

СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ И РАСЧЁТА АКТИВНОСТИ КОРОТКОЖИВУЩИХ ГАММА-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

¹Тертышник Э.Г., ²Епифанова И.Э.

¹ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета РФ,
Обнинск, e-mail: edtertysh23@yandex.ru;

²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»,
Обнинск, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com

Рассмотрен опыт идентификации и расчёта активности радионуклидов при гамма-спектрометрии образцов, содержащих ряд короткоживущих нуклидов низкой активности (период полураспада менее 1 ч). Необходимость идентификации подобных радионуклидов может возникнуть при исследовании воздействия космического излучения на различные соединения химических элементов, а также в процессе экспериментов по изучению возможностей проведения низкоэнергетических ядерных реакций. В работе подробно описан процесс анализа аппаратного спектра, полученного от излучения литиевого препарата после экспозиции его в космических лучах с целью идентификации по энергиям гамма-излучения и по периодам полураспада нуклидов. Рассчитана активность идентифицированных радионуклидов, период полураспада которых составлял от 1 до 30 мин. Приведены результаты расчёта активности пяти из идентифицированных нуклидов с активностью от 0,1 до 2 Бк, а атомные номера находились в диапазоне от 21 (^{46m}Sc) до 69 (¹⁷⁶Tm). Отмечено влияние комптоновского излучения высокоэнергетических гамма-квантов и тормозного излучения от бета-частиц на результаты расчёта активности. Сделан вывод о возможном по этой причине завышении значений активности при проведении гамма-анализа препаратов низкой активности. На практических примерах рассмотрен метод коррекции подобного завышения.

Ключевые слова: гамма-анализ, короткоживущий нуклид, литий, космические лучи, изобарная цепочка, тормозное излучение, эффект Комптона

ON THE METHOD OF IDENTIFICATION AND THE ACTIVITY CALCULATION OF SHORT-LIVING GAMMA EMITTERS

¹Tertyshnik E.G., ²Epifanova I.E.

¹Research & Production Association «Typhoon» of Roshydromet RF, Obninsk,
e-mail: edtertysh23@yandex.ru;

²Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com

Some results of researching for identification and calculation the activity of radionuclides in gamma spectrometry of samples containing many short-lived low activity nuclides (half-life less than 1 hour) was presented. The need to identify such radionuclides can be linked to the study of the effect of cosmic radiation on various chemical elements compounds and to observation the experiments of possible carrying out low-energy nuclear reactions. The step-by-step guide for the process of analyzing the instrumental spectrum obtained from radiation of a lithium preparation after its exposure with cosmic rays with the view to identify by the energies of gamma radiation and by the half-lives of nuclides was given. The activity of the identified radionuclides was calculated. The results of the calculation of the activity of 5 identified, the activity of which ranged from 0,1 to 2 Bq, and whose atomic numbers ranged from 21 (^{46m}Sc) to 69 (¹⁷⁶Tm), are presented. The effects from Compton radiation of high-energy gamma-quanta and the beta-particles braking radiation on the results of the activity calculating were noted. It was concluded that, with this reason, the so high estimate of the activity values during the gamma analysis of low activity samples was made. A method for correcting such an overestimation is considered on practical examples.

Keywords: gamma analysis, short-lived nuclide, lithium, cosmic rays, isobaric chain, braking radiation, Compton effect

В процессе изучения различных аспектов определения радионуклидного состава продуктов, поступающих во внешнюю среду как при радиационных авариях и ядерных взрывах, так и при штатной работе предприятий атомной энергетики, накоплен большой объем информации, изложенный в широком ряде работ [1, 2]. При гамма-анализе образцов почв, загрязненных радионуклидами, оседающими на подстилающую поверхность, как при нормальной работе АЭС, так и в случаях аварий, бывает необходимо учитывать присутствие в анализируемых образцах короткоживущих радионуклидов. Также надо отметить, что, наряду с техногенными радионуклидами, в почвах

присутствуют короткоживущие дочерние продукты от распада естественных радионуклидов: урана, тория, радия – присутствие которых усложняет анализ и снижает его чувствительность [3].

Идентификация и расчёт активности нуклидов с коротким периодом полураспада широко применяется при гамма-спектрометрии облучённых нейтронами образцов в процессе нейтронно-активационного анализа (НАА) [4, 5]. Авторы данной работы предлагают способ определения и расчёта активности радионуклидов в образцах с заранее не определенным радионуклидным составом. В этом состоит отличие предлагаемого метода от метода НАА, при ко-

тором происходит идентификация радионуклидных составляющих из ряда заранее известных возможных вариантов. Также нужно отметить, что, в отличие от исследований, анализирующих низкоактивные космогенные нуклиды с большими периодами полураспада [6, 7], в данной работе приведены результаты изучения радионуклидов с существенно меньшими периодами полураспада.

Метод идентификации и расчёта активности короткоживущих радионуклидов низкой активности рассматривается на примере гамма-анализа нуклидов, образующихся в эксперименте по изучению воздействия космических лучей (КЛ) на препараты лития [8].

