

PACS: 87.53.Bn

RESEARCH AND SELECTION OF PROSPECTIVE MATERIALS FOR ACTIVATION DOSIMETRY OF INTENSE BREMSSTRAHLUNG RADIATION

 Olexii S. Deiev,  Roman M. Dronov, Valentyn A. Shevchenko,  Boris I. Shramenko*

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology" Kharkiv, Ukraine

*Corresponding Author: bshram@kipt.kharkov.ua

Received August 4, 2020; revised October 6, 2020; accepted November 2, 2020

Radiation technologies based on the use of powerful electron beams and gamma radiation are closely related to the need for dosimetry of these beams. Dosimetry based on the use of the inelastic gamma-ray scattering reaction on a number of nuclei with the formation of isomers with different half-lives and energies of radiation quanta is very successful for these purposes. An example of this application in dosimetry is the $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ reaction, which results in the formation of the $^{115\text{m}}\text{In}$ isomer, having a gamma line with an energy of 336.24 keV and a half-life of 4.5 hours. There was a successful application of this technique in dosimetry in solving certain practical problems (irradiation complexes based on ^{60}Co source- cobalt "guns"). In this work, it is shown that the use of In detectors for dosimetry of gamma-radiation with a wide energy spectrum (bremsstrahlung) is associated with significant uncertainty in measuring the equivalent dose of the gamma spectrum with an upper limit of 10 MeV. This uncertainty is due to the relatively high threshold of the aforementioned reaction of 1.08 MeV. The quantitative contribution to the total radiation flux of the region of the gamma spectrum below the threshold (γ,γ') of the reaction on the In nucleus was determined and it was shown that, depending on the direction of radiation, there is a systematic error in measuring the equivalent dose, reaching 20-60%. Investigated and proposed for use alternative materials detectors, allowing reducing the systematic error in measuring the equivalent dose to 2-3%, which is quite acceptable for practical use.

KEYWORDS: linear electron accelerator, gamma-radiation, (γ,γ') reaction, isomer, dosimetry

ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПОШУКУ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ, ПЕРСПЕКТИВНИХ ДЛЯ ДОЗИМЕТРІЇ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ВЕЛИКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ

Використання мішені з індію (In) для дозиметрії гамма-випромінювання по «наведений» активності ізомеру $^{115\text{m}}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ описано, наприклад, в роботах [1,2], де такий метод дозиметрії був застосований для моніторингу гамма-випромінювання джерел на основі ізотопу ^{60}Co (кобальтових гармат) промислового застосування. Така методика була застосована для дозиметрії інтенсивних потоків гальмівного випромінювання більш високої енергії: 10-70 MeV. В роботах [3,4] показано, що чутливість методу є практично постійною в області енергій 10-70 MeV, що надзвичайно важливо. Визначено дозиметричний ресурс In детекторів (по тепловому навантаженню), що дорівнює $\approx 10^7$ Гр, який при використанні додаткового охолодження може бути збільшений на 1-2 порядки. Таким чином, на додаток до даних робіт [5,6], показана можливість використання детекторів з In для дозиметрії інтенсивних потоків гамма-квантів в області енергій до 70 MeV.

З огляду на те, що енергія збудження ізомерного рівня $^{115\text{m}}\text{In}$ дорівнює 1,08 MeV (поріг (γ,γ') реакції), проведено аналіз кількісного внеску ділянки спектра в інтервалі енергій 0-1,08 MeV в загальний потік гамма-випромінювання з верхньою межею діапазону 10 MeV. Для цього використано код *GEANT4*, *PhysicsList G4LowEnergy* і розраховані спектри гальмівних гамма-квантів і електронів для різних тілесних кутів реєстрації, на основі спектрів розраховані дозові характеристики гамма-випромінювання з верхньою межею діапазону 10 MeV. Розрахунки виконані для гальмівної мішені з танталу (Ta), товщиною 2,4 мм і енергії електронів 10 MeV (розподіл електронів - нормальний, FWHM=0,8 MeV, діаметр пучка 2 мм, що близько до реальних умов на прискорювачі ЛУЕ -10).

Конвертер з Ta розташований у центрі сфери і показаний на Рис.1. Гальмівні кванти реєструються системою сферичних детекторів, відповідно до геометричної схеми, яка показана на Рис. 1б. Більш детально методика розрахунків в *GEANT4* описана в [5].

Послідовність розрахунків потоків гальмівного випромінювання у залежності від кута вильоту (реєстрації) була наступною:

- поверхня сфери ділиться на сектори, кутова ширина яких відповідає кроку 0,1 радіан. ($\pm 0,05$ радіан або $\pm 2,86^\circ$);
- в центрі сфери знаходиться конвертор (радіатор) з Ta розмірами $5 \times 5 \times 2,4$ мм;
- в кожному кутовому секторі підраховується число гамма-квантів $N_{0-1,08}$ в інтервалі енергій 0-1,08 MeV та загальна кількість гамма-квантів N_{total} в інтервалі енергій 0-10 MeV.
- розраховується відношення $N_{0-1,08} / N_{\text{total}}$ для різних кутів випромінювання.

