

В.О. ЖЕЛТОНОЖСЬКИЙ,¹ А.М. САВРАСОВ,¹ П.С. ДЕРЕЧКЕЙ,²
О.М. РОКИЦЬКИЙ¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України
(Просп. Наки, 47, Київ 03028; e-mail: asavrasov@kinr.kiev.ua)

² Інститут електронної фізики НАН України
(Вул. Університетська, 21, Ужгород)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНИХ СТАНІВ НА ЯДРАХ Cd ТА Te В (γ, n)-РЕАКЦІЇ

УДК 539.17

Вперше виміряно середньозважені виходи реакцій $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}^m$, $^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121}\text{Te}^m$, $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123}\text{Te}^m$, $^{126}\text{Te}(\gamma, n)^{125}\text{Te}^m$, $^{128}\text{Te}(\gamma, n)^{127}\text{Te}^m$, $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}^m$, $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^m$ та $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^m$ з граничним значенням енергії гальмівних γ-квантів 17,5 МеВ. Встановлено повністю статистичний характер реакцій на ядрах кадмію та значний внесок нестатистичних механізмів у випадку ядер телуру, оскільки в першому випадку виміряні середньозважені виходи задовільно узгоджуються з результатами моделювання за допомогою програмних кодів TALYS-1.96 та TALYS-2.2, а в другому спостерігаються відмінності.

Ключові слова: середньозважені виходи, перерізи, активаційний метод, гамма-спектрометрія, TALYS-1.96 та TALYS-2.2, фотонейтронні реакції, кадмій, телур.

1. Вступ

Фотоядерні реакції з вильотом нейтрона в області енергії гігантського дипольного резонансу (ГДР) [1] протягом останніх десятиліть досліджувались доволі ретельно для різних ядер. Водночас експериментальних даних значно менше для (γ, n)-реакцій із заселенням ізомерних станів, причому це стосується й ізотопів кадмію та телуру. В основному проводились вимірювання ізомерних відношень виходів. Водночас дані про виходи й перерізи заселення цих ізомерів дадуть змогу отримати інформацію як про механізми перебігу цих реакцій, так і про структуру збуджених рівнів в околі енер-

гій ізомерних рівнів. З огляду на викладене метою цієї роботи є дослідження виходів напрацювання ядер $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{125}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, $^{129}\text{Te}^m$, $^{111}\text{Cd}^m$ і $^{115}\text{Cd}^m$ в (γ, n)-реакції під час опромінення мішеней металічного кадмію й телуру гальмівними гамма-квантами з енергією в області ГДР.

2. Експеримент та результати вимірювань

Дослідження середньозважених виходів проводилось активаційним методом на гальмівному γ-пучку для граничної енергії гальмівних γ-квантів (E_{rp}) 17,5 МеВ. Для моніторингу потоку гальмівних γ-квантів використовувались зразки природного металічного танталу товщиною 30 мкм і золота товщиною 10 мкм. Під час опромінення до них додавались мішені металічного телуру й кадмію. Для цієї експериментальної збірки з 4 мішеней в якості гальмівної мішені використовувався металічний тантал товщиною 1,05 мм, за яким на відстані 10–15 см розміщувалась збірка. Тантал

Цитування: Желтоножський В.О., Саврасов А.М., Деречкей П.С., Рокицький О.М. Дослідження збудження ізомерних станів на ядрах Cd та Te в (γ, n)-реакції. *Укр. фіз. журн.* **71**, № 11, 855 (2026).

© Видавець ВД “Академперіодика” НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

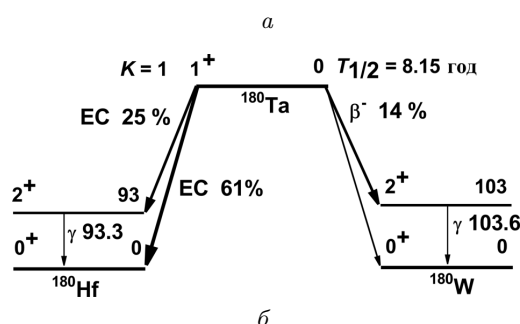
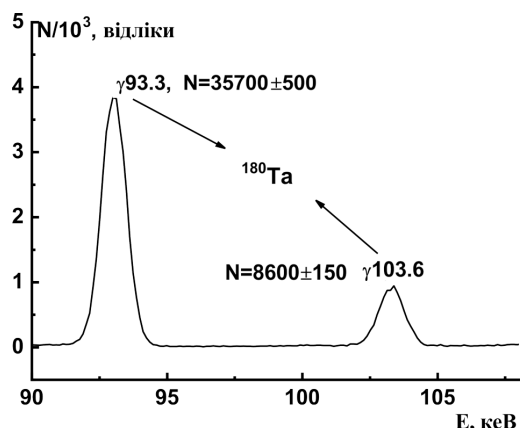


