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

ВЫБОР ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГАММА-СПЕКТРАЛЬНОГО ОПРОБОВАНИЯ УРАНО-ТОРИЕВЫХ РУД

А. Я. Синицын

Как известно, существенную долю погрешности определения содержания урана и тория гамма-спектральным методом составляет статистическая погрешность *. Неблагоприятные условия измерения складываются в первую очередь для сцинтилляторов малого размера. Так, чтобы обеспечить с кристаллами NaJ(Tl), 18×30 *мм* погрешность определения U и Th не более 10% в рудах с содержанием этих элементов 0,03%, экспозиция измерения должна быть около 10 *мин*. Если же при расчете содержания U и Th по гамма-спектральным данным использовать не скорости счета импульсов, а площади гамма-спектральных каротажных диаграмм, записанных самописцем или построенных по результатам точечных измерений в оптимальных энергетических интервалах гамма-спектра, ошибка определения площади кривой оказывается сравнительно небольшой даже при малой экспозиции измерения скорости счета импульсов.

Приведем результаты расчета статистической погрешности скоростей счета в точках и погрешности определения площадей кривых и содержания U и Th при экспозиции измерений от 10—30 *мин* до 10 *сек*. Стандартные кристаллы NaJ(Tl), 40×50, 30×25 и 19×30 *мм*. Анализатор импульсов АИ-100. Модель насыщенного по гамма-излучению слоя урановой руды содержит 0,100% U, разборная модель ториевой руды соответственно 0,075% Th. Скорости счета импульсов измерены в условиях 4π-геометрии, в энергетическом интервале 1,66—1,86 *Мэв* на урановой руде (фотопик 1,76 *Мэв*) и 2,50—2,80 *Мэв* на ториевой (фотопик 2,62 *Мэв*). Мощности рудных тел 1,4 *м* в первом случае и 1,0 *м* во втором. Заполненные рудой цилиндрические модели стояли на земле, где на продолжении осевого отверстия модели, имитирующего скважину, был пробурен шпур того же диаметра на глубину 2 *м* от поверхности. Выполнялся точечный каротаж нижней половины рудного тела и слоя неактивных песчаных отложений на глубину $h=140$ *см* от центра рудного пласта для урановой модели и $h=100$ *см* — для ториевой. Расстояние между пунктами наблюдений по оси модели 20 *см*, вблизи контакта 10 *см*.

* Баляснный Н. Д. и др. О погрешности определения концентрации радиоактивных элементов в горных породах по измерениям гамма-поля пороговыми и дифференциальными спектрометрами. Изв. АН СССР, Физика земли, № 4, 1966.

40×50 и 30×25 *мм* при экспозиции 5—30, 3,1 *мин*, 30 и 10 *сек* (рис. 1).

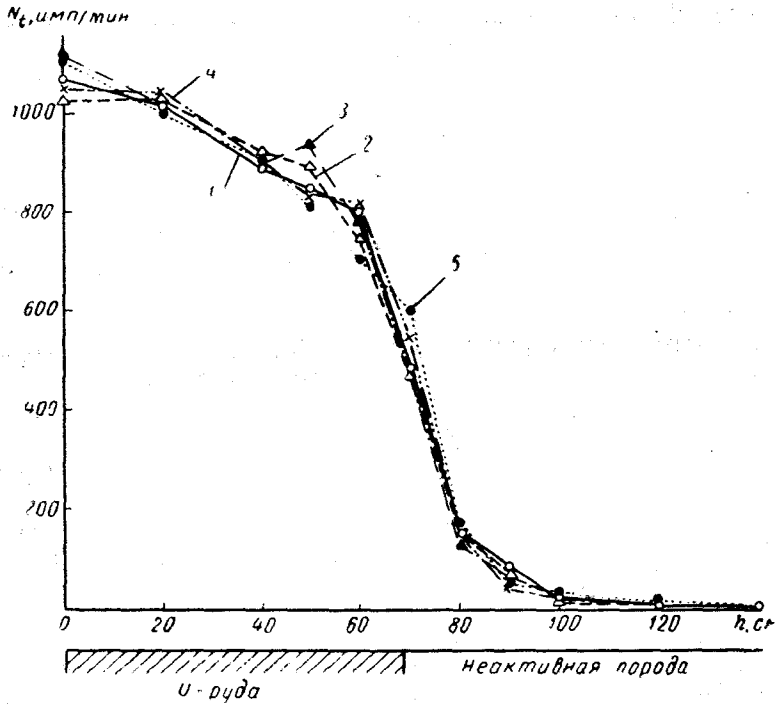


Рис. 1. Графики каротажа урановой модели с кристаллом NaJ(Tl), 30×25 *мм* при экспозиции измерений:
1—10—30 *мин*; *2*—3 *мин*; *3*—1 *мин*; *4*—30 *сек*; *5*—10 *сек*

Анализ погрешностей скоростей счета N_t при экспозиции t и площадей каротажных диаграмм S_t выполнен раздельно для рудного и безрудного интервалов модели. Первый включает шесть пунктов измерений (от контакта до центра рудного тела) и характеризуется средней скоростью счета $\bar{N}$, равной в окне 1,66—1,86 *Мэв* для кристаллов 40×50 и 30×25 *мм*, соответственно, 4090 и 890 *имп/мин*. За безрудный интервал принят участок скважины длиной 30 *см* за контактом рудного тела. В него попадают три точки наблюдения, средняя скорость счета в нем для разных кристаллов показана в табл. 1.