В результаті математичного моделювання в *GEANT4* отримані спектри гальмівного випромінювання для конвертора Ta $5 \times 5 \times 2,4$ мм і енергії електронів $E_e = 10$ MeV. (Рис. 2).

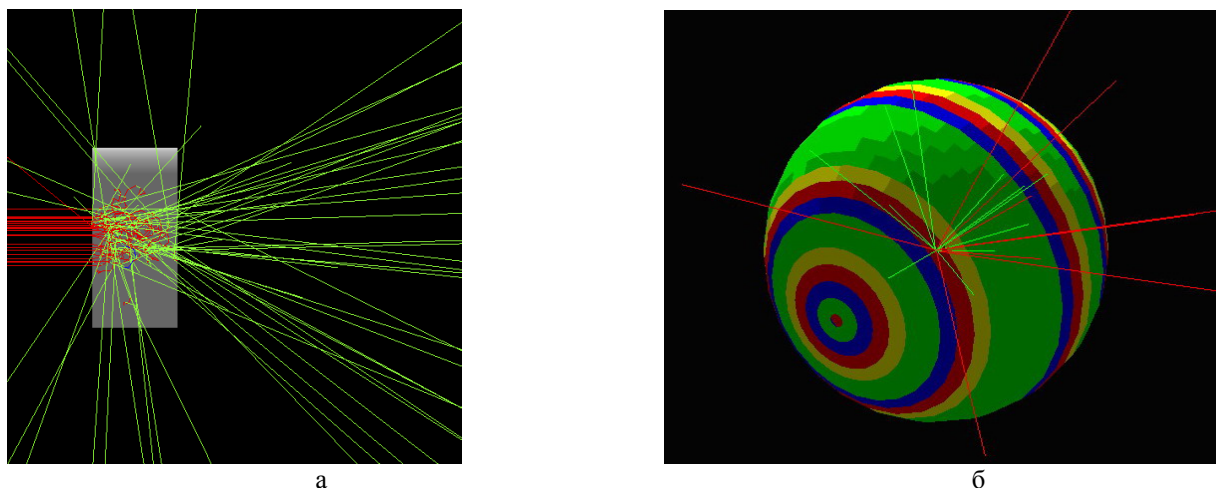


Рис. 1. Конвертер з Та - а, розташування сферичних детекторів, що реєструють виліт електронів (червоні лінії) і гамма-квантів (зелені лінії) - б. Крок по куту 0,1 радіан

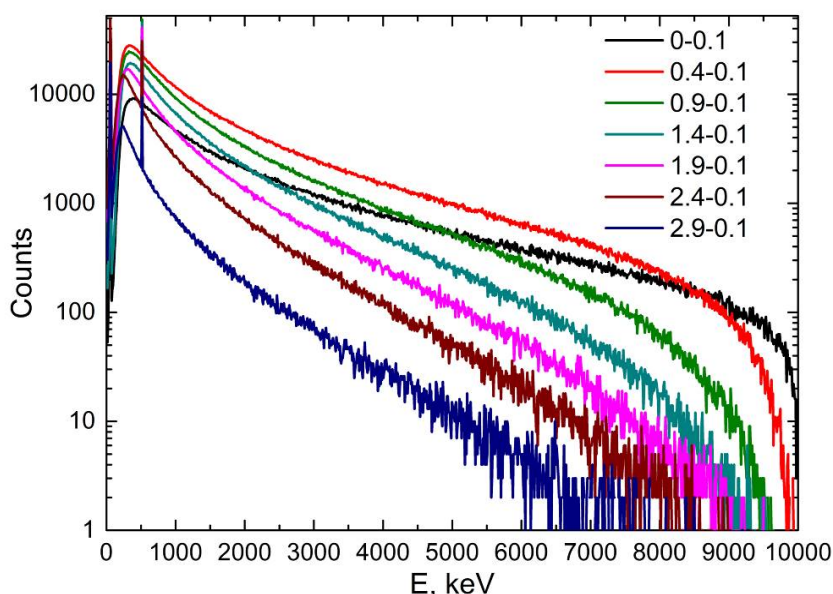


Рис. 2. Спектри гальмівних гамма-квантів для різних інтервалів кутів випромінювання (в радіанах). Та 5×5×2,4 мм, E_e=10 MeВ.

Як видно з Рис. 2, спектр гальмівного випромінювання істотно залежить від тілесного кута випромінювання (реєстрації). Загальна інтенсивність гальмівних спектрів різко падає зі збільшенням кута. Високоенергетична частина спектра в міру збільшення кута випромінювання зменшується значніше, ніж низькоенергетична частина. Наступним кроком було обчислення співвідношення $N_{0-1,08} / N_{total}$ для різних кутів випромінювання. Чисельні відношення кількості гамма-квантів в інтервалі енергій від 0 до 1,08 MeВ – $N_{0-1,08}$ до повного числа квантів в інтервалі енергій від 0 до 10 MeВ – N_{total} для різних кутів випромінювання з інтервалом 0,1 рад подані в Таблиці 1.

Таблиця 1.

