

В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей, І. Ю. Сейка, В. В. Гриньов, С. І. Лучкан

Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ФОТОНЕЙТРОННИХ ПЕРЕРІЗІВ, ОДЕРЖАНИХ НА КВАЗІМОНОХРОМАТИЧНИХ ГАММА-ПУЧКАХ

Методами гамма-спектроскопії проведено відносні вимірювання виходів реакції (γ, n) на ізотопах ^{140}Ce і ^{142}Ce в області енергій гамма-квантів 9 - 18 МеВ. Показано, що для ізотопів церію при вимірюваннях на пучках квазімонохроматичних фотонів похибка перерізу (γ, n) реакції за рахунок внеску $(\gamma, 2n)$ реакції не перевищує 2 %.

Ключові слова: переріз ядерної реакції, гамма-кванти, ^{140}Ce , ^{142}Ce , мікротрон.

Результати вивчення перерізів повних та парціальних фотонейтронних реакцій широко використовуються як у прикладних, так і фундаментальних дослідженнях. Такими є, наприклад, дослідження механізмів збудження і розпаду станів гігантського Е1-резонансу (ГР). На сучасному етапі гігантський дипольний резонанс інтерпретується як з точки зору мікроскопічних, так і колективних моделей. Його вивчення дає змогу наблизитися до однієї з найважливіших проблем ядерної фізики – опис колективних збуджень ядер на мові мікроскопічних теорій. Теоретичні підходи, що виникли і розвинулися для опису явища ГР, на сучасному етапі широко використовуються і для резонансів вищих мультиполів. Дані по перерізах (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ та $(\gamma, 3n)$ використовуються в широкому спектрі задач, починаючи з активаційного аналізу, а в останні роки мають попит для моніторингу світимості пучків ультрарелятивістських важких іонів шляхом вимірювання внеску нейтронної емісії при взаємній електромагнітній дисоціації ядер, що стикаються.

Основна маса найбільш точних експериментальних даних для повних і парціальних (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ фотонейтронних реакцій була виміряна на квазімонохроматичних пучках гамма-квантів, одержаних шляхом анігіляції прискорених позитронів на льоту в Національній Лоуренцовській лабораторії в Ліверморі (США) і у Французькому центрі ядерних досліджень у Сакле [1, 2]. Цінність вимірювань перерізів фотонейтронних реакцій у цих лабораторіях, крім іншого, полягала в тому, що їхнє обладнання дозволило експериментальним шляхом визначити множину цих фотонейтронних реакцій, тобто експериментально розділити внесок (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ і навіть $(\gamma, 3n)$ реакцій.

Треба відзначити, що для реєстрації нейтронів у цих лабораторіях використовувалися різні методи. У Ліверморі використовувалися кільця BF_3 лічильників, поміщених у сповільнювач

нейтронів, а в Сакле – великий рідинний сцинтиляційний детектор, збагачений гадолінієм [3].

Порівняння результатів, одержаних у вищезгаданих лабораторіях для одних і тих же ядер, виявили помітні систематичні розходження. В основному всі перерізи (γ, n) були більші в Сакле, але всі перерізи $(\gamma, 2n)$ помітно більші в Ліверморі. Оскільки обидві лабораторії вимірювали практично однакову повну кількість нейтронів, розходження в результатах було пояснено різницею в сортуванні по нейтронній множинності, тобто різницею в рахуванні $1n$ і $2n$ подій [4 - 6]. Було запропоновано вважати, що завищення перерізів (γ, n) у результатах у Сакле відбувалося за рахунок внеску $(\gamma, 2n)$ реакцій [4].

В останній час зріс інтерес до оцінки точності парціальних перерізів фотонейтронних (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ реакцій. Не в останню чергу це пов'язано з вирішенням фундаментальних проблем нуклеосинтезу. Із астрофізики відомо, що важкі атомні ядра синтезовані в зірках в основному в реакціях нейтронного захоплення: повільним захопленням нейтронів (s-процес) і швидким захопленням нейтронів (r-процес). Також є в наявності декілька десятків нейтрон-дефіцитних стабільних ізотопів, так званих r-ядер, які продукуються через ланцюжок фотоядерних реакцій [7 - 8]. До них належать і легкі ізотопи церію. Не дивлячись на початі багаточисельні дослідження експериментальної інформації про характеристики фотоядерних реакцій, зв'язаних з утворенням r-ядер, недостатньо. Є і питання до точності існуючих парціальних фотонейтронних перерізів [9]. У зв'язку з цим з'явилися роботи, в яких пропонується уточнення існуючих фотонейтронних даних. По-перше, це експерименти по вимірюванню перерізів (γ, n) реакцій за допомогою удосконалених методик як на пучках гальмівного гамма-випромінювання [10], так і з використанням квазімонохроматичного гамма-випромінювання, одержаного за допомогою зворотного

