

Barbara RABSZTYN
Edward KWAŚNIEWICZ
Andrzej ZASTAWNY

BADANIA ZŁOŻONEGO SPEKTROMETRU GAMMA
GO POMIARU KONCENTRACJI RADIOAKTYWNYCH
PIERWIASTKÓW W MATERIAŁACH

Streszczenie. Wykonano porównawcze pomiary widm złożonym scyntylacyjnym spektrometrem gamma w reżimie koincydencji sum i sumacyjnym. Wyznaczono względne wydajności pomiarów i przedyskutowano efektywność metody do pomiarów koncentracji toru, uranu i potasu w materiałach.

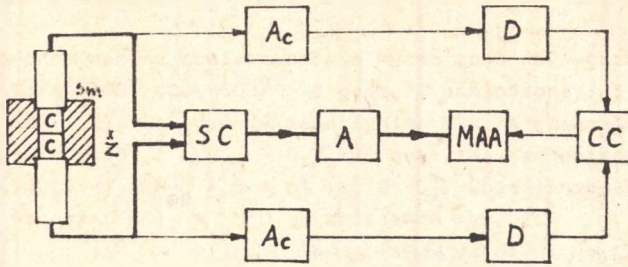
POMIARY

Podjęto badania przydatności sumacyjnego komptonowskiego spektrometru (SCS) [1, 2, 3] do pomiarów koncentracji rodzin toru 232, uranu 238 oraz potasu 40 w surowcach naturalnych i wtórnych (popioły i żużle) dla celów budownictwa. Liczono się z możliwością poprawienia efektywności detekcji w stosunku do konwencjonalnych układów z uwagi na istotną redukcję tła komptonowskiego.

Badaniom poddano układ sond dostępnych na rynku krajowym o wymiarach kryształów ϕ 40 x 25 mm. Wybrana geometria detektorów i układ blokowy rejestracji są pokazane na rys. 1. Założono, że sproszkowana próbka Sm w naczyniu cylindrycznym pierścieniowym będzie otaczać kryształy sond jak na rysunku.

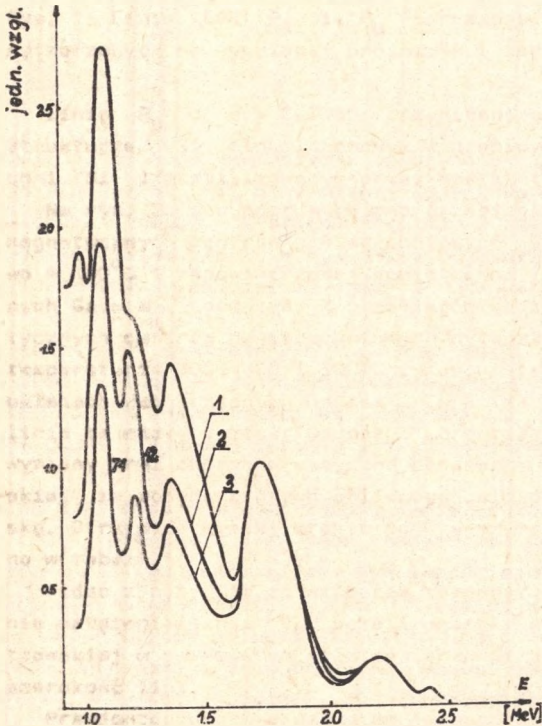
Do badania układu używano silniejszych źródeł radioizotopowych Z umieszczonych z boku. Impulsy z obu detektorów, sumowanie w układzie SC i wzmacniane, są rejestrowane w wielokanałowym analizatorze amplitud impulsów. Pomiary wykonano w reżimie sumacyjnym (S) lub koincydencji sum (C-S).