Рис. 1. Фрагменти γ -спектру активованої мішені танталу (а) та схеми розпаду ^{180}Ta [5] (б)

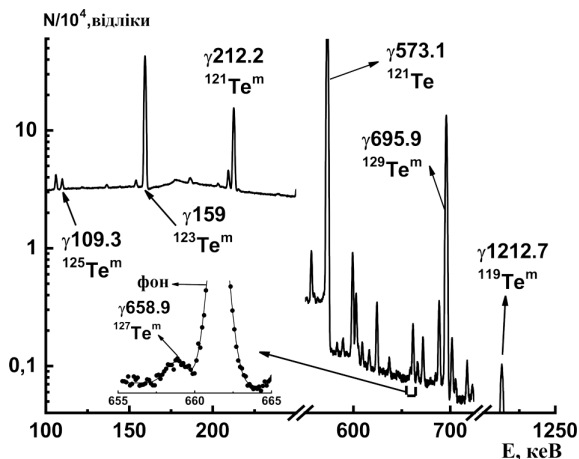


Рис. 2. Фрагмент γ -спектру активованої мішені металічного телуру. Його маса склала 3,5 г. Час охолодження – 11 діб, час вимірювання – 18 діб

товщиною 30 мкм і золото використовувались для отримання потоку гальмівних γ -квантів за допомогою реакцій $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ і $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ відповідно. Експериментальні перерізи цих реа-

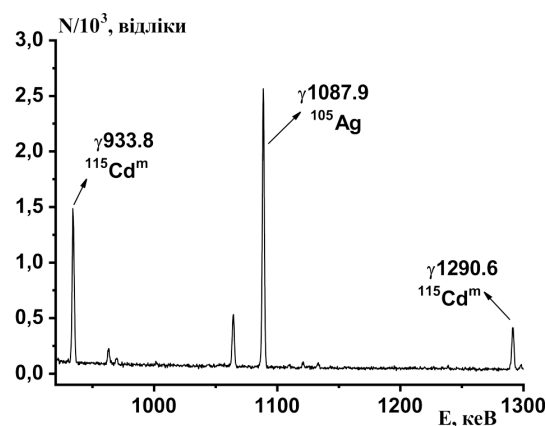


Рис. 3. Фрагмент γ -спектру активованої мішені металічного кадмію. Його маса склала 0,6 г. Час охолодження – 6 діб, час вимірювання – 1 година

кцій добре відомі для монохроматичних γ -квантів у досліджуваному енергетичному діапазоні [2, 3]. Виконувались дві серії опромінь і вимірювань у низькофоновій спектрометричній лабораторії. Час опромінення становив 3–5 годин.

Наведену активність міряли двома γ -спектрометрами на базі HPGe-детекторів, з ефективністю реєстрації 15 та 40% порівняно з NaI(Tl)-детектором розмірами $3'' \times 3''$ та енергетичною роздільною здатністю 1,9 кеВ на γ -лінії 1332,5 кеВ ^{60}Co для обох спектрометрів.

Для того, щоб визначити потік гальмівних γ -квантів, необхідно спочатку розрахувати середньозважені виходи моніторної реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$. Для цього використовувались γ -піки з енергіями 93,3 кеВ та 103,6 кеВ, які супроводжують розпад основного стану ^{180}Ta (див. рис. 1). Потім за допомогою формул 4 та 5 [4] розраховували відповідно середньозважений вихід моніторної реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ і потік гальмівних γ -квантів. Цей потік узгоджувався в межах невизначеності експерименту з потоком, розрахованим за допомогою моніторної реакції $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$. Середньозважені виходи дорівнювали 135(6) мб та 215(10) мб для реакцій $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ і $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ відповідно.