© В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей,
І. Ю. Сейка, В. В. Гриньов, С. І. Лучкан, 2016

ефекту Комптона [11, 12]. По-друге, це роботи, в яких пропонується уточнення існуючих експериментальних перерізів на базі нового експериментально-теоретичного методу для визначення повного перерізу фотонейтронних реакцій [13, 14].

Дана робота присвячена спробі виявити можливий внесок реакцій $(\gamma, 2n)$ у переріз (γ, n) у даних [15]. Для цього було виконано порівняння відносних виходів реакції $^{142}\text{Ce}(\gamma, n)^{141}\text{Ce}$, одержаних у Сакле, з відносними виходами, одержаними альтернативним прямим методом активації, в якому парціальний вихід утворення дочірніх ядер у реакції (γ, n) ідентифікувався гамма-спектроскопічним методом, що абсолютно включало внесок реакцій $(\gamma, 2n)$.

Як відомо, переріз $\sigma(E)$ фотоядерної реакції пов'язаний з виходом $Y(E_{\gamma\text{max}})$ цієї реакції, одержаним на пучку гальмівних гамма-квантів із максимальною енергією $E_{\gamma\text{max}}$, інтегральним рівнянням Вольтерра першого роду. Розв'язок цього рівняння є некоректною задачею [16]. Тому з метою мінімізації похибок нами в цій роботі зроблено порівняльний аналіз відносних виходів, а не перерізів.

У цій роботі одночасно вимірювалися виходи реакцій (γ, n) на ізотопах ^{140}Ce і ^{142}Ce . При цьому нами використано вихід $Y_n(140)$ реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139}\text{Ce}$ як монітор, з яким порівнюється вихід $Y_n(142)$ реакції $^{142}\text{Ce}(\gamma, n)^{141}\text{Ce}$. А одночасне вимірювання виходів дає змогу одержати їхнє відношення $Y_n(140)/Y_n(142)$ достатньо точним.

Вимірювання виходів проводилося на гальмівному гамма-пучку мікротрона М-30 ІЕФ НАН

України в області енергій 8 - 18 МеВ із кроком $\Delta E = 0,5$ МеВ. Зміна енергії прискорених електронів відбувалася двома методами: у широких межах – зміною хвильоводних вставок, тобто зміною числа орбіт прискорених електронів, і в малих межах – зміною величини магнітного поля. Напруженість магнітного поля прискорювача контролювалася методом ядерного магнітного резонансу, при цьому похибка визначення енергії прискорених електронів становила не більше 40 - 50 кеВ. Електронний пучок виводився з мікротрона через титанове віконце товщиною 0,05 мм і падав на гальмівну мішень – танталову пластину товщиною 0,5 мм. Досліджувані зразки були приготовлені з порошку високочистого окису церію масою 2 г і діаметром 2 мм, запресованого в капролонові касети.

Час опромінення мішеней становив 2 год поблизу порога реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139}\text{Ce}$ і 20 хв при енергіях 15 - 18 МеВ. Тривалість охолодження становила 20 хв, що приводило до повного розпаду ізомерного стану $^{139\text{m}}\text{Ce}$. Гамма-спектри наведеної активності опромінених зразків вимірювалися в хороших фонових умовах гамма-спектрометром на базі HPGe-детектора об'ємом 175 см^3 і 8192-канального аналізатора фірми ORTEC. Роздільна здатність спектрометра становила $\sim 2,5$ кеВ для лінії 1332 кеВ кобальту-60. Більш детальна процедура вимірювань описана в роботі [17]. Спектроскопічні характеристики ізотопів церію наведено в таблиці і бралися з роботи [18].