Співвідношення кількості гамма-квантів $N_{0-1,08}$ в інтервалі енергій від 0 до 1,08 MeВ до повного числа квантів N_{total} для різних кутів випромінювання з інтервалом 0,1 рад. Та 5×5×2,4 мм, E_e=10 MeВ.

Кут середини смуги, рад	Кут середини смуги, град.	$N_{0-1,08} / N_{total}$
0,05	2,86	0,463
0,15	8,59	0,486
0,25	14,32	0,509
0,35	20,05	0,531
0,45	25,78	0,550
0,55	31,51	0,567
0,65	37,24	0,583

Кут середини смуги, рад	Кут середини смуги, град.	$N_{0-1,08} / N_{total}$
0,75	42,97	0,597
0,85	48,70	0,607
0,95	54,43	0,616
1,05	60,16	0,624
1,15	65,89	0,632
1,25	71,62	0,639
1,35	77,35	0,647
1,45	83,08	0,653
1,55	88,81	0,658
1,65	94,54	0,672
1,75	100,27	0,690
1,85	106,00	0,707
1,95	111,73	0,727
2,05	117,46	0,745
2,15	123,19	0,762
2,25	128,92	0,776
2,35	134,65	0,790
2,45	140,38	0,800
2,55	146,11	0,810
2,65	151,84	0,818
2,75	157,57	0,823
2,85	163,30	0,828
2,95	169,03	0,831
3,05	174,76	0,833

Дані Табл. 1 показані у вигляді графіка на Рис. 3. Повна похибка розрахункових величин не перевищує 2% і змінюється від 0,2% до 2% зі збільшенням кута реєстрації від 0 до 180°.

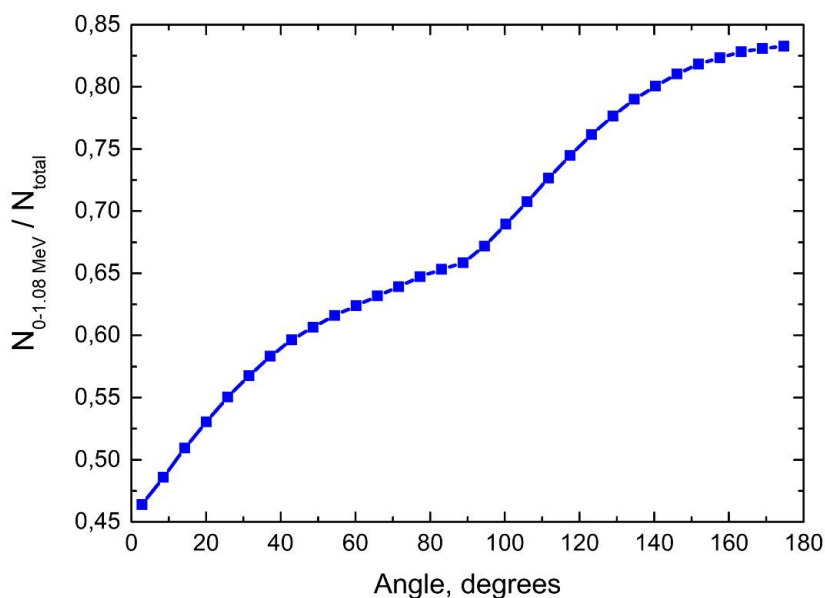


Рис. 3. Співвідношення кількості гальмівних квантів $N_{0-1,08} / N_{total}$ для різних кутів випромінювання (в градусах) Та $5 \times 5 \times 2,4$ мм, $E_e = 10$ MeV.

Характерний прогин під кутом 90 градусів вказує на той факт, що під цим кутом мішень поглинає частину низькоенергетичних квантів, зменшуючи співвідношення числа гальмівних квантів. Істотним фактом є те, що низькоенергетичне випромінювання в інтервалі 0-1,08 MeV становить значну частку в загальному випромінюванні гамма-квантів, починаючи від значення близько 0,48 для кута 10 градусів, досягаючи величини 0,83 для кута 175 градусів.

В кінцевому підсумку нас цікавить інформація про дози, обумовлені гамма-квантами, і похибки у вимірюванні дози, які пов'язані з використанням детекторів з Іп. Для цього використані дані про «дозові коефіцієнти гамма-квантів», взяті з роботи [6], які наведені в Табл.2.

Таблиця 2.

Питомі максимальні еквівалентні дози і еквівалентні дози для гамма-квантів різних енергій

E_γ , кеВ	Питома максимальна еквівалентна доза h_M ; Зв \times см ² /фотон	Коефіцієнт якості; k	Еквівалентна доза; $h_M \times k$; Зв \times см ² /фотон
5	6,50E-09	2,6	1,69E-08
10	1,30E-09	1,8	2,34E-09
20	2,60E-10	1,4	3,64E-10
30	1,10E-10	1,5	1,65E-10
50	5,20E-11	1,7	8,84E-11
100	7,20E-11	1,5	1,08E-10
200	1,20E-10	1,2	1,44E-10
500	2,60E-10	1,1	2,86E-10
1000	4,80E-10	1,0	4,80E-10
2000	8,30E-10	1,0	8,30E-10
5000	1,60E-09	1,0	1,60E-09
10000	2,90E-09	1,0	2,90E-09

Використовуючи дані Табл. 2, визначена залежність співвідношення дози для гамма-квантів в інтервалі 0-1,08 МеВ до повної дози в інтервалі 0-10 МеВ для всіх кутів випромінювання. Ці дані представлені в Табл. 3.