Данная работа представлена с целью ознакомления специалистов, работающих в области гамма-спектрометрии, исследующих особенности идентификации и определения активности короткоживущих радионуклидов низкой активности.

1. Подготовка образцов к гамма-анализу

При проведении экспериментов [8] препараты лития (LiOH , LiAlH_4) массой 5–7 г помещали в цилиндрические кюветы с крышкой. Кюветы диаметром 46 мм и высотой 10 мм, изготовленные из полихлорвинила, с размещенными в них препаратами оставляли на открытом воздухе (вне помещения) на 10–25 суток. Гамма-анализ препаратов осуществлялся с помощью германиевого детектора GEM30185, помещенного внутри защитной камеры из свинца («EG&G Ortec», США). Толщина стенок защитной камеры 10 см. Кювету с препаратом устанавливали на торец детектора. С момента установки препарата в защитную камеру воздействие мягкой компоненты космических лучей на литиевый препарат прекращается и наблюдается процесс распада образовавшихся нуклидов. Процесс распада нуклидов, возникших под воздействием КЛ во время гамма-анализа препарата фиксировался путем регистрации гамма-излучения от кюветы с исследуемым препаратом. Регистрация электрических импульсов от детектора осуществлялась одноплатным амплитудным анализатором SBS-75 («Грин Стар Инструментс», Россия).

2. Метод идентификации и расчета

Рассмотрим процесс измерения и метод расчёта активности короткоживущих нуклидов в препарате LiAlH_4 массой 5 г, экспонированного в КЛ с 30.11.2018 до 25.12.2018. Продолжительность измерения гамма-спектров задавалась оператором в ручном режиме и при первом измерении составляла 1000 с (живое время). Полученный аппаратный спектр ($\text{Libb46}_1.\text{sps}$) записывался в память анализатора SBS-75. Затем,

не обнуляя набранный спектр, продолжали измерение (посредством «Продолжение набора») ещё 1000 с, записывали второй зарегистрированный за 2000 с спектр ($\text{Libb46}_2.\text{sps}$) и далее продолжали набор третьего спектра $\text{Libb46}_3.\text{sps}$, время регистрации которого составляло 3000 с. В результате подобных процедур получали 5 спектров $\text{Libb46}_1.\text{sps}$, $\text{Libb46}_2.\text{sps}$, $\text{Libb46}_3.\text{sps}$, $\text{Libb46}_4.\text{sps}$ и $\text{Libb46}_5.\text{sps}$, время набора которых составляло 1000, 2000, 3000, 4000 и 5000 с соответственно. На рис. 1, а, представлен фрагмент аппаратного спектра $\text{Libb46}_3.\text{sps}$, зарегистрированного за 3000 с, маркером « » отмечен спектр препарата, набранный за 3000 с (живое время). Подобное изображение спектра появляется на мониторе SBS-75 после выполнения команды «Открыть файл спектра». Здесь же приведен спектр фона (помечен маркером «+»), причём спектр фона изображён после нормировки, т.е. число импульсов фона в каждом канале умножено на величину $T_{\text{п}} / T_{\text{ф}}$, где $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{ф}}$ время набора спектра препарата (в данном случае 3000 с) и время измерения фона (79000 с) соответственно.

Программа изображения аппаратных спектров, зарегистрированных анализатором SBS-75, автоматически проводит нормировку загружаемых спектров фона после команды «Открыть файл "теневого" спектра». Рассмотрение этого рисунка показывает, что число импульсов от препарата заметно превышает нормированное число импульсов фона. Фрагмент того же аппаратного спектра $\text{Libb46}_3.\text{sps}$ (маркер «») отображен на рис. 1, б, но в качестве «теневого» спектра загружен спектр $\text{Libb46}_1.\text{sps}$, зарегистрированный за 1000 с (маркер «»). Если пики в аппаратном спектре обусловлены излучением короткоживущих нуклидов (период полураспада несколько минут), то нормированное число импульсов в соответствующих пиках, зарегистрированных за 1000 с, будет больше, чем в пиках, зарегистрированных за 3000 с (например, пик, соответствующий энергии 483 кэВ).

Амплитуды пиков для долгоживущих нуклидов совпадают, а в случаях, если амплитуда пиков, набранных за 3000 с, превышает амплитуду пиков, которые зарегистрированы за 1000 с (например, пик, соответствующий энергии 502 кэВ), имеет место накопление со временем активности соответствующих нуклидов за счёт распада долгоживущих материнских нуклидов.

Варианты изменения со временем активности дочерних нуклидов в зависимости от соотношения периодов полураспада материнского и дочернего нуклида показаны на рис. 2.