Таблица 1

Погрешности определения скоростей счета $\bar{\delta}_{N_t}$ и площадей каротажных диаграмм δ_{S_t} для урановой модели

Интервал U-модели	Кристалл NaJ (Tl), *мм*	$\bar{N}$, *имп/мин*	$S_{ист}$, (*имп/мин*) *см*	$\pm\bar{\delta}_{N_t}/\delta_{S_t}$, %			
				3 *мин*	1 *мин*	30 *сек*	10 *сек*
Рудный	40×50	4090	274000	1,5 / 0,1	2,2 / 0,6	2,0 / 1,1	3,8 / −0,6
	30×25	890	61500	2,8 / 0,3	3,1 / 1,9	3,4 / 1,6	8,1 / −0,8
Безрудный	40×50	550	26000	3,6 / 0,6	3,9 / −4,0	9,2 / −5,7	11,5 / −2,9
	30×25	90	5750	8,9 / −4,3	18,0 / −9,5	22,4 / −4,0	23,8 / 4,1

Интервал U-модели	Кристалл NaJ (Tl), *мм*	$\overline{N}$, *имп/мин*	$S_{ист}$, *(имп/мин) см*	$\pm\bar{\delta}_{N_t}/\delta_{S_t}$, %			
				3 *мин*	1 *мин*	30 *сек*	10 *сек*
Суммарный	40×50	—	300000	$\frac{-}{0,2}$	$\frac{-}{0,2}$	$\frac{-}{0,5}$	$\frac{-}{0,8}$
	30×25	—	67250	$\frac{-}{0,1}$	$\frac{-}{0,9}$	$\frac{-}{1,1}$	$\frac{-}{0,4}$

Ошибки скоростей счета в рудном и безрудном интервалах при разной экспозиции t охарактеризованы относительными среднеарифметическими погрешностями

$$\bar{\delta}_{N_t} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{N_{i,t} - N_{i\,ист}}{N_{i\,ист}}\right| 100\%,$$

где n — число точек наблюдений внутри интервала скважины; i — номер точки по оси скважины; $N_{i,t}$ — скорость счета в i-й точке при времени экспозиции t (рис. 1), *имп/мин*; $N_{i\,ист}$ — условно принятая истинной скорость счета в i-й точке при максимальной экспозиции (5—10 *мин* в рудном интервале, 20—30 *мин* в безрудном), *имп/мин;* погрешность определения $N_{i\,ист}$ для кристалла 40×50 *мм* в рудном и безрудном интервалах равна 0,6 и 0,9%, для кристалла 30×25 *мм,* соответственно 0,8 и 1,5%.

Относительные погрешности площадей диаграммы S_t в рудном, безрудном интервалах и по всей скважине в целом

$$\delta_{S_t} = \frac{S_t - S_{ист}}{S_{ист}} 100\%,$$

где S_t и $S_{ист}$ — площадь соответствующей части диаграммы, полученной при экспозиции t и при максимальной экспозиции, *(имп/мин) см*.

Как видно из табл. 1, средняя арифметическая погрешность определения скорости счета в пункте наблюдения $\bar{\delta}_{N_t}$ в рудном интервале от 2 до 10 и более раз превышает относительную погрешность определения площади каротажных диаграмм δ_{S_t}.

Величина $\bar{\delta}_{N_t}$ возрастает с уменьшением экспозиции t как в рудном, так и безрудном интервалах урановой модели, достигая при t=10 *сек* для кристаллов 40×50 и 30×25 *мм* в первом случае 3,8 и 8,1%, во втором 11,5 и 23,8%, что примерно на 1/3 превышает погрешность за счет статистических колебаний скорости радиоактивного распада *. Вероятно, это связано с нестабильностью усиления импульсов в процессе измерения их гамма-спектрометром.

Значения δ_{S_t} мало зависят от продолжительности регистрации N_t. В среднем погрешность определения площади S_t в рудном интервале и всей площади для кристалла 40×50 *мм* в целом равна 0,6 и 0,4%, для кристалла 30×25 *мм,* соответственно, 1,1 и 0,6%. В безрудном интервале для тех же кристаллов она достигает 3,3 и 5,5%.