Таблиця 3.

Еквівалентні дози для різних енергетичних інтервалів і їх співвідношення в залежності від кута випромінювання для Іп

Кут середини смуги; рад	Доза 0-1,08 МэВ; Зв \times см ² /фотон	Доза 0-10 МэВ; Зв \times см ² /фотон	Доза 0-1,08 МэВ / Доза 0-10 МэВ
0,05	0,020	0,098	0,198
0,15	0,040	0,187	0,213
0,25	0,049	0,210	0,231
0,35	0,053	0,213	0,248
0,45	0,055	0,206	0,266
0,55	0,055	0,194	0,283
0,65	0,054	0,181	0,299
0,75	0,052	0,167	0,314
0,85	0,050	0,152	0,327
0,95	0,047	0,138	0,340
1,05	0,044	0,127	0,351
1,15	0,042	0,116	0,361
1,25	0,040	0,107	0,371
1,35	0,037	0,098	0,382
1,45	0,035	0,089	0,390
1,55	0,032	0,081	0,397
1,65	0,031	0,075	0,413
1,75	0,030	0,069	0,434
1,85	0,029	0,065	0,454
1,95	0,029	0,061	0,476
2,05	0,028	0,056	0,497
2,15	0,027	0,052	0,519
2,25	0,026	0,048	0,538
2,35	0,024	0,043	0,555
2,45	0,022	0,038	0,569
2,55	0,019	0,033	0,584
2,65	0,016	0,027	0,596
2,75	0,013	0,022	0,601
2,85	0,010	0,016	0,609
2,95	0,007	0,011	0,614
3,05	0,003	0,005	0,618

На Рис. 4. показані результати розрахунків співвідношення дози для гамма-квантів в інтервалі 0-1,08 MeV до повної дози в інтервалі 0-10 MeV в графічному вигляді.

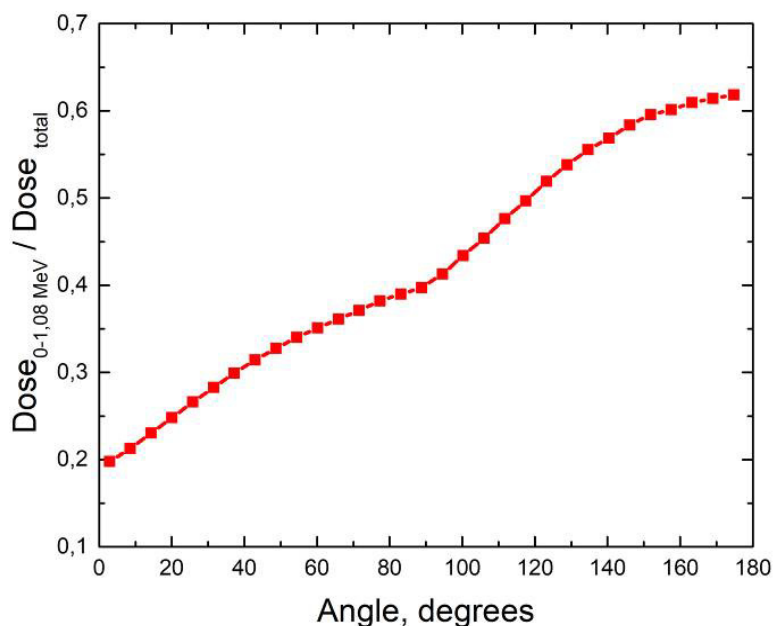


Рис. 4 Кутова залежність співвідношення еквівалентної дози низькоенергетичного гамма-випромінювання в інтервалі 0-1,08 MeV до повної дози гамма-випромінювання в інтервалі 0-10 MeV для зразка In. Та 5×5×2,4 мм, E_e=10 MeV.

Аналізуючи дані, наведені в Табл. 3 і на Рис. 4 приходимо до висновку, що частка еквівалентної дози низькоенергетичного випромінювання в інтервалі 0-1,08 MeV вносить значний вклад в загальну дозу у всьому інтервалі тілесних кутів випромінювання гамма-квантів з максимальною енергією 10 MeV - від 20 до 60%. Це, фактично, визначає систематичну похибку вимірювань дози за допомогою детекторів на основі In. Очевидно, що при використанні гамма-випромінювання з верхньою межею, що дорівнює кільком десяткам MeV, невизначеність, обумовлена внеском інтервалу 0-1,08 MeV, буде зменшуватися в міру збільшення верхньої межі діапазону, тобто для ситуацій, що мають місце в роботах [3, 4].