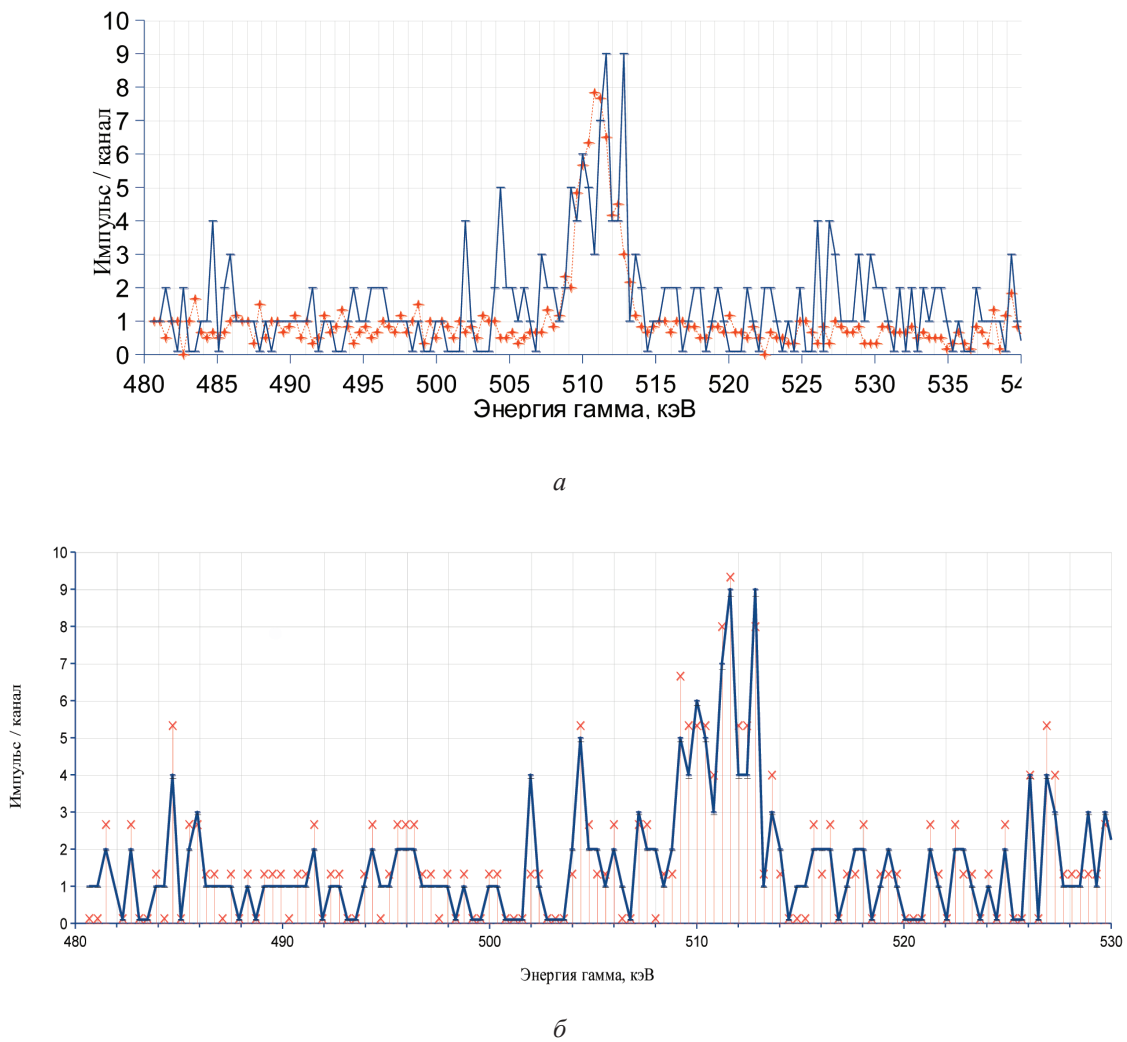


Рис. 1. Фрагменты аппаратного спектра Libb46_3.sps, зарегистрированного за 3000 с; а – в качестве «теневого» спектра загружен спектр фона, который набран за 79000 с; б – в качестве «теневого» спектра загружен спектр Libb46_1.sps, набранный за 1000 с

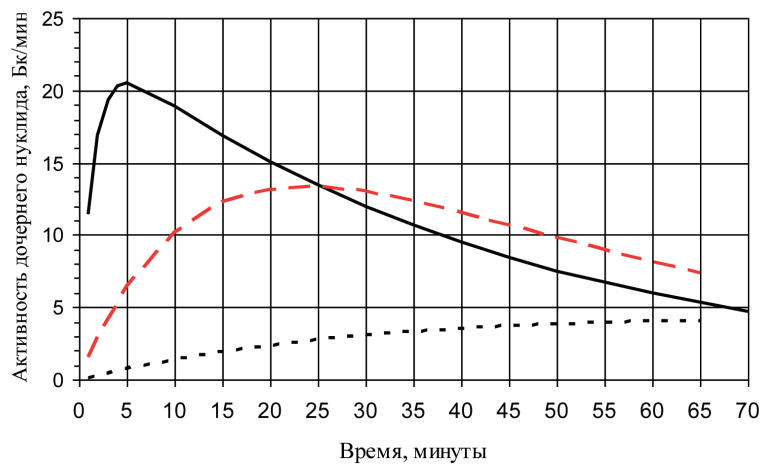


Рис. 2. Варианты изменения активности дочернего радионуклида в зависимости от соотношения периодов полураспада материнского и дочернего нуклида

Для построения этих зависимостей использовалось выражение (1), которое справедливо, если активность дочернего нуклида в начальный момент равна нулю:

$$A_2(t) = \lambda_1 \lambda_2 N_{10} \left[\frac{\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)}{\lambda_2 - \lambda_1} \right], \quad (1)$$

где t – текущее время, мин; $A_2(t)$ – активность дочернего нуклида, Бк/мин;

λ_1 и λ_2 – постоянные распада материнского и дочернего нуклидов соответственно, мин⁻¹;

N_{10} – число ядер материнского нуклида в начальный момент времени ($t = 0$).