W pierwszym przypadku rejestrowano wszystkie impulsy dochodzące do analizatora. W drugim tylko impulsy będące w koincydencji z impulsami sterowania formowanymi w układzie koincydencji CC. Impulsy sterowania występowały w przypadkach, gdy zachodziła jednoczesna detekcja w obu detektorach i amplitudy impulsów były większe od progów określonych przez wzmacniacze AC i dyskryminatory D w obwodzie sterowania. Progi dyskryminacji w obu gałęziach obwodu sterowania odpowiadały równym energiom progowym E_g . Dokładność określenia energii progów była 10%. Stabilność syme-



Rys. 1. Układ pomiarowy pracujący:

a) w reżimie sumacyjnym (linia pogrubiona), b) w reżimie koincydencji - sum. - (cały schemat), Sm - próbka mierzona, Z - źródło radioizotopowe, C - detektory, A - wzmacniacz impulsowy, AC - wzmacniacz impulsowy w obwodzie sterowania, D - dyskryminator progu, SC - układ sumacyjny, CC - układ koincydencji, MAA - wielokanałowy analizator amplitud impulsów



Rys. 2. Pomierzone widma Ra - 226:

1 - widmo otrzymane w wariancie sumacyjnym (S), 2 - w wariancie koincydencji - sum (CS) przy energii progu 100 keV, 3 - w wariancie (CS) przy energii progu 400 keV, unormowane do wartości w pikie 1765 keV

tryzacji obu detektorów była 1-2 kanały na 128 kanałów całego analizatora. Do pomiarów kalibrujących stosowano linie energetyczne 60 keV Am-241, 356 keV Ba-133, 661 keV Cs-137, 1117 keV i 1330 keV Co-60.

Pomiary wykonano dla radioizotopów K-40, Ra-226, Th-232 przy energiach progowych E_s równych 25, 50, 100, 200, 400 keV. Dla przykładu, na rys. 2 są pokazane pomierzone widma najbardziej złożonego przypadku, tj. Ra-226. Na rysunku widma Ra-226 unormowano względem pikę linii 1765 keV. Ponieważ wydajność detekcji malała dla kolejnych krzywych, podano liczby przy wykresach widm mówiące, ile razy wydajność detekcji dla unormowanego pikę jest mniejsza od wariantu (S). Natomiast w tab. 1 podane są wydajności w odniesieniu do

Tablica 1

Wydażność detekcji w wariancie (SC)
dla linii 1460 keV potasu, 1765 keV radu i 2615 keV toru

E_s keV	(S)	25	50	100	200	400
K	1	0,065	0,07	0,068	0,054	0,014
Ra	1	0,103	0,095	0,085	0,065	0,0135
T	1	0,121	0,112	0,102	0,097	0,051

wybranych linii energetycznych, dla wszystkich trzech widm unormowane do wariantu (S).

Pobieżna jakościowa analiza widm pozwala stwierdzić, że w reżimie (CS) tło komptonowskie jest więcej stłumione od linii energetycznych, widmo staje się tym samym wyraźniejsze. W szczególności rysują się wyraźnie piki, które w wariancie (S) zlewają się z tłem komptonowskim. Równocześnie silnie zmniejsza się wydajność detekcji. Dlatego dopiero ilościowa analiza, odniesiona do konkretnego przypadku, pozwala określić optymalny wariant pomiarowy.

DYSKUSJA

Dane dotyczące widm promieni gamma interesujących rodzin promieniotwórczych i potasu -40 są przedstawione w tab. 2. Przyjęto, że koncentracje toru, uranu i potasu będą określone z pomiarów szybkości zliczeń w trzech kanałach energetycznych T, R i K, odpowiadających odpowiednio liniom toru 2615 keV, radu 1765 keV i potasu 1460 keV.

Oznaczając przez N i B z indeksami T, R, K szybkości zliczeń całkowite i tła w odpowiednich kanałach oraz przez S z indeksami T, R, K efekt netto toru, radu i potasu można na podstawie widm promieniowania gamma napisać:

$$S_T = N_T - B_T,$$

$$S_R = N_R - B_R - b_{RT}S_T, \quad (1)$$

$$S_K = N_K - B_K - b_{KT}S_T - b_{KR}S_R.$$

Wyraz $b_{ij}S_j$ określa tło komptonowskie w kanale i od pierwiastka j , który w swoim widmie gamma zawiera linie o energiach wyższych od kanału i . Wartości wyznaczonych z pomiarów współczynników b są przedstawione w tab. 3.