Спектроскопічні характеристики ізотопів церію

Ізотоп	E_γ , кеВ	I, %	V_n , МеВ	V_{2n} , МеВ	$T_{1/2}$	J^π
$^{139\text{m}}\text{Ce}$	754,2	92	–	–	54,8 с	11/2 ⁻
$^{139\text{g}}\text{Ce}$	160,4	80,1	9,20	16,7	137,6 д	3/2 ⁺
$^{141\text{g}}\text{Ce}$	145,0	49	7,17	12,6	32,5 д	7/2 ⁻

Тут E_γ – енергія аналітичної лінії; I – число гамма-квантів на розпад; $T_{1/2}$ – період напіврозпаду; V_n – поріг (γ, n) реакції материнського ядра; V_{2n} – поріг $(\gamma, 2n)$ реакції материнського ядра; J^π – спин-парність станів.

Ділянку апаратного експериментального спектра наведеної активності зразка CeO_2 , опроміненого при максимальній енергії гальмівного спектра $E_{\gamma\text{max}} = 14,0$ МеВ, наведено на рис. 1, на якому N – число імпульсів відповідної енергії в каналі аналізатора.

Ядра ^{140}Ce і ^{142}Ce дуже зручні для перевірки можливого внеску реакції $(\gamma, 2n)$ у переріз реакції (γ, n) для ядра ^{142}Ce . По-перше, ідентифікація

реакцій (γ, n) для цих ядер відбувається за близькими гамма-лініями 165 і 145 кеВ відповідно, що мінімізує відносну похибку, пов'язану з визначенням фотоефективності детектора. По-друге, пороги $(\gamma, 2n)$ для цих ядер суттєво відрізняються (на 4 МеВ), що дає принципову можливість прецизійного визначення ймовірного внеску $(\gamma, 2n)$ реакції у вихід (γ, n) реакції. По-третє, ядро ^{142}Ce цікаве тим, що для нього переріз $(\gamma, 2n)$ суттєво більший, ніж переріз (γ, n) , і відповідно можливий внесок реакції $(\gamma, 2n)$ при прорахунках апаратури в переріз (γ, n) реакції максимальний.

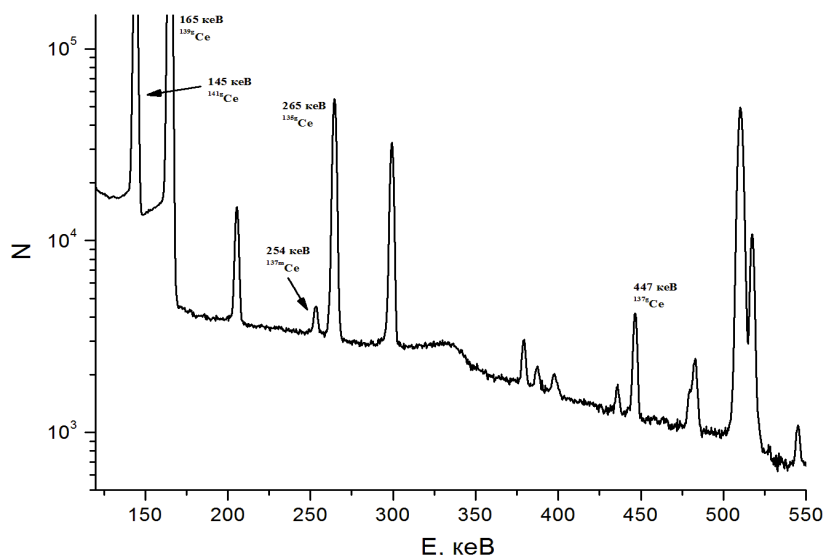


Рис. 1. Ділянка апаратного експериментального спектра церію.

На рис. 2 круглими точками показано переріз реакції (γ, n) , а квадратними – переріз реакції $(\gamma, 2n)$ для ізоотопу ^{142}Ce [15]. Поріг реакції $(\gamma, 2n)$ для ізоотопу ^{142}Ce становить 12,6 МеВ, а максимум її перерізу – 240 мб [15] при енергії 15,5 МеВ. Тобто в інтервалі енергій від 12,6 до 16,7 МеВ можливий вплив внеску $(\gamma, 2n)$ реакції на вихід (γ, n) має проявлятися найбільш виражено. Поріг реакції (γ, n) для ізоотопу ^{140}Ce становить 9,2 МеВ, поріг реакції $(\gamma, 2n)$ – 16,7 МеВ. Таким чином, для ізоотопу ^{140}Ce реакція (γ, n) в

основному вичерпує переріз Е1-гігантського резонансу і дуже зручна для порівняння.