Усі гамма-піки, які супроводжують розпад $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{125}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, $^{129}\text{Te}^m$, $^{111}\text{Cd}^m$ і $^{115}\text{Cd}^m$, надійно ідентифіковані за енергією та періодом напіврозпаду (див. рис. 2–3).

З експериментальних γ -спектрів і табульованих величин визначено середньозважені виходи реа-

Таблиця 1. Реакції та спектроскопічна інформація про продукти розпаду [8]

Реакція	Період напіврозпаду утвореного радіонукліду	Енергія γ -кванта, яку використано для ідентифікації, кеВ	Квантовий вихід гамма-кванта, %	Коефіцієнт самопоглинання, абс. одиниці
$^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}^m$	4,7 дня	1212,73(7)	66,1	1,32(3)
$^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121}\text{Te}^m$	164,2 дня	212,189(27)	81,5	1,83(5)
$^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123}\text{Te}^m$	119,2 дня	159,00(3)	84,3	2,62(9)
$^{126}\text{Te}(\gamma, n)^{125}\text{Te}^m$	57,4 дня	109,276(15)	0,280(3)	5,29(21)
$^{128}\text{Te}(\gamma, n)^{127}\text{Te}^m$	106,1 дня	658,9(1)	0,0125(19)	1,33(3)
$^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}^m$	33,6 дня	695,88(6)	3,0(6)	1,33(3)
$^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^m$	48,54 хвилини	245,395(20)	94(7)	1,12(2)
$^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^m$	44,56 дня	933,838(4)	2,00(4)	1,07(2)

* Інформацію щодо квантового виходу взято з [9], оскільки в цій роботі значно нижча невизначеність квантового виходу.

кцій, які зумовлюють утворення $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{125}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, $^{129}\text{Te}^m$, $^{111}\text{Cd}^m$ і $^{115}\text{Cd}^m$ згідно з формулою, мб:

$$\langle Y \rangle_{\text{exp}} = (N \lambda A) / ((1 - \exp(-\lambda t_{\text{опр.}})) \exp(-\lambda t_{\text{охол.}}) \times (1 - \exp(-\lambda t_{\text{вим.}}))) \xi k \alpha F N_A m p R, \quad (1)$$

де p – абсолютний вміст ізотопів телуру й кадмію в досліджуваних мішенях; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, (кількість ядер/г·моль); m – маса мішеней, г; A – масові числа атомів ^{120}Te , ^{122}Te , ^{124}Te , ^{126}Te , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{112}Cd і ^{116}Cd відповідно, (а.о.м.); R – коефіцієнт конверсії. N – кількість відліків під фотопіками, які супроводжують розпад $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{125}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, $^{129}\text{Te}^m$, $^{111}\text{Cd}^m$ і $^{115}\text{Cd}^m$; α – квантові виходи γ -квантів, які супроводжують розпад ядер $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{125}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, $^{129}\text{Te}^m$, $^{111}\text{Cd}^m$ і $^{115}\text{Cd}^m$; ξ – ефективності реєстрації γ -квантів розпаду; $t_{\text{опр.}}$, $t_{\text{охол.}}$, $t_{\text{вим.}}$ – тривалості опромінення, охолодження і вимірювання, відповідно, с; k – коефіцієнти самопоглинання γ -квантів розпаду; λ – сталі розпаду ядер $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{125}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, $^{129}\text{Te}^m$, $^{111}\text{Cd}^m$ та $^{115}\text{Cd}^m$, с^{-1} ; F – потік гальмівних γ -квантів, $(\gamma \cdot \text{моль})/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$.

Обробку γ -спектрів проведено за допомогою програми Winspectrum [6]. Ця програма дає змогу записувати спектри через певні проміжки часу. Тобто, відповідні нукліди ідентифіковано й за енергією та періодом напіврозпаду. Ефективність реєстрації γ -квантів розпаду визначено за допомогою стандартних точкових калібрувальних джерел $^{152,154}\text{Eu}$ та ^{133}Ba . Для перевірки калібрування використано програмний пакет GEANT4 [7],

в якому підрахунки виконуються методом Монте-Карло. Результати моделювання збіглися з експериментальними значеннями ефективності в межах невизначеності експерименту. Величини λ , p , α , A взято з [8–9], N – з експериментальних γ -спектрів. Величини коефіцієнтів k отримано з різниці між модельованими ефективностями реєстрації необхідних гамма-квантів для точкових і досліджуваних зразків. Моделювання проводилося за допомогою кодів GEANT4 та MCNP-4c [10] для додаткової перевірки. Моделювані ефективності реєстрації для точкових джерел узгоджуються як між обома кодами, так і з експериментальними величинами. Величини енергії гамма-квантів, які використовувалися для отримання виходів, їхні квантові виходи й коефіцієнти самопоглинання наведено в табл. 1. Коефіцієнт R розраховано згідно з методикою, описаною в [11].

