличением времени наблюдений до 10 *мин* или использованием в расчетах площадей каротажных диаграмм удается для кристалла 18×30 *мм* увеличить $\Delta E'_{10\%}$ до 30—40 *кэв* при широких окнах. При узких окнах и относительно большом содержании тория в рудах 10-процентной точности определения содержания урана с этим кристаллом не удается достичь даже при 10-минутной экспозиции.

---

* См. в настоящем сборнике А. Я. Синицын «Выбор продолжительности гамма-спектрального опробования урано-ториевых руд».

1. Оптимальными энергетическими окнами гамма-спектрометра, которые обеспечивают минимальную погрешность определения U и Th с кристаллами NaJ(Tl) размером 40×50, 30×25, 18×30 *мм*, является для первого окна 700 или 300 *кэв* при нижнем уровне в области 1040—1120 *кэв;* для второго 600 *кэв* при нижнем уровне около 2000 *кэв*.

Для кристалла NaJ(Tl) 40×50, кроме того, рекомендуется первое окно шириной 200 или 300 *кэв* при нижнем пороге в первом случае 1600—1640 *кэв*, во втором — около 1500 *кэв*.

2. Статистическая и аппаратурные погрешности определения содержания U и Th зависят от формы и размера сцинтиллятора, положения и ширины энергетических окон, абсолютного и относительного содержания радиоактивных элементов, времени наблюдения. Значения погрешностей для выбранных условий измерения излучения показаны на рис. 4 и 5.

3. Скорости счета импульсов кристаллами 40×50 при указанных выше оптимальных энергетических окнах составляют 10 *имп/сек* и более на 0,01% U или Th, что свидетельствует о возможности записи аномального эффекта в рудных интервалах скважин на движущуюся ленту самописца без больших флуктуаций.

ЛИТЕРАТУРА

Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Недра, Л., 1965.

Овчинников А. К. и др. Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений. Госгеолтехиздат, М., 1963.

Соколов М. М. и др. О раздельном определении урана, тория и калия в естественном залегании с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра. Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 4. Недра, М., 1964.

Хитев П. П., Федоров А. А. Полевой переносный гамма-спектрометр для количественных определений радия, тория и калия. Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 7, Недра, Л., 1966.