Збільшення верхньої межі діапазону пом'якшує ситуацію з невизначеністю при вимірюванні абсолютної поглиненої дози, але не знімає цю проблему повністю. Таким чином, використання детекторів на основі In для визначення абсолютних значень еквівалентної дози гамма-квантів з максимальною енергією 10 MeV пов'язано з погрешностями від 20 до 60%, хоча вимірювання відносних значень поглиненої дози цілком правомірні.

Виходом з цієї ситуації може бути пошук і використання таких активаційних детекторів, енергії збудження ізомерних рівнів яких, мають більш низькі значення в порівнянні з рівнем 1,08 MeV ізомера ^{115m}In, що дозволить забезпечити вимірювання дози випромінювання з меншою похибкою. Пошуку таких можливостей присвячені подальші дослідження.

ВИБІР ПЕРСПЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АКТИВАЦІЙНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВЕЛИКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ

При виборі нових матеріалів для активаційної дозиметрії гальмівного випромінювання головними критеріями були фізичні характеристики матеріалів і характеристики розпаду ізоотопів, що утворюються.

Серед фізичних характеристик нових матеріалів, перш за все, необхідні:

- термостійкість;
- стійкість до високої потужності дози;
- висока максимальна доза.

Серед характеристик розпаду ізоотопів що утворюються слід враховувати:

- мінімальне накопичення довгоживучих нуклідів;
- мінімальне значення енергії збудження ізомерного рівня;
- відносно короткий період напіврозпаду ізомера;
- високе значення перерізу (γ, γ') реакції

В результаті ретельного відбору матеріалів-претендентів нашу увагу, перш за все, було зосереджено на матеріалах з низьким порогом збудження ізомерних станів ядер. Вони перераховані в Табл. 4.

Як видно з Табл. 4, до переліку ізомерів-претендентів були віднесені: ^{111m}Cd, ^{117m}Sn, ^{135m}Ba, ^{180m}Hf. Були проведені експерименти з напрацювання очікуваних ізомерів за допомогою опромінення обраних зразків

матеріалів пучком гальмівного випромінювання прискорювача ЛУЕ-10. Опромінення всіх зразків проводилося в стандартній геометрії опромінення з наступним режимом:

- енергія електронів $E_0 = 11,5$ MeV,
- тривалість експозиції 1,3 години,
- доза опромінення 4,8 кГр.

Таблиця 4.

Можливі реакції в перспективних мішенях

Цільовий ізотоп	Реакція	Поріг реакції, МеэВ	Усереднений перетин, мбарн
^{111}Cd	^{112}Cd (24%) (γ, n) ^{111}Cd	9,80	100-120
	^{110}Cd (12,5%) (n, γ) ^{111}Cd	-	250
^{111m}Cd	^{111}Cd (12,8%) (γ, γ') ^{111m}Cd	0,40	-
^{115}Cd	^{116}Cd (7,5%) (γ, n) ^{115}Cd	8,70	-
	^{114}Cd (28,7%) (n, γ) ^{115}Cd	-	160 – швидкі нейтрони; ≈350 – теплові нейтрони
^{117m}Sn	^{118}Sn (24,2%) (γ, n) ^{117m}Sn	9,65	≈150
	^{116}Sn (18,7%) (n, γ) ^{117m}Sn	-	≤ 90
	^{117}Sn (7,3%) (γ, γ') ^{117m}Sn	0,32	-
^{135m}Ba	^{135}Ba (6,5%) (γ, γ') ^{135m}Ba	0,30	-
	^{136}Ba (7,8%) (γ, n) ^{135m}Ba	>9,00	-
^{180m}Hf	^{180}Hf (29%) (γ, γ') ^{180m}Hf	1,10	-
^{182m}Hf	^{186}W (29%) (γ, α) ^{182m}Hf	1,00	-

Гамма-спектри опромінених зразків матеріалів наведені, відповідно, на Рис.5. - Рис.8.