Отримані дані про середньозважені $\langle Y \rangle_{\text{exp}}$ виходи наведено в табл. 2.

Слід також оцінити внесок нейтронів, які утворюються як у гальмівній мішені, так і в мішенях збірок, у заселення $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{125}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, $^{129}\text{Te}^m$, $^{111}\text{Cd}^m$ і $^{115}\text{Cd}^m$ у реакціях (n, γ) . Потoki нейтронів оцінювали за реакцією $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$, який надійно ідентифіковано в спектрах. З аналізу розпаду ^{182}Ta зроблено висновок, що загальний внесок (n, γ) -реакцій у заселення вищезгаданих ядер не перевищує 0,1 %).

Для оцінки внеску (γ, p) -реакцій у заселення досліджуваних ізомерних станів слід урахувати те, що перерізи (γ, p) -реакцій в області середніх мас ядер приблизно на два порядки нижчі, ніж перері-

Таблиця 2. Середньозважені виходи (γ, n) -реакцій на ядрах телуру та кадмію

Реакція	Q , MeV	$\langle Y \rangle$, мбн					
		$\langle Y \rangle_{\text{exp}}$	TALYS-1.96, $\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$		TALYS-2.2, $\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$		$\langle Y \rangle_{\text{other}}^{\text{exp}}$
			ld1	ld6	ld1	ld6	
$^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}^m$	10,5	8,6(8)	6,7(3)	8,5(4)	11,6(6)	13,8(7)	11,5(14) [12, 13], 12,3(14) [14]
$^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121}\text{Te}^m$	10,1	18(2)	7,6(4)	8,6(4)	17,3(8)	19,1(10)	17,3(21) [15]
$^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123}\text{Te}^m$	9,7	23,1(21)	17,3(9)	16,4(8)	17,4(8)	16,4(8)	17,9(23) [16]
$^{126}\text{Te}(\gamma, n)^{125}\text{Te}^m$	9,3	22,6(23)	14,3(7)	13,5(7)	16,8(8)	14,0(7)	
$^{128}\text{Te}(\gamma, n)^{127}\text{Te}^{m*}$	8,9	15(2)	11,1(6)	12,4(6)	15,2(8)	14,6(7)	19,2(23) [16], 26,7(35) [17, 13]
$^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}^{m*}$	8,5	20,3(18)	13,8(7)	17,9(9)	10,8(5)	14,2(7)	16,6(20) [16], 21(3) [17, 13]
$^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^m$	9,8	5,6(6)	4,9(3)	4,5(2)	5,80(3)	5,70(3)	
$^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^m$	8,9	8,9(7)	9,3(5)	8,7(4)	10,7(5)	9,9(5)	

* Для цих реакцій в загальній невизначеності не враховувались систематичні невизначеності квантових виходів.

зи (γ, n) -реакцій. До того ж основні та ізомерні стани ядер – продуктів (γ, p) -реакцій переважно розпадаються на основний стан досліджуваних ядер. У цій роботі досліджувався розпад їхніх ізомерних станів. Тому внесок у заселення досліджуваних ізомерних станів від продуктів (γ, p) -реакцій у тих випадках, коли материнське ядро розпадалося на ізомерний стан, не перевищував 0,5%.

Для врахування внеску $(\gamma, 2n)$ -реакцій слід мати на увазі те, що перерізи цих реакцій приблизно на порядок нижчі за перерізи досліджуваних (γ, n) -реакцій. До того ж у цьому випадку енергетичні пороги $(\gamma, 2n)$ -реакцій містяться в діапазоні 15,9–16,8 MeV. Для гальмівних гамма-квантів з нашою граничною енергією 17,5 MeV потоки гальмівних фотонів приблизно у 100 разів нижчі, ніж у випадку (γ, n) -реакцій. Разом із нижчим перерізом внески в заселення досліджуваних ізомерних станів від $(\gamma, 2n)$ -реакцій не перевищують 0,3%.