На рис. 3 круглими точками наведено одержані нами експериментальні відношення виходів реакцій (γ, n) для ізоотопів ^{140}Ce і ^{142}Ce $d = Y_n(140)/Y_n(142)$. Указані похибки середньоквадратичні. Вище енергії 11,0 МеВ ця похибка становила 1 - 2 % і не перевищувала розміри точки (статистична похибка була на рівні 0,1 %). Стрілками показано пороги реакцій $(\gamma, 2n)$ для ізоотопів ^{140}Ce і ^{142}Ce .

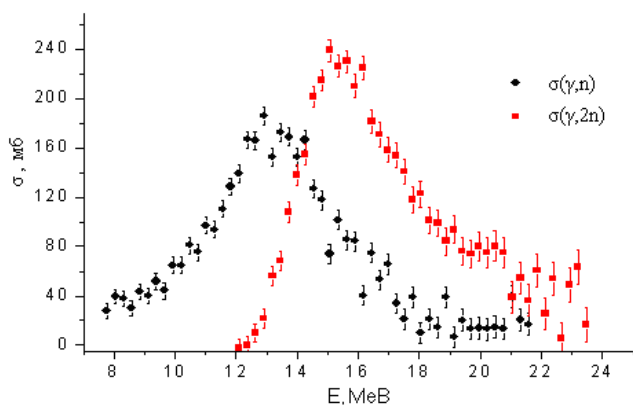


Рис. 2. Перерізи реакцій (γ, n) і $(\gamma, 2n)$ для ізоотопу ^{142}Ce . (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Оскільки в літературі наведено перерізи реакції (γ, n) , одержані в Сакле [15] для ізоотопів ^{140}Ce і ^{142}Ce , нами зроблено перерахунок їх у виходи $Y_n^s(140)$ і $Y_n^s(142)$. Розрахунок проводився з кроком 270 кеВ (з таким кроком наведено дані для перерізів у роботі [15]). Відношення одержаних виходів $d^s = Y_n^s(140)/Y_n^s(142)$ наведено на рис. 3

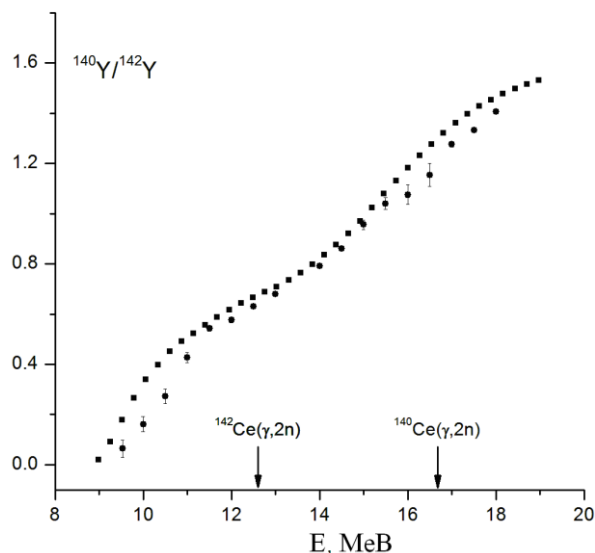


Рис. 3. Експериментальні відношення виходів реакцій (γ, n) для ізоотопів ^{140}Ce і ^{142}Ce .

квадратиками. Порівняння кривих d і d^s показує, що їхній хід повторює одна одну.

Якщо методика вимірювань у Сакле занижає переріз $(\gamma, 2n)$ реакції і за його рахунок завищує переріз (γ, n) реакції для ізоотопу ^{142}Ce , то це має приводити до зменшення відношення виходів $Y_n(140)/Y_n(142)$ і злому на кривій d , але такого не

спостерігається. (В ідеальному випадку (при мінімальних похибках) це відношення має бути меншим, ніж $Y_n(140)/Y_n(142)$, одержане спектроскопічними методами, де таке завищення виключається.)

Як видно з рис. 3, в області 11 - 18 МеВ крива $d^s(E_{\gamma\max})$, одержана за даними із Сакле, перевищує аналогічну криву, одержану нами спектроскопічними методами, на 4 - 6 % (в інтервалі 12,6 - 16,7 МеВ це розходження мінімальне). Таке незначне розходження, а також те, що хід кривих $d(E_{\gamma\max})$ і $d^s(E_{\gamma\max})$ з високою точністю повторює одна одну, може служити вказівкою, що в даному випадку для ізотопів церію система ресстрації нейтронів у Сакле не завищувала помітно перерізів реакції (γ, n) за рахунок внеску $(\gamma, 2n)$.