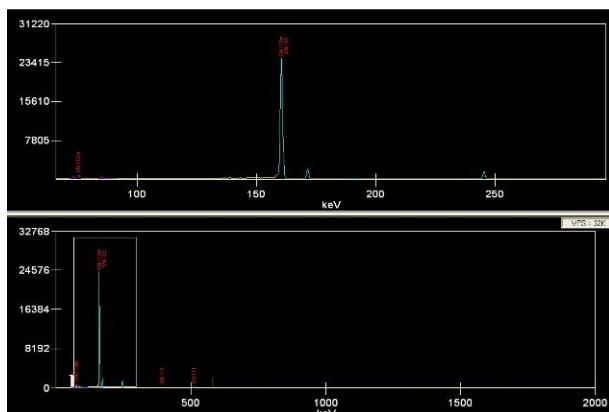


Рис. 5. Спектр опроміненого зразка Sn

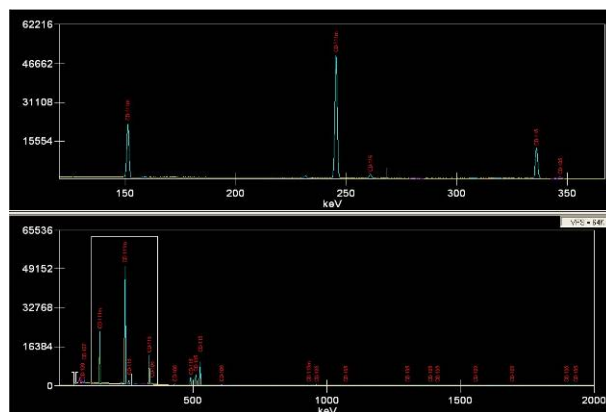


Рис 6. Спектр опроміненого зразка Cd

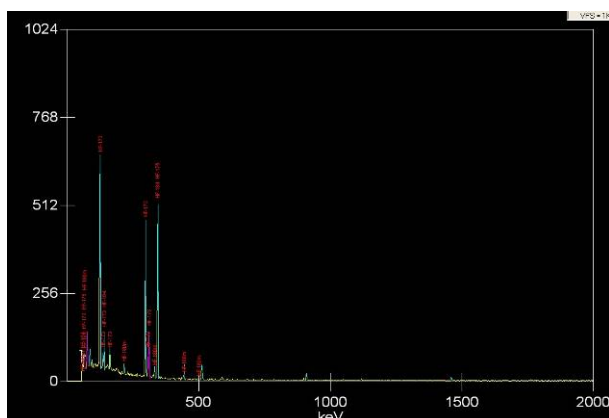


Рис. 7. Спектр опроміненого зразка Hf

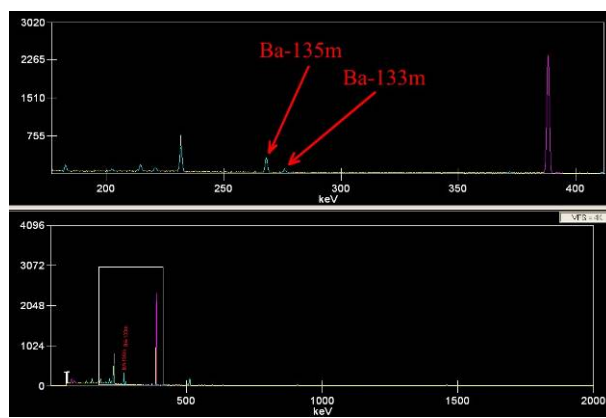


Рис. 8. Спектр опроміненого зразка Ba

Вимірювання активності цільових і домішкових ізотопів в опромінених зразках виконано за допомогою спектрометричного комплексу CANBERRA [5]. Узагальнені дані цільових і домішкових ізотопів в перспективних мішенях зведені в Табл. 5.

Таблиця 5.

Активність цільових і домішкових ізотопів в перспективних мішенях

Ізотоп	Період напіврозпаду, $T_{1/2}$	Гамма-лінія, кеВ	Активність, кБк/г	Невизначеність вимірювань, кБк/г
^{111m}Cd	49 хв	245	<u>243,000</u>	1,600
^{105}Cd	55 хв	961	60,000	5,000
^{115}Cd	53 год	527	45,000	12,000
^{115m}Cd	44,5 днів	933	6,000	2,000
^{113m}Sn	21,4 хв	77,4	2,000	0,700
^{117}Sn	13,6 днів	158	<u>33,800</u>	1,200
^{123m}Sn	129 днів	1088	< 1,000	-
^{123}Sn	40 хв	160	< 1,000	-
^{133m}Ba	38,9 год	280	2,230	0,200
^{135m}Ba	28,7 год	270	<u>14,600</u>	0,700
^{173}Hf	23,6 год	123	1,300	0,900
^{175}Hf	70 днів	343	2,600	0,090
^{180m}Hf	5,5 год	332	<u>0,135</u>	0,016
^{184}Hf	4,1 год	139; 345	0,580	0,068

Отримані результати з наведеної активності досліджуваних зразків після опромінення пучком гальмівного випромінювання (як видно з табл. 5), вказують на те, що за час опромінення зразків, найменшу активність має ізотоп ^{180m}Hf . З огляду також на той факт, що ізотоп ^{180m}Hf має порівняно високий поріг збудження (1,1 МеВ) - це дає підстави для виключення його з переліку перспективних ізотопів для активаційної дозиметрії.

Таким чином, в якості нових перспективних дозиметричних детекторів можуть бути використані наступні матеріали: Cd, Sn, Ba. При опроміненні цих матеріалів гамма-квантами збуджуються ізомери з найбільш прийнятними для вимірювання і використання характеристиками - ^{111m}Cd ; ^{117m}Sn ; ^{135m}Ba . Доречно порівняти кутові залежності дозових відношень перспективних ізомерів з ізотопом ^{115m}In . Таке порівняння демонструє Рис. 9.