3. Обговорення

Досліджувані реакції моделювали за допомогою програмних кодів TALYS-1.96 та TALYS-2.2 [18]. Теоретичні виходи ($\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$) розраховано в результаті згортки з кроком 1 MeV за такою формулою:

$$\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \varphi_i}{R \sum_{i=1}^N \varphi_i}, \quad (2)$$

де σ_i – модельовані значення перерізів досліджуваних реакцій для монохроматичних γ -квантів; φ_i –

відносні величини потоку, модельованого в Geant4 [7] спектра гальмівних γ -квантів; R – коефіцієнт конверсії.

Ці виходи також наведено в табл. 2 разом з енергетичними порогоми досліджуваних реакцій (Q). Як видно з таблиці 2, середньозважені виходи обох (γ, n) -реакцій на ізотопах кадмію в межах точності експерименту задовільно узгоджуються з теоретичними даними. Це свідчить про статистичний характер перебігу цих (γ, n) -реакцій, оскільки цей механізм домінує в кодах TALYS-1.96 та TALYS-2.2.

Водночас середньозважені виходи більшості (γ, n) -реакцій на ядрах телуру систематично перевищують теоретичні дані, особливо для коду TALYS-1.96. Це свідчить про зміщення густини станів з вищими спінами в область низьких значень енергії. У випадку використання коду TALYS-2.2 узгодження з експериментом загальному краще. Проте перевищення експериментальних даних над теоретичними залишається для реакцій $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123}\text{Te}^m$, $^{126}\text{Te}(\gamma, n)^{125}\text{Te}^m$ та $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}^m$.

У коді TALYS-1.96 є шість моделей для опису густини рівнів, а в коді TALYS-2.2 – сім. Ці моделі варіювали для всіх досліджуваних реакцій. У таблиці наведено теоретичні виходи, розраховані для моделі сталої температури та фермі-газу (CT + FG) (ld1) [19], як усталеної моделі, а також для мікроскопічної моделі, яка ґрунтується на залежних від температури розрахунках Хартрі–Фока–Боголюбова з силами Когні (ld6) [20]. Водно-

час теоретичні значення середньозважених виходів, розраховані за іншими моделями, містились у діапазоні між $ld1$ та $ld6$. З цих даних видно, що для найлегшого ізотопу телуру мікроскопічний підхід в коді TALYS-1.96 демонструє краще узгодження з експериментом, але загалом відмінність не зникає. На нашу думку, необхідно вводити значну поправку при зміщенні густини рівнів з високими спінами у бік нижчих величин енергії.

Слід зазначити, що хоча є й окремі прямі вимірювання перерізів досліджуваних реакцій, переважно було виконано досить багато вимірювань ізомерних відношень виходів. В окремих випадках виміряні повні перерізи заселення (γ, n)-реакцій для ізотопів телуру для монохроматичних енергій гамма-квантів. Тому, розрахувавши за формулою (2) середньозважені виходи (γ, n)-реакцій для $E_{\text{тр}} = 17,5$ МеВ і використавши експериментальні значення ізомерних відношень виходів для цієї граничної енергії, з робіт інших авторів можна отримати середньозважені виходи заселення ізомерних станів. За наявності прямих вимірювань перерізів заселення ізомерних станів вихід отримувався безпосередньо з формули (2). Ці виходи ($\langle Y \rangle_{\text{exp}}^{\text{other}}$) наведено в таблиці 2 разом із переліком робіт, з яких бралися експериментальні дані для розрахунків. Бачимо, що ці виходи в межах точності експериментів в переважній більшості збігаються з нашими результатами і є вищими за модельовані величини особливо у випадку використання коду TALYS-1.96.