При построении всех кривых период полураспада дочернего нуклида составлял 30 мин и $N_{10} = 1000$ ядер, а периоды полураспада материнского нуклида равнялись 1 мин (сплошная линия), 10 мин (штриховая линия) и 100 мин (точечная линия).

При дальнейшем анализе аппаратурных спектров не рассматриваются радионуклиды, активность которых нарастает со временем, а принимаем во внимание нуклиды, распадающиеся по экспоненциальному закону.

Рассчитывая активность короткоживущих нуклидов, следует принять во внимание радиоактивный распад нуклидов, которые присутствуют в измеряемом препарате, во время измерения [9]. Чтобы учесть этот эффект, использовалось выражение

$$A(t_k) = A(t_0) \frac{(1 - \exp(-\lambda \Delta t))}{\lambda \Delta t}, \quad (2)$$

где $A(t_k)$ – активность, зарегистрированная к моменту окончания измерения, Бк;

$A(t_0)$ – активность, соответствующая моменту начала измерений, Бк;

Δt – продолжительность измерения, с;

t_k – время окончания измерения;

t_0 – время начала измерения.

Выражение (2) использовалось для вычисления коэффициента D_{Mi} :

$$D_{Mi} = A(t_k) / A(t_0) = (1 - \exp(-\lambda \Delta t)) / \lambda \Delta t. \quad (3)$$

Расчёт активности нуклидов проводили по формуле

$$A_{0i} = (N_i - N_{Bi}) / (t_i \varepsilon \eta D_{Mi}), \quad (4)$$

где A_{0i} – активность радионуклида, рассчитанная по выбранной гамма-линии на момент начала измерений, Бк;

t_i – длительность экспозиции ($i = 1, 2, 3, 4, 5$; 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 с);

N_i – число импульсов от препарата, зарегистрированных в выбранном пике за время i -й экспозиции;

N_{Bi} – число импульсов фона, зарегистрированных в том же пике и нормиро-

ванное на длительность соответствующей экспозиции;

ε , η – эффективность регистрации и квантовый выход для выбранной гамма-линии соответственно;

D_{Mi} – корректирующий коэффициент, учитывающий распад нуклида в процессе измерения препарата (рассчитан по (3)).

Предлагается использовать следующий порядок идентификации радионуклидов.

В аппаратурном спектре (Libb46_3.sps) выделяем самые интенсивные пики, начиная с пиков, соответствующих гамма-линиям с наибольшими энергиями. Значения энергии этих пиков заносим в первую колонку табл. 1, приведенной в качестве примера. Используя [10], находим нуклиды, испускающие гамма-кванты соответствующей энергии.

Проводим поиск в разделах 1 мин < $T_{0,5}$ < 10 мин и 10 мин < $T_{0,5}$ < 60 мин, причём используем значения энергии $E \pm 0,5$ кэВ и отдаём предпочтение нуклидам с высокими квантовыми выходами. Значения квантового выхода для каждого нуклида также приведены в [10]. Символы обнаруженных нуклидов-«кандидатов» записываем во вторую колонку табл. 1.

Затем с помощью базы данных [11] находим и заносим во вторую колонку табл. 1 для каждого нуклида – «кандидата» данные по характерным гамма-линиям и соответствующие квантовые выходы. При этом учитываем только линии с выходом свыше 10%. Далее следует проанализировать с помощью [12] изобарные цепочки выбранных нуклидов, т.е. цепочки нуклидов с одинаковыми массовыми числами, и исключить из рассмотрения «кандидата», если он имеет предшественника в цепочке с достаточно большим периодом полураспада (минуты). В табл. 1 следует исключить из рассмотрения Ag-101, который имеет предшественника Cd-101 с периодом полураспада 1,2 мин, а также Sb-116 – предшественник Te-116 ($T_{0,5} = 2,5$ часа) и Pr-135 (предшественник Nd-135 с $T_{0,5} = 12$ мин).