* См. в настоящем сборнике Новиков Г. Ф., Синицын А. Я., Козында Ю. О. Оптимальные энергетические окна сцинтилляционного гамма-спектрометра.

40×30, 30×25 и 18×30 *мм* при экспозиции от 10—30 *мин* до 10 *сек*. Полученные диаграммы для примера приведены на рис. 2 лишь для последнего кристалла. На ториевой модели наблюдения обработаны так же, как на урановой (табл. 2). Размеры погрешностей $\overline{\delta}_{N_t}$ и δ_{S_t}

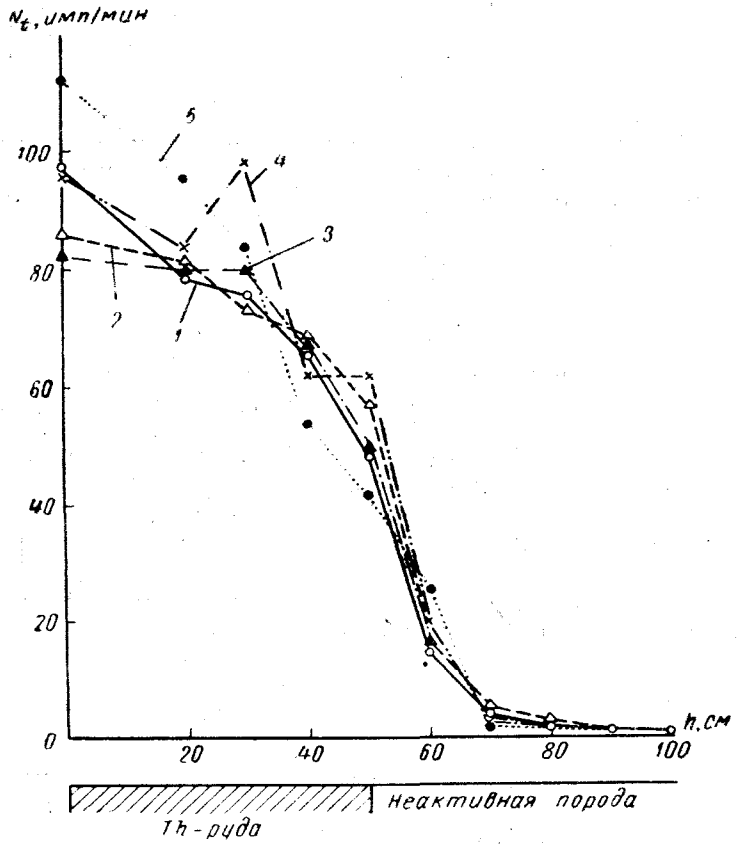


Рис. 2. Графики каротажа ториевой модели с кристаллом NaJ(Tl), 18×30 *мм* при экспозиции измерений:
1—10—30 *мин*; *2*—5 *мин*; *3*—3 *мин*; *4*—1 *мин*; *5*—30 *сек*

Таблица 2

Погрешности определения скоростей счета $\overline{\delta}_{N_t}$ и площадей каротажных диаграмм δ_{S_t} для ториевой модели

Интервал Th-модели	Кристалл NaJ (Tl), *мм*	$\overline{N}$, *имп/мин*	$S_{ист}$, (*имп/мин*) *см*	$\pm\overline{\delta}_{N_t}/\delta_{S_t}$, %				
				5 *мин*	3 *мин*	1 *мин*	30 *сек*	10 *сек*
Рудный	40×50	1130	58600	—	2,2 / —1,5	2,6 / —1,7	5,0 / 1,5	8,3 / 2,0
	30×25	202	10550	3,4 / 1,2	4,0 / —1,0	4,2 / —1,7	5,1 / 1,0	16,0 / —2,2
	18×30	75	3810	5,5 / —1,0	6,2 / —2,4	15,6 / 7,9	18,7 / 8,4	—

Интервал Th-модели	Кристалл NaJ (Tl), *мм*	$\bar{N}$, *имп/мин*	$S_{\text{ист}}$, (*имп/мин*) *см*	$\mp\bar{\delta}_{N_t}/\delta_{S_t}$, %				
				5 *мин*	3 *мин*	1 *мин*	30 *сек*	10 *сек*
Безрудный	40×50	170	9870	—	3,2 / 0,1	12,3 / 7,2	13,1 / 5,2	25,0 / 8,8
	30×25	28	1450	13,2 / −3,4	14,0 / −1,8	22,9 / −3,4	26,0 / 4,9	—
	18×30	7	440	10,7 / 8,6	24,1 / −4,5	31,4 / 22,7	55,0 / 11,4	—
Суммарный	40×50	—	68470	—	— / −1,5	— / −0,6	— / 2,0	— / 3,0
	30×25	—	12000	— / 0,7	— / −1,1	— / −2,8	— / 1,4	— / —
	18×30	—	4250	— / −0,9	— / −2,6	— / 9,4	— / 8,7	—