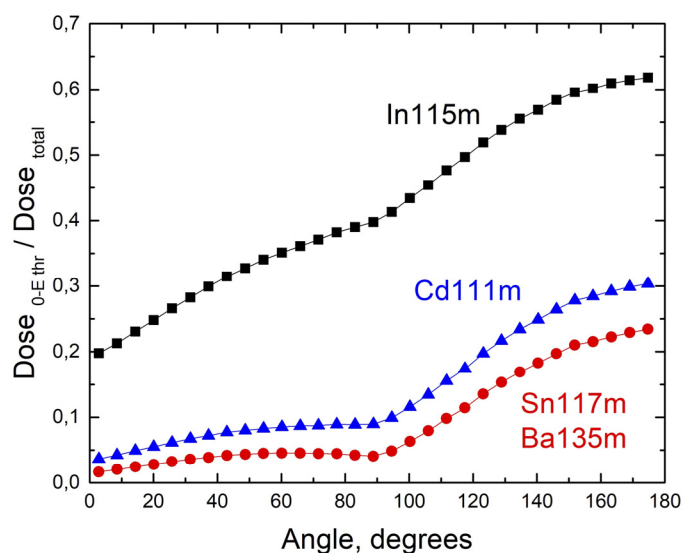


Рис. 9. Порівняння кутової залежності співвідношення еквівалентної дози низькоенергетичного гамма-випромінювання (від нуля до порога реакції) до повної дози в інтервалі 0-10 МеВ для різних ізомерів: (0-1,08 МеВ - ^{115m}In); (0-0,4 МеВ - ^{111m}Cd); (0-0,32 МеВ - ^{117m}Sn); (0-0,3 МеВ - ^{135m}Ba).

З Рис. 9 видно, що використання в якості дозиметричних детекторів Cd, Sn або Ba дозволяє істотно знизити похибку у вимірюванні еквівалентної дози гамма-випромінювання в порівнянні з детектором з In для всіх кутів вильоту гамма-випромінювання. Наприклад, якщо при детектуванні гамма-випромінювання, спрямованого «вперед», похибка у вимірі дози детектором In становить 20%, то для детекторів Sn і Ba, така похибка становить 2%, а для детектора Cd – 3%. Таким чином, значення систематичних помилок у вимірі еквівалентної дози гамма-випромінювання детекторами Cd, Sn і Ba до 10 разів менше, ніж для детекторів з In, отже, вони більш прийнятні для практичного використання в якості нових, перспективних активаційних дозиметричних детекторів.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень характеристик матеріалу In, у якості дозиметричного детектора, отримані кількісні оцінки внеску інтенсивності низькоенергетичної частини гамма-випромінювання (в інтервалі енергій 0-1,08 MeV) в повну інтенсивність випромінювання з верхньою межею 10 MeV.

2. Показано, що використання для дозиметрії детекторів In пов'язано зі значними систематичними невизначеностями при вимірюванні еквівалентної дози гамма-випромінювання з верхньою межею 10 MeV, які досягають 20-60% (в залежності від кута випромінювання).

3. Проведено аналіз фізичних характеристик різних матеріалів і характеристик можливих ізомерних станів ядер, які придатні в якості перспективних детекторів для дозиметрії потоків гамма-випромінювання високої інтенсивності.

4. На основі експериментальних даних про величину активності, отриману після опромінення обраних для дослідження зразків пучками гальмівного випромінювання лінійного прискорювача ЛУЕ-10, зроблено вибір матеріалів-детекторів, найбільш придатних для активаційної дозиметрії гамма-випромінювання.



5. Показано, що в якості дозиметричних детекторів, найбільш придатними матеріалами є: Cd, Sn і Ba, при опроміненні яких збуджуються відповідні ізомери з прийнятними для вимірювань характеристиками: ^{111m}Cd ; ^{117m}Sn ; ^{135m}Ba .

6. Використання в якості дозиметричних активаційних детекторів Cd, Sn і Ba дозволяє знизити систематичну помилку в вимірі еквівалентної дози гамма-випромінювання до 2-3%. Так як період напіврозпаду ізомеру ^{111m}Cd (49 хвилин), є найбільш відповідним для вимірювань в порівнянні з періодами напіврозпаду ізомерів ^{117m}Sn ; ^{135m}Ba , можна зробити висновок про те, що матеріал Cd є найбільш прийнятним для практичного використання в якості активаційного дозиметричного детектора.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку Г.Д. Пугачову за допомогу в зборі даних по «дозовим коефіцієнтам гамма-квантів».