Поочередно рассматриваем изображение аппаратурных спектров Libb46_1.sps ... Libb46_5.sps на мониторе SBS-75 и находим число импульсов от препарата и нормированное число импульсов фона в пиках, принадлежащих выбранному нуклиду. Найденные значения заносим в приведённую в качестве

примера табл. 2. Дополнительно сюда же вносим значения $\varepsilon(E)$ для каждой гамма-линии, полученные при калибровке гамма-спектрометра, и величины $D_M(t, \lambda_i)$, рассчитанные по формуле (3) для каждой i -й экспозиции и соответствующего периода полураспада. При расчете активности нуклидов не принимаем во внимание аппаратные пики, в которых превышение числа

импульсов над фоном меньше критерия значимости [9] $(N_i - N_{Bi}) < 1,64N_{Bi}^{0,5}$. Для ^{131}Sb после подсчета по формуле (4) в последней колонке табл. 2 получаем близкие значения $A_0(t)$, что свидетельствует о хорошем совпадении табличного [11] и фактически зарегистрированного периодов полураспада ^{131}Sb . Аналогичные расчёты выполнены для ^{146}Ce .

Таблица 1

Идентификация радионуклидов по энергии гамма-линий аппаратурных спектров

Энергия зарегистрированной гамма-линии, кэВ	Радионуклиды, которые испускают гамма-кванты соответствующей энергии. Для этих нуклидов приведены периоды полураспада, квантовые выходы гамма-линий (интенсивность переходов)
1098	Sn-109(40%) In-116m(50%) Sn-109, $T_{0,5} = 18,0$ мин; ε 100% \rightarrow In-109 $T_{0,5} = 4,3$ час. γ Sn-109; 331,2(0,094) 649,8(0,296) 1099,2(0,293) 1321,3(0,115) In-116m, $T_{0,5} = 54,29$ мин; β^- 100% \rightarrow Sn-116 stab γ In-116m; 416,9(0,272) 818,7(0,121) 1097,3(0,585) 1093,6(0,848) 1507,6(0,10)
943	Eu-158(30%) Sb-131(47%) Eu-158, $T_{0,5} = 45,9$ мин; β^- 100% \rightarrow Gd-158 stab γ Eu-158; 897,6(0,124) 944,2(0,30) 977,1(0,163) Sb-131, $T_{0,5} = 23,03$ мин; β^- 100% \rightarrow Te-131 $T_{0,5} = 25$ мин γ Sb-131; 642,3(0,24) 933,1(0,264) 943,4(0,471) 1123,6(0,089)
933	Ag-101(24%) Sb-131(26%) Sb-116(23%) Pr-135(2%) Ag-101, $T_{0,5} = 11,1$ мин; ε 100% \rightarrow Pd-101 $T_{0,5} = 8,5$ час. γ Ag-101; 261,0(0,526) 588,0(0,10) 932(0,236)* 1173,9(0,089) Sb-116, $T_{0,5} = 15,8$ мин; ε 100% \rightarrow Sn-116 stab. γ Sb-116; 931,8(0,248) 1293,6(0,85)
832	Ag-99(13%) Nb-98m(10%) Pb-211(3%) Re-179(2%) Ag-99, $T_{0,5} = 2,07$ мин; ε 100% \rightarrow Pd-99 $T_{0,5} = 21,4$ мин γ Ag-99; 264,5(0,63) 805,6(0,122) 832,3(0,131) Nb-98m, $T_{0,5} = 51,3$ мин; β^- 99,9% \rightarrow Mo-98 stab. γ Nb-98m; 713,8(0,092) 722,6(0,738) 787,4(0,934) 833,6(0,108) 1168,8(0,178)

Таблица 2

Расчёт активности ^{131}Sb и ^{146}Ce по результатам разных экспозиций

Нуклид Sb-131	E_γ , кэВ	Экспозиция, с	Число импульсов		η	$\varepsilon(E)$	$A_{i,0}$, Бк	Корр. D_M коэф.	$A_{0,0}$, Бк		
			Препарат	Фон							
$T_{0,5}$, минуты 23,03	933,1	1000	0	0	0,264	0,0223	–	0,786	–		
		2000	2	0	0,264	0,0223	0,17	0,631	0,27		
		3000	3	0	0,264	0,0223	0,17	0,517	0,33		
		4000	4	2			<< *	0,431	–		
		5000	5	2	0,264	0,0223	0,10	0,366	0,28		
		Среднее значение $A_{0,0}$, Бк								0,29	
Нуклид Sb-131	E_γ , кэВ	Экспозиция, с	Число импульсов		η	$\varepsilon(E)$	$A_{i,0}$, Бк	Корр. D_M коэф.	$A_{0,0}$, Бк		
			Препарат	Фон							
		$T_{0,5}$, минуты 23,03	943,4	1000	2	0	0,471	0,0221	0,19	0,786	0,24
				2000	3	0			0,14	0,631	0,23
				3000	4	0			0,13	0,517	0,25
				4000	4	1			0,072	0,431	0,17
5000	4			1			0,058	0,366	0,16		
Среднее значение $A_{0,0}$, Бк								0,21			