Для середньозважених виходів, які розраховувались за даними кодів TALYS-1.96 та TALYS-2.2 ($\langle Y \rangle_{\text{stat}}^{\text{theor}}$) невизначеність складається з невизначеності моделювання гальмівного спектра в коді Geant4, яка становить 5% для цих граничних енергій гальмівних гамма-квантів. У випадку використання експериментальних даних з робіт інших авторів загальна невизначеність дещо вища, оскільки до невизначеностей моделювання додаються невизначеності експериментальних перерізів та ізомерних відношень виходів. Для кожного перерізу невизначеність враховують із відповідним ваговим коефіцієнтом, тобто розраховують середньозважену невизначеність, яка становить 8–11%. Тому загальна сумарна невизначеність середньозважених виходів за даними з робіт інших авторів ($\langle Y \rangle_{\text{exp}}^{\text{other}}$), які використовувалися в цих розрахунках становить 12–15%.

Невизначеність потоку гальмівних γ -квантів у переважній більшості випадків є домінантною в розрахунках середньозважених виходів $\langle Y \rangle_{\text{exp}}$ і становить 7%. У нашому випадку невизначеностей квантових виходів у деяких випадках не було, оскільки, як правило, використовувалися найінтенсивніші γ -лінії, а в інших вони становили від 1 до 20%. Статистичні невизначеності площ піків становили 1–6%. Невизначеності ефективності реєстрації коливалися в межах 2–3%, оскільки проводилися відносні вимірювання, невизначеності коефіцієнтів самопоглинання становили 2–4%. Систематичні невизначеності було оцінено на рівні 2%, за результатами вимірювань, проведених на різних спектрометрах. Тому загальні невизначеності більшості середньозважених виходів становили 8–13% (без урахування систематичних невизначеностей квантових виходів γ -квантів з енергіями 658,9 і 695,9 кеВ, які супроводжують розпад $^{127}\text{Te}^m$ і $^{129}\text{Te}^m$ відповідно).

4. Висновки

Вперше виміряно середньозважені виходи реакцій $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}^m$, $^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121}\text{Te}^m$, $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123}\text{Te}^m$, $^{126}\text{Te}(\gamma, n)^{125}\text{Te}^m$, $^{128}\text{Te}(\gamma, n)^{127}\text{Te}^m$, $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}^m$, $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^m$ і $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^m$ з граничним значенням енергії гальмівних γ -квантів 17,5 МеВ, значення яких становили 8,6(8), 18(2), 23,1(21), 22,6(23), 15(2), 20,3(18), 5,6(6) та 8,9(7) мб відповідно. Встановлено повністю статистичний характер реакцій на ядрах кадмію та значний внесок нестатистичних механізмів у випадку ядер телуру, оскільки у першому випадку виміряні середньозважені виходи задовільно узгоджуються з результатами моделювання за допомогою програмних кодів TALYS-1.96 та TALYS-2.2, а у другому переважно перевищують їх. Розраховані за експериментальними даними з інших робіт середньозважені виходи реакцій $^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121}\text{Te}^m$ і $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}^m$ у межах невизначеності експерименту узгоджуються з нашими експериментальними даними.

Робота виконана за фінансової підтримки гранту МАГАТЕ № 28137.

1. S.S. Ditrich, B.L. Berman. Atlas of photoneutron cross sections obtained with monoenergetic photons. *At. Data Nucl. Data Tabl.* **38**, 199 (1988).
2. V.V. Varlamov, B.S. Ishkhanov, V.N. Orlin, N.N. Peskov, M.E. Stepanov. New data on (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, and $(\gamma, 3n)$