Tablica 2

Widma linii gamma o intensywnościach większych od 10%
rozpad rodzin toru i uranu oraz izotopu K-40 [4]

(Przynależność do rodziny jest zaznaczona literą Th lub U w nawiasie)

Energia (keV)	Intensywność %	Radionuklid
2615	33,7	Tl ²⁰⁸ (Th)
1765	16	Bi ²¹⁴ (U)
1460	11	K ⁴⁰
1120	16	Bi ²¹⁴ (U)
960	20	Ac ²²⁸ (Th)
908	25	Ac ²²⁸ (Th)
877	14	Pa ²³⁴ (U)
609	47	Bi ²¹⁴ (U)
583	29	Tl ²⁰⁸ (Th)
352	33,7	Pb ²¹⁴ (U)
285	18,9	Pb ²¹⁴ (U)
242	12	Pb ²¹⁴ (U)
239	47	Pb ²¹² (Th)
225	13	U ²²⁸

Tablica 3

Wyliczone wartości współczynników b dla (S)
oraz (SC) przy różnych energiach dyskryminacji

E (keV)	S	25	50	100	200	400
b _{RT}	2,4	1,04	0,94	0,97	0,91	0,81
b _{KT}	2,6	1,13	1,1	1,25	1,21	0,97
b _{KR}	1,5	1,13	1,1	1,05	1,08	0,91

Jako miarę M efektywności wariantu (CS) względem (S) przyjęto stosunki kwadratów względnych odchyłek standardowych pomiarów wykonanych w układzie (S) i (CS) przy tym samym czasie pomiaru,

$$M = \frac{S^2}{S^2} \frac{Q^2}{Q^2} \quad (2)$$

We wzorze wielkości Q określają odchyłki standardowe. Indeks "o" oznaczono wartości dla wariantu (S), bez indeksu dla (CS).

Idealizując rozkład prawdopodobieństwa zliczeń rozkładem Poissona otrzymuje się:

$$Q_T^2 = S_T + 2B_T,$$

$$Q_R^2 = N_R + B_R + b_{RT}^2 Q_T^2, \quad (3)$$

$$Q_K^2 = N_K + B_K + b_{KT}^2 Q_T^2 + b_{KR}^2 Q_R^2,$$

Dalsze rozważania ograniczono do jednego dosyć prawdopodobnego przypadku, określonego dwoma przybliżeniami:

1. Wartości tła są wyraźnie mniejsze od mierzonych efektów, tj.:

$$B \ll S.$$

2. Mierzone efekty od wszystkich trzech radioizotopów są tego samego rzędu, tj. w przybliżeniu:

$$\frac{S_i}{S_j} \approx 1.$$

Wyrażenia na M są wtedy następujące:

$$M_T = \frac{S_T}{S_T^0},$$

$$M_R = \frac{S_R}{S_R^0} \frac{1 + b_{RT}^0 + b_{RT}^{02}}{1 + b_{RT}^2 + b_{RT}^2}, \quad (4)$$

$$M_K = \frac{S_K}{S_K^0} \frac{1 + b_{KT}^0 + b_{KT}^{02} + b_{KR}^0 + b_{KR}^{02}(1 + b_{RT}^0 + b_{RT}^{02})}{1 + b_{KT}^2 + b_{KT}^2 + b_{KR}^2 + b_{KR}^2(1 + b_{RT}^2 + b_{RT}^2)}$$

Stosunki S/S_0 są zawarte bezpośrednio w tab. 1. Wyliczone wartości M przedstawiono w tab. 4.