ORCID IDs

 Olexii S. Deiev, <https://orcid.org/0000-0003-4565-9039>;  Roman N. Dronov, <https://orcid.org/0000-0002-1824-835X>,
 Boris I. Shramenko, <https://orcid.org/0000-0003-4583-6963>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Jiunn-Hsing Chao, Pin-Chieh Hsu, and Hong-Ming Liu, Applied Radiation and Isotopes, **55**, 549-556 (2001), [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(01\)00076-8](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00076-8).
- [2] A. Murataka, S. Endo, Y. Kojima, and K. Shizuma, J. Radiat. Res. **51**(2), 197-203 (2010), <https://doi.org/10.1269/jrr.09083>.
- [3] V.I. Nikiforov, A.Eh. Tenishev, A.V. Torgovkin, V.L. Uvarov, V.A. Shevchenko, I.N. Shlyahov, and B.I. Shramenko, Problems of Atomic Science and Technology, **4**(80), 181-184, (2012), https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2012_4/article_2012_4_181.pdf. (In Russian).
- [4] Ju.V. Rogov, V.A. Shevchenko, I.N. Shlyakhov, B.I. Shramenko, A.Eh. Tenishev, A.V. Torgovkin, V.L. Uvarov, and V.F. Zhiglo, Problems of Atomic Science and Technology, **6**(100), 120-124 (2015), https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2015_6/article_2015_6_120.pdf.
- [5] J.H. Chao, and A.C. Chiang, Radiation Measurements, **45**(9), 1024-1033 (2010), <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.08.012>.
- [6] A.A. Lychagin, E.V. Koryakina, and S.E. Ulyanenko, Meditsinskaya Fizika, **3**, 15-23 (2015), http://medphys.amphr.ru/_private/DB/67_15.pdf. (in Russian)
- [7] A.N. Dovbnya, O.S. Deyev, V.A. Kushnir, V.S. Malyshevsky, T.V. Malykhina, V.V. Mitrochenko, S.A. Perezhogin, A.V. Torgovkin, G.V. Fomin, and B.I. Shramenko, Problems of Atomic Science and Technology, **6**(88), 192-195, (2013), https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2013_6/article_2013_6_192.pdf.
- [8] *Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 [Radiation safety standards NRB-76/87]*, (Energoizdat, Moscow, 1988).

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИБІР ПЕРСПЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АКТИВАЦІЙНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВЕЛИКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ

О.С. Десв, Р.М. Дронов, В.А. Шевченко, Б.І. Шраменко

Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний інститут»

1 вул. Академічна, м. Харків Україна 61108

Радіаційні технології, засновані на застосуванні потужних пучків електронів та гамма-випромінювання тісно пов'язані з необхідністю дозиметрії цих пучків. Вельми успішною для цих цілей є дозиметрія, заснована на використанні реакції непружного розсіювання гамма-квантів на цілому ряді ядер з утворенням ізомерів з різними періодами напіврозпаду і енергіями квантів випромінювання. Прикладом такого застосування в дозиметрії є реакція $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ в результаті якої утворюється ізомер ^{115m}In , що має гамма-лінію з енергією 336,24 кеВ і період напіврозпаду 4,5 годин. Мало місце успішне застосування цієї методики в дозиметрії при вирішенні певних практичних завдань (опромінювальні комплекси на основі джерел ^{60}Co - кобальтові «гармати»). У даній роботі показано, що використання детекторів з In для дозиметрії гамма-випромінювання з широким енергетичним спектром (гальмівне випромінювання) пов'язане зі значною невизначеністю при вимірюванні еквівалентної дози гамма-спектра з верхньою межею 10 MeV. Така невизначеність обумовлена відносно високим порогом вищезгаданої реакції -1,08 MeV. В даній роботі визначено кількісний вклад у повний потік випромінювання ділянки гамма-спектра нижче порогу (γ, γ') реакції на ядрі In та показано, що в залежності від напрямку випромінювання має місце систематична похибка при вимірюванні еквівалентної дози, що досягає 20-60%. Досліджено та

запропоновано для використання альтернативні матеріали - детектори, що дозволяють зменшити систематичну похибку при вимірі еквівалентної дози до 2-3%, що є цілком прийнятним для практичного застосування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лінійний прискорювач електронів, гамма-випромінювання, (γ, γ') реакція, ізомер, дозиметрія

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АКТИВАЦИОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

О.С. Деев, Р.М. Дронов, В.А. Шевченко, Б.И. Шраменко

Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»

1 ул. Академическая, Харьков Украина 61108

Радиационные технологии, основанные на применении мощных пучков электронов и гамма-излучения, тесно связаны с необходимостью дозиметрии этих пучков. Весьма успешной для этих целей является дозиметрия, основанная на использовании реакции неупругого рассеяния гамма-квантов на целом ряде ядер с образованием изомеров с различными периодами полураспада и энергиями квантов излучения. Примером такого применения в дозиметрии является реакция $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ в результате которой образуется изомер $^{115\text{m}}\text{In}$, имеющий гамма-линию с энергией 336,24 кэВ и период полураспада 4,5 часа. Имело место успешное применение этой методики в дозиметрии при решении определенных практических задач (облучательные комплексы на основе источников ^{60}Co – кобальтовые «пушки»). В настоящей работе показано, что использование детекторов из In для дозиметрии гамма-излучения с широким энергетическим спектром (тормозное излучение) сопряжено со значительной систематической ошибкой в измерении эквивалентной дозы гамма-спектра с верхней границей 10 МэВ. Такая неопределенность обусловлена относительно высоким порогом вышеупомянутой реакции -1,08 МэВ. В работе определен количественный вклад в полный поток излучения участка гамма-спектра ниже порога (γ, γ') реакции на ядре In. Показано, что в зависимости от направления излучения имеет место систематическая ошибка в измерении эквивалентной дозы, достигающая 20-60%. Исследованы и предложены для использования альтернативные материалы – детекторы, позволяющие уменьшить систематическую ошибку в измерении эквивалентной дозы до 2-3%, что является вполне приемлемым для практического применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: линейный ускоритель электронов, гамма-излучение, (γ, γ') реакция, изомер, дозиметрия