с кристаллами 40×50 и 30×25 *мм* для ториевой модели превышают аналогичные ошибки на урановой модели из-за более низкой скорости счета импульсов в каналах спектрометра. В целом выводы, полученные при изучении урановой руды указанными детекторами, подтверждаются на ториевой модели. Погрешности с кристаллом NaJ(Tl) 18×30 *мм* для S_t достигают 8—9% для скоростей счета 15—18% при экспозиции 0,5—1,0 *мин*. Лишь при экспозиции 3,0 *мин* δ_{S_t} снижается до 2,6% и $\bar{\delta}_{N_t}$ — до 6,2%.

Погрешность определения U и Th. По данным табл. 1 и 2 рассчитаны в двух вариантах ожидаемые среднеквадратичные ошибки определения содержания урана и тория при разной продолжительности точечного каротажа и равной концентрации радиоактивных элементов в руде и моделях (0,100% U и 0,075% Th).

В первом варианте расчета $\delta_{U,t}$ и $\delta_{Th,t}$ содержание элементов определяется по скоростям счета в пункте наблюдения, во втором $\delta'_{U,t}$ и $\delta'_{Th,t}$ — по значениям площади каротажных диаграмм

$$\delta_{U,t} = \frac{\sqrt{(b_2 \Delta k_{1,t})^2 + (b_1 \Delta k_{2,t})^2}}{b_2 k_1 - b_1 k_2},$$

$$\delta'_{U,t} = \frac{\sqrt{(b_2 \Delta k'_{1,t})^2 + (b_1 \Delta k'_{2,t})^2}}{b_2 k'_1 - b_1 k'_2},$$

$$\delta_{Th,t} = \frac{\sqrt{(a_1 \Delta k_{2,t})^2 + (a_2 \Delta k_{1,t})^2}}{a_1 k_2 - a_2 k_1},$$

$$\delta'_{Th,t} = \frac{\sqrt{(a_1 \Delta k'_{2,t})^2 + (a_2 \Delta k'_{1,t})^2}}{a_1 k'_2 - a_2 k'_1},$$

где a_i и b_i — пересчетные коэффициенты на 1%, соответственно, U и Th, измеренные в i-м энергетическом интервале спектра гамма-лучей (в настоящем случае 1,66—1,86 и 2,50—2,80 *Мэв*), *имп/мин*; k_i — сред-

тория в i-м канале спектрометра, *имп/мин*; $k_i = \frac{\mathcal{S}_i}{H}$ ($\mathcal{S}_i$ — суммарная площадь каротажной диаграммы в i-м канале спектрометра в границах рудного пласта мощностью H при наличии в руде урана и тория), *имп/мин*; $\Delta k_{i,t}$ и $\Delta k'_{i,t}$ — абсолютные погрешности определения скоростей счета при разной экспозиции в пункте наблюдения или площадей каротажных диаграмм,

$$\Delta k_{i,t} = \delta_{N_t} k_i, \quad \Delta k'_{i,t} = \delta_{S_t} k'_i.$$

Таблица 3

Ожидаемые среднеквадратичные ошибки определения содержания U и Th для кристалла NaJ(Tl), 30×25 *мм*, %

Метод расчета	U				Th			
	3 *мин*	1 *мин*	30 *сек*	10 *сек*	3 *мин*	1 *мин*	30 *сек*	10 *сек*
По k_i	4,6	5,1	5,8	11,5	4,6	4,7	5,7	17,7
По k'_i	0,7	3,0	2,5	1,7	1,1	1,9	1,1	2,4

Табл. 3 наглядно подтверждает преимущество второго метода интерпретации гамма-спектральных каротажных диаграмм, особенно при малой продолжительности наблюдений в отдельных точках.

Выводы

1. Использование при интерпретации гамма-спектральных данных площадей каротажных диаграмм S (*имп/мин*) *см* вместо скоростей счета N *имп/мин* позволяет в несколько раз снизить статистическую ошибку определения как исходных величин, так и содержаний U и Th.

2. Площади диаграмм S_i, полученные при каротаже U и Th рудных пластов с кристаллами 40×50, 30×25 *мм*, для условий эксперимента мало зависят от времени наблюдения. При точечном каротаже рудных интервалов с содержанием U и Th около 0,1% оно может быть принято для этих кристаллов 10 *сек*.

Погрешность определения площади диаграммы S_t с кристаллом 18×30 *мм* при малой экспозиции существенно возрастает по сравнению с кристаллами бóльших размеров. Для уменьшения ошибок в этом случае необходимо увеличить ширину энергетического окна и экспозицию до 1 *мин* и более.