Окончание табл. 2

Нуклид	E _γ , кэВ	Экспозиция, с	Препарат		Фон	η	ε(E)	A _γ , Бк	Корр. D _М коэф.	A _γ , Бк
			Препарат	Фон						
Ce-146 T _{0,5} , минуты 13,49	218,2	1000	2	1	0,195	0,0618	0,083	0,672	0,479	0,12
		2000	3	2			<< *			–
		3000	5	2	0,195	0,0618	0,083	0,359	0,23	
		4000	6	3	0,195	0,0618	0,062	0,282	0,22	
		5000	6	4			<<	0,230	–	
		Среднее значение A ₀								
Нуклид	E _γ , кэВ	Экспозиция, с	Число импульсов		η	ε(E)	A _γ , Бк	Корр. D _М коэф.	A _γ , Бк	
			Препарат	Фон						
Ce-146 T _{0,5} , минуты 13,49	316,7	1000	1	0	0,553	0,050	0,036	0,672	0,054	
		2000	2	1			0,018	0,479	0,038	
		3000	2	1			0,012	0,359	0,034	
		4000	6	4			<<	0,282	–	
		5000	7	4			<<	0,230	–	
		Среднее значение A _γ , Бк								

<< * – меньше критерия значимости $(N_i - N_{Bi}) < 1, 64 \cdot N_{Bi}^{0.5}$.

3. Учёт влияния эффекта Комптона и импульсов от тормозного излучения бета-частиц

Необходимым условием надёжной идентификации радионуклида в процессе гамма-анализа является совпадение значений, полученных в результате расчета активности по разным гамма-линиям. Расчёты активности ¹³¹Sb, ¹⁴⁶Ce, а также расчёты активности других нуклидов показали, что для каждого нуклида активности, определённые по гамма-линиям с малыми квантовыми выходами, существенно превышают активности, которые рассчитаны по линиям с большим выходом. Из табл. 2 видно, что активность ¹³¹Sb, рассчитанная по линии 933 с выходом 0,264, превышает активность, рассчитанную по линии 943 с выходом 0,471, примерно на 40%. Активность ¹⁴⁶Ce, рассчитанная по линии с квантовым выходом 0,553, в 4,5 раза превышает активность этого нуклида, определённую по γ-линии с выходом 0,195, т.е. расхождения в величине активности пропорциональны отношениям выходов соответствующих γ-линии. Это расхождение обусловлено наличием непрерывно распределённых по спектру импульсов от тормозного излучения высокоэнергетических бета-частиц и комптоновского распределения, обусловленного гамма-квантами высоких энергий. Расчёт по соотношению, приведённому в [9] для края комптоновского распределения, показывает, что дополнительный вклад в фон для γ-линии ¹³¹Sb 934 кэВ дают γ-кванты, энергия которых превышает

ет 1143 кэВ, а для линии ¹⁴⁶Ce 218 кэВ этот вклад вносят γ-кванты с энергиями, превышающими 370 кэВ. Следовательно, влияние эффекта Комптона наиболее существенно для нуклидов, излучающих γ-кванты низких энергий. Зависимость фактического увеличения фона из-за эффекта Комптона и импульсов тормозного излучения бета-частиц к числу видимых фоновых отсчётов от энергии гамма-линии, которая рассчитана для анализируемого аппаратурного спектра (Libb46_*.sps), представлена на рис. 3.

Практическая гамма-спектрометрия, как правило, имеет дело с аппаратурными спектрами, в которых пики полного поглощения содержат большое количество импульсов (хорошая статистика), а импульсы от комптоновских и тормозных электронов увеличивают подставку (пьедестал) под пиками полного поглощения. Поэтому такие импульсы следует учитывать только при расчётах минимально детектируемой активности [9]. Аппаратурные спектры, которые рассматриваются в данной работе, содержат множество пиков малой интенсивности (плохая статистика), причём импульсы регистрируются в одном и, реже, в двух каналах (рис. 1). Существенные расхождения результатов вычисления активности нуклидов по линиям с различными квантовыми выходами показывают необходимость учитывать вклад импульсов от тормозного излучения и комптоновских импульсов при γ-анализе препаратов после воздействия на них КЛ.

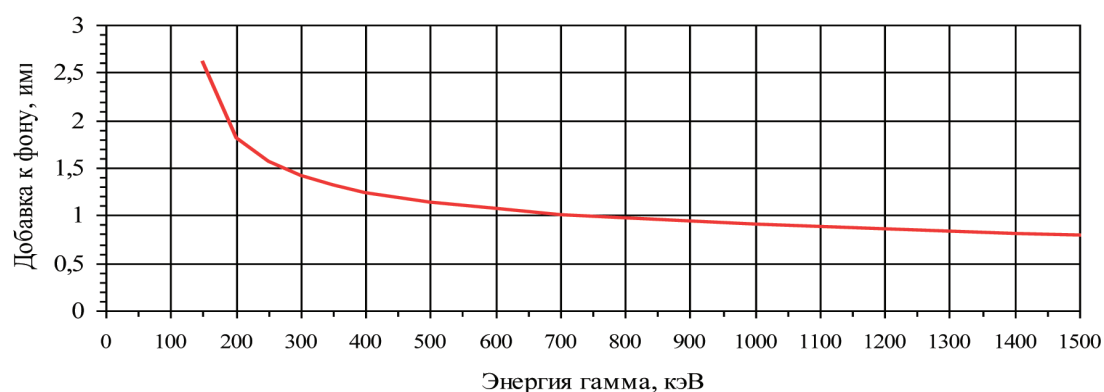


Рис. 3. Зависимость добавки из-за эффекта Комптона и тормозного излучения высокоэнергичных бета-частиц к числу фоновых отсчётов от энергии анализируемого пика

Метод учёта влияния вышеприведенных эффектов увеличения фона за счет комптоновских электронов на результаты расчёта активности нуклидов демонстрируется с помощью табл. 3.