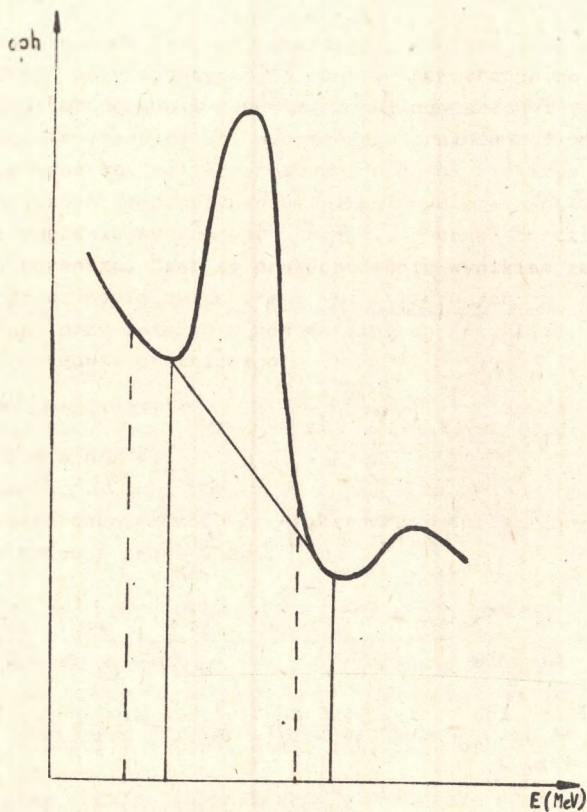
Przy dokładniejszym oszacowaniu efektywności należy uwzględnić dodatkowe błędy pomiarów powodowane przypadkowymi przesunięciami okienek kanałów energetycznych. Przesunięcia te są powodowane głównie fluktuacjami wysokiego napięcia fotopowielaczy i wzmocnienia elektroniki.

Jeżeli założyć się, że okno energetyczne obejmuje cały interesujący pik, to małe przesunięcie okna nie spowoduje zmiany w szybkości zliczeń od piktu właściwego, natomiast wyraźnie może zmienić szybkość zliczeń od tła komptonowskiego, jeżeli nachylenie widma tła jest duże - rys. 3.

Tablica 4

Wartości M dla różnych energii dyskryminacji w wariancie (CS)

E (keV)	M_T	M_R	M_K
25	0,121	0,285	0,23
50	0,112	0,31	0,28
100	0,102	0,27	0,25
200	0,037	0,21	0,2
400	0,051	0,046	0,08



Rys. 3. Zmiany szybkości zliczeń od tła komptonowskiego przy przesunięciu okna energetycznego

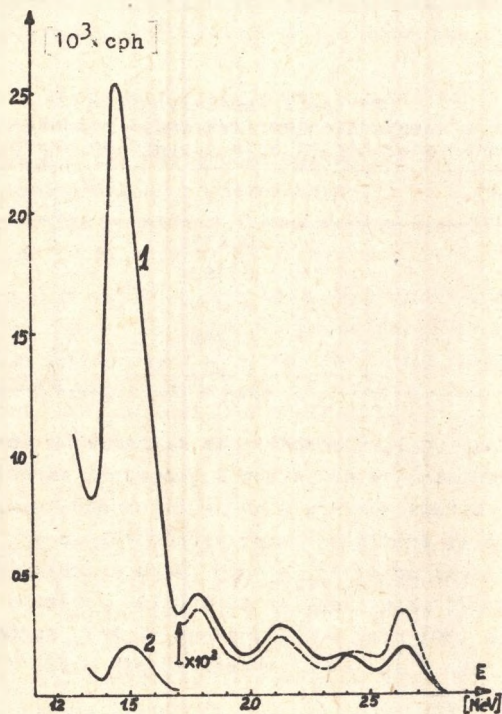
W przyjętej analizie ilościowej fluktuacje te można uwzględnić, wprowadzając odchylenia standardowe Δb współczynników b .