- partial photoneutron reactions. *Phys. At. Nucl.* **76**, 1403 (2013).
3. A. Veyssire, H. Beil, R. Bergere, P. Carlos, A. Lepretre. Photoneutron cross sections of ^{208}Pb and ^{197}Au . *Nucl. Phys. A* **159**, 561 (1970).
 4. V.A. Zheltonozhsky, A.M. Savrasov, M.V. Zheltonozhskaya, A.P. Chernyaev. Excitation of $^{177,178}\text{Lu}$ in reactions with bremsstrahlung with escaping of charged particles. *Nucl. Instrum. Methods B* **476**, 68 (2020).
 5. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdecayscheme.jsp?nucl=180HF&dsid=180ta%20ec%20decay&unc=nds>; <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdecayscheme.jsp?nucl=180W&dsid=180ta%20bm%20decay&unc=nds>.
 6. N.V. Strilchuk. *The WinSpectrum Manual* (Institute for Nuclear Research, Kyiv, 2000).
 7. S. Agstinelli et al. (Geant4 Collaboration). GEANT4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A* **506**, 250 (2003).
 8. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>.
 9. E. Browne, R.B. Firestone. *Table of Isotopes. 7th Edition*. Edited by V.S. Shirley (Wiley Interscience, 1986).
 10. J.F. Briesmeister. *MCNP—A General Monte Carlo N-particle Transport Code. Version 4B. Manual* (Los Alamos National Laboratory, 1997).
 11. V.A. Zheltonozhsky, A.M. Savrasov. Population cross-section of $^{179m2}\text{Hf}$ from the reactions on hafnium and tantalum targets. *Nucl. Instrum. Meth. B* **438**, 20 (2019).
 12. V.M. Mazur, Z.M. Bigan, P.S. Derechkey, V.A. Zheltonozhsky, A.M. Savrasov. Study of the cross sections for (γ, n) -reactions on p-nuclei ^{120}Te , ^{136}Ce in the giant E1-resonance energy region. *Nucl. Phys. At. Energ.* **20**, 228 (2019).
 13. T.D. Thiep, T.T. An, P.V. Cuong, N.T. Khai, N.T. Vinh, A.G. Belov, O.D. Maslov. The isomeric ratios in photonuclear reactions of natural tellurium induced by bremsstrahlung with endpoint energies in the giant dipole resonance region. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **289**, 637 (2011).
 14. V.M. Mazur, Z.M. Bigan, D.M. Symochko, T.V. Poltorzhyska. Cross-sections of isomeric state excitation of the ^{119}Te and ^{121}Te nuclei in (γ, n) reactions in an energy range of 9–20 MeV. *Int. J. Mod. Phys. E* **20**, 2329 (2011).
 15. V.M. Mazur, Z.M. Bigan, D.M. Symochko, T.V. Poltorzhyska. Cross-sections of isomeric state excitation of the ^{119}Te and ^{121}Te nuclei in (γ, n) reactions in an energy range of 9–20 MeV. *Phys. Part. Nucl.* **9**, 248 (2012).
 16. V.M. Mazur, D.M. Symochko, Z.M. Bigan, T.V. Poltorzhyska. Excitation of the $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$, and $^{129}\text{Te}^m$ isomers in (γ, n) reactions from 10 to 22 MeV. *Phys. Rev. C* **87**, 044604 (2013).
 17. A. Lepretre, H. Beil, R. Bergère, P. Carlos, J. Fagot, A. De Miniac, A. Veyssiére, H. Miyase. A study of the giant dipole resonance in doubly even tellurium and cerium isotopes. *Nucl. Phys. A* **258**, 350 (1976).
 18. A.J. Koning, D. Rochman. Modern nuclear data evaluation with the TALYS code system. *Nucl. Data Sheets* **113**, 2841 (2012).
 19. A. Gilbert, A.G.W. Cameron. A composite nuclear-level density formula with shell corrections. *Can. J. Phys.* **43**, 1446 (1965).
 20. S. Hilaire, M. Girod, S. Goriely, A.J. Koning. Temperature-dependent combinatorial level densities with the D1M Gogny force. *Phys. Rev. C* **86**, 064317 (2012).

Одержано 22.01.26

V.O. Zheltonozhsky, A.M. Savrasov,
P.S. Derechkey, O.M. Rokitskyi

EXCITATION OF ISOMERIC STATES OF CADMIUM AND TELLURIUM NUCLEI IN (γ, n) REACTION

The flux-weighted average yields of the $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}^m$, $^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121}\text{Te}^m$, $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123}\text{Te}^m$, $^{126}\text{Te}(\gamma, n)^{125}\text{Te}^m$, $^{128}\text{Te}(\gamma, n)^{127}\text{Te}^m$, $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}^m$, $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^m$, and $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^m$ reactions at the endpoint energy of bremsstrahlung γ -quanta $E_{br} = 17.5$ MeV have been measured for the first time. A completely statistical character of the reactions on cadmium nuclei and a significant contribution of non-statistical mechanisms in the case of tellurium nuclei have been found. In the former case, the measured flux-weighted average yields were in satisfactory agreement with the results of modeling within the framework of the TALYS-1.96 and TALYS-2.2 codes, whereas deviations were observed in the latter case.

Keywords: flux-weighted average yields, cross sections, activation method, gamma-spectrometry, TALYS-1.96, TALYS-2.2, photonuclear reactions, cadmium, tellurium.