Для линии 933 кэВ находим откорректированное число импульсов

$$(N_i - N_{B_i}) / [A_0(933) / A_0(943)] \quad (5)$$

и, используя значения (5) в числителе выражения (4), рассчитываем исправленные величины $A_0(933)$. Далее для каждой экспози-

ции вычисляем число импульсов, которые дополнительно увеличивают фон за счёт эффекта Комптона (при энергии 933 кэВ)

$$(N_i - N_{B_i}) - (N_i - N_{B_i}) / [A_0(933) / A_0(943)]. \quad (6)$$

Затем рассчитываем скорректированное значение активности ^{131}Sb по гамма-линии 943 с учётом добавки к фону. Сравнив полученные в табл. 3 усреднённые значения $A_0(933)$ и $A_0(943)$, видим, что расхождения между ними не превышают 19% (без проведенной коррекции величина расхождения составляла 40%).

Таблица 3

Расчёт активности с учётом увеличения фона за счёт комптоновских импульсов

Нуклид Sb-131	E_γ , кэВ	Экспозиция, с	Число импульсов		η	$\varepsilon(E)$	A_p , Бк	Корр. коэф. D_M	A_0 , Бк
			Исправленное число импульсов	Добавка к фону					
$T_{0,5}$, минуты 23,03	933,1	1000	0	0	0,264	0,0223	—	0,786	—
		2000	1,4	0,6			0,12	0,631	0,19
		3000	2,2	0,6			0,12	0,517	0,24
		4000	1,4	0,6			0,059	0,431	0,14
		5000	2,2	0,8			0,075	0,366	0,20
		Среднее значение A_0 , Бк							
Нуклид Sb-131	E_γ , кэВ	Экспозиция, с	Число импульсов		η	$\varepsilon(E)$	A_p , Бк	Корр. коэф. D_M	A_0 , Бк
			Препарат.	Фон + добавка к фону					
$T_{0,5}$, минуты 23,03	943,4	1000	2	0+0,6	0,471	0,0221	0,13	0,786	0,17
		2000	3	0+0,6			0,12	0,631	0,18
		3000	4	0+0,6			0,11	0,517	0,21
		4000	4	1+0,6			0,058	0,431	0,13
		5000	4	1+0,8			0,042	0,366	0,12
		Среднее значение A_0 , Бк							

Окончание табл. 3

Нуклид	E_γ , кэВ	Экспозиция, с	Число импульсов		η	$\varepsilon(E)$	$A_{\gamma, \text{Бк}}$	Корр. коэф. D_M	$A_{0, \text{Бк}}$		
			Исправленное число импульсов	Добавка к фону							
Ce-146 $T_{0,5}$, минуты 13,49	218,2		1000	0,22	0,78	0,195	0,0618	0,018	0,672	0,027	
			2000	0,22	0,78			0,0091	0,479	0,019	
			3000	0,66	2,34			0,018	0,359	0,051	
			4000	0,66	2,34			0,014	0,282	0,049	
			5000	0,44	1,56			0,0073	0,230	0,032	
			Среднее значение $A_{0, \text{Бк}}$								0,036
Нуклид	E_γ , кэВ	Экспозиция, с	Число импульсов		η	$\varepsilon(E)$	$A_{\gamma, \text{Бк}}$	Корр. коэф. D_M	$A_{0, \text{Бк}}$		
			Препарат	Фон + добавка к фону							
Ce-146 $T_{0,5}$, минуты 13,49	316,7		1000	1	0 + 0,78	0,553	0,050	0,008	0,672	0,012	
			2000	2	1 + 0,78			0,004	0,479	0,008	
			3000	2	1 + 2,34			–	0,359	–	
			4000	6	4 + 2,34			–	0,282	–	
			5000	7	4 + 1,56			0,01	0,230	0,045	
			Среднее значение $A_{0, \text{Бк}}$								0,02

Таблица 4

Активность нуклидов, обнаруженных при γ -анализе препарата LiAlH_4

Нуклид	Тип распада	Период полураспада, минуты	Энергия используемой гамма-линии, кэВ	Квантовый выход	Активность, Бк
K-44	β 100% *	22,13	1157,0 1126,1	0,58 0,076	0,1
Y-94	β 100%	18,7	918,7	0,56	0,15
Ag-99	ε 100% **	2,07	264,5 832,3	0,63 0,131	0,3
Sb-131	β 100%	23,03	933,1 943,4	0,264 0,471	0,16
Tm-176	β 100%	1,9	1069,3 381,8	0,34 0,22	2,0

* – бета-распад; ** – К захват.