W tab. 5 są obliczone wartości Δb , odpowiadające fluktuacjom okienka energetycznego na jeden kanał analizatora. Wzory na współczynniki M radu i potasu są wtedy następujące:

Tablica 5

Wartości b dla obu wariantów i różnych energii dyskryminacji na jeden kanał analizatora

E (keV)	S	25	50	100	200	400
b_{RT}	0,07	0,03	0,035	0,049	0,09	0,09
b_{KT}	0,081	0,028	0,028	0,062	0,05	0,075
b_{KR}	0,135	0,068	0,066	0,063	0,065	0,046



Rys. 4. Pomierzone widma wzorca (Ra + Th + K):

1 - widmo otrzymane w wariancie sumacyjnym (S), 2 - w wariancie koincydencji - sum (CS) przy energii progu 40 keV (od 1,7 MeV skala rzędnych dla wykresu 2 jest w jednostkach 10^2 cph)

$$M_R = \frac{S_R}{S_R^0} \frac{1 + b_{RT}^0 + b_{RT}^{02} + S_T^0 b_{RT}^{02}}{1 + b_{RT} + b_{RT}^2 + S_T b_{RT}^2} \quad (5a)$$

$$M_K = \frac{S_K}{S_K^0} \frac{1 + (b_{KT}^0 + b_{KR}^0) + (b_{KT}^0 - b_{RT}^0 b_{KR}^0)^2 + b_{KR}^{02} + S_T^0 b_{RT}^{02} + S_T^0 (b_{RT}^0 - 1) b_{KR}^{02} + b_{KR}^{02} S_T^0 b_{RT}^0}{1 + (b_{KT} + b_{KR}) + (b_{KT} - b_{RT} b_{KR})^2 + b_{KR}^2 + S_T b_{RT}^2 + S_T (b_{RT} - 1) b_{KR}^2 + b_{KR}^2 S_T b_{RT}} \quad (5b)$$

Wyliczone wartości przedstawiono w tab. 6.

Tablica 6

Wartości współczynników M
obliczone z uwzględnieniem fluktuacji okienka energetycznego
o jeden kanał analizatora w zależności od energii dyskryminacji

E (keV)	M_R	M_K
25	0,433	0,53
50	0,463	0,65
100	0,393	0,56
200	0,286	0,429
400	0,062	0,16

Przeprowadzona analiza dowodzi, że do pomiarów koncentracji toru, radu i potasu w materiałach w warunkach i geometrii określonej w pracy bardziej efektywna jest metoda pomiaru w wariancie sumacyjnym. Choć badania wykonano w geometrii źródło-detektor trochę różniące się od przewidywanej dla próbek, wnioski pozostają w mocy. Jako przykład argumentujący w przybliżeniu słuszność ostatniego stwierdzenia, pokazano na rys. 4 widmo w wariancie (S) i (SC) przy energii progu 40 keV, spreparowanego wzorca mieszaniny toru, radu i potasu o koncentracjach około 20 razy większych od średniej litosfery.

LITERATURA

- [1] Hick H., Pepelnik R.: Nucl. Instr. and Meth., 68, 240, 1969.
- [2] Ivanov V.B., Shipilov V.I.: Nucl. Instr. and Meth., 129, 313, 1974.
- [3] Palms J.M., Wood R.E., Puckett O.H.: Trans. Nucl. Sci. NS-19, 1, 184, 1972.
- [4] Bobrov V.A., Kriendielev F.P., Hofman A.M.: Gamma spektrometryczeskij analiz w kamere nizmowo fona, Novosibirsk, Nauka, 1975.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОГО ГАММА СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВЕЩЕСТВАХ

Р е з ю м е

Произведено сравнительные измерения гамма спектров сложного сцинтилляционного спектрометра в режиме суммарных совпадений и суммарным. Определены относительные коэффициенты производительности и продискутировано коэффициент эффективности с точки зрения измерения концентрации тория, урана и калия в веществах.

STUDY OF THE GAMMA - RAY SPECTROMETER FOR MEASUREMENTS
OF THE RADIONUCLIDE CONCENTRATION IN THE MATERIALS

S u m m a r y

A complex scintillation gamma spectrometer has been examined in the sum coincidence and sum mode. The relative count rates have been measured and efficiencies of the measurements of thorium, uranium and potassium concentration in materials were discussed.