Используя данный метод коррекции активности для ^{146}Ce , следует учитывать, что добавка к фону за счёт эффекта Комптона для гамма-линии 317 кэВ меньше (рис. 3), чем рассчитанная добавка для линии 218 кэВ, поэтому полученное значение активности ^{146}Ce в нашем случае – 0,02 Бк нами занижается.

В табл. 4 приведены значения активности (на момент начала измерений) для пяти идентифицированных нуклидов.

Описанный метод идентификации короткоживущих нуклидов при обработке аппаратных спектров, для которых характерно наличие множества пиков низкой интенсивности, использовался нами и при идентификации и расчёте активности

нуклидов, образующихся при работе теплогенератора А. Росси [13, 14].

Заключение

В работе описаны методические особенности и практическое применение предлагаемого авторами способа идентификации и расчета активности короткоживущих гамма-излучателей. С помощью приведенного метода выполнены идентификация и оценка активности более 10 радионуклидов, образовавшихся в результате действия космических лучей в препарате лития в условиях низкой активности гамма-излучателей. Установлено завышение активности исследуемых гамма-излучателей по причине влияния комптоновских электронов от вы-

сокоэнергетичных гамма-квантов, а также непрерывно распределённых по спектру импульсов от тормозного излучения бета-излучателей с большой граничной энергией. Предложен метод коррекции расчётного значения активности.

Авторы выражают благодарность С.В. Наумову за помощь в работе.

Список литературы

1. Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях. IAEA-TECDOC-1092/R. IAEA, Vienna, 2002. 322 p. [Electronic resource]. URL: http://www.feerc.ru/radsafety/archive/PDF_archive/radmonitdocs/rad_acc_docs/IAEA_docs/1092IAEA.pdf (11.06.2021).
2. Мониторинг окружающей среды и источников для целей радиационной защиты: серия норм безопасности МАГАТЭ № RS-G-1.8. IAEA, Vienna, 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216r_web.pdf (дата обращения 11.06.2021).
3. Radiological Laboratory Sample Analysis Guide for Incident Response – Radionuclides in Soil. EPA 402-R-12-006. September 2012 Revision 0. 114 p. [Electronic resource]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-12-006_soil_guide_sept_2012.pdf (date of access: 11.06.2021).
4. Hamidatou L., Slamene H., Dbacha B., Ait-ziane M., Badreddine A., Benaskeur N., Benkharfia H., Alliti M., Attari K., Hachouf M., Djebli K., Lounis-Mokrani Z. Experimental Determination and Simulation of Neutron and Gamma Flux Parameters in Horizontal Channel for Prompt Gamma Neutron Activation Analysis Implementation at Es-Salam Research Reactor. Applied Radiation and Isotopes. 2021. 174. 109759. P. 1–9.
5. Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозорова И.В., Кожаханов С.Б. Экспериментальное определение чувствительности метода инструментального нейтронно-активационного анализа с использованием импульсного графитового реактора игр // Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии. 2014. Т. 325. № 3. С. 7–11.
6. Алексеев В.А., Лаубенштейн М., Повинец П.П., Устинова Г.К. Космогенные радионуклиды в метеоритах и солнечная модуляция галактических космических лучей во внутренней гелиосфере // Астрономический вестник. 2019. Т. 53. № 2. С. 106–124.
7. Wasserburg G.J., Busso M., Gallino R., Nollett K.M. Short-lived Nuclei in the Early Solar System: Possible AGB Sources. [Electronic resource]. URL: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0602551.pdf> (date of access 22.06.2021).
8. Епифанова И.Э., Тертышник Э.Г. Исследование образования радионуклидов в препарате лития под воздействием космических лучей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 6. С. 48–152.
9. Gordon R. Gilmore. Practical Gamma-ray Spectrometry. 2nd Edition. John Wiley&Sons Ltd, 2008. 408 p. [Electronic resource]. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Practical+Gamma+ray+Spectroscopy+%2C+2nd+Edition-p-9780470861967/> (date of access: 11.04.2021).
10. Дорошенко Г.Г., Шлягин К.Н. Справочник по идентификации гамма-излучающих нуклидов. М.: Атомиздат, 1980. 144 с.
11. National Nuclear Data Center [Electronic resource]. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> (date of access: 11.06.2021).
12. Гусев Н.Г., Дмитриев П.П. Радиоактивные цепочки: Справочник. М.: Атомиздат, 1978. 88 с.
13. Тертышник Э.Г., Епифанов А.О., Епифанова И.Э. Анализ некоторых аспектов испытаний теплогенератора России: материалы 39 Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы науки». Уфа: АЭТЕРНА, 2018. С. 204–209.
14. Епифанов А.О., Епифанова И.Э. Анализ некоторых аспектов функционирования теплогенератора России // II Международная (XV Региональная) научная конференция «Техногенные системы и экологический риск» (тезисы докладов). Под общ. ред. А.А. Удаловой Обнинск, 2018. С. 13–15.