Але треба зробити зауваження, що принаймні у припороговій області 9 - 11 МеВ нами спостерігається зсув перерізів та відношення виходів

$d^s(E_{\gamma\max})$, одержаних у Сакле в бік енергій, нижчих порога (γ, n) реакції для ^{140}Ce (у тому числі від кривої $d(E_{\gamma\max})$, одержаної нами) на ~ 300 кеВ та відносно наших даних. Такий зсув порога реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139}\text{Ce}$ в даних із Сакле, скоріш за все, не пов'язаний з наявністю домішок, оскільки використовувалися ізотопічно збагачені мішені. При цьому збагачення мішені ^{140}Ce досягало 99,4 %, мішені ^{142}Ce – 94 %. Скоріш за все, це пов'язано з енергетичними калібровками.

При врахуванні такого зсуву наші дані й дані із Сакле в області 11 - 18 МеВ збігаються в межах похибок. Це може свідчити про те, що похибка в даних із Сакле, пов'язана з правильним визначенням множинності, не перевищує $\sim 2,0$ %. Тобто перерізи реакції (γ, n) , отриманих у Сакле [15] для ізотопів церію, практично не завищуються за рахунок внеску $(\gamma, 2n)$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Dietrich S.S., Berman B.L.* // *Atom. Data and Nucl. Data Tables.* - 1988. - Vol. 38. - P. 1998.
2. *Varlamov A.V., Varlamov V.V., Stepanenko P.S. et al.* // *Atlas of Giant Dipole Resonances, IAEA, INDS (NDS)-394.* - Austria, Vienna, 1999.
3. *Berman B.L., Fultz S.S.* // *Rev. Mod. Phys.* - 1975. - Vol. 47. - P. 713.
4. *Wolinec E., Martinez A.R.V., Guffon P. et al.* // *Phys. Rev.* - 1984. - Vol. C29. - P. 1137.
5. *Wolinec E., Martins M.N.* // *Revista Brasileira Fisica.* - 1987. - Vol. 17. - P. 56.
6. *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S.* // *IAEA, INDS (CCP)-440, NDS.* - Austria, Vienna, 2004.
7. *Nair C. et al.* // *Phys. Rev.* - 2010. - Vol. C81. - P. 055806.
8. *Arnould M., Goriely S.* // *Phys. Rep.* - 2009. - Vol. 384. - P. 1.
9. *Berman B.L., Pywell R.E., Dietrich S.S.* // *Phys. Rev.* - 1986. - Vol. C 36. - P. 1286.
10. *Plaisir C., Hanuachi F., Gobet F. et al.* // *Eur. Phys. J.* - 2013. - Vol. A48. - P. 68.
11. *Sauerwein A., Sonnabend K., M.Fritzsche et al.* // *Phys. Rev.* - 2014. - Vol. C89. - P. 035803.
12. *Filipescu D.M., Gheorghe I., Utsunomiya H. et al.* // *Phys. Rev.* - 2014. - Vol. C90. - P. 064616.
13. *Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Troschiev S.Yu.* // *Phys. of Atomic Nuclei.* - 2012. - Vol. 75. - P. 253 - 2632.
14. *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. et al.* // *Eur. Phys. J.* - 2014. - Vol. A50. - P. 114.
15. *Leprêtre A., Beil H., Bergère R. et al.* // *Nucl. Phys.* - 1976. - Vol. A258 - P. 350.
16. *Bogdankevich O.V., Nikolaev F.A.* *Methods in Bremsstrahlung Research.* - New York: Academic Press, 1996.
17. *Mazur V.M., Symochko D.M., Bigan Z.M., Poltorzhitska T.V.* // *Phys. Rev.* - 2014 - Vol. C87. - P. 044604.
18. *Firestone R.B.* // *Table of Isotopes. 8th Edition.* - New York: Wiley, 1996.

В. М. Мазур, З. М. Биган, П. С. Деречкей, И. Ю. Сейка, В. В. Гринев, С. И. Лучкан

Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ФОТОНЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ГАММА-ПУЧКАХ

Методами гамма-спектроскопии проведены относительные измерения выходов реакции (γ, n) на изотопах ^{140}Ce и ^{142}Ce в области энергий гамма-квантов 9 - 18 МэВ. Показано, что для изотопов церия при измерении на пучках квазимонохроматических фотонов [1] погрешность сечения (γ, n) реакции за счет вклада $(\gamma, 2n)$ реакции не превышала 2 %.

Ключовые слова: сечение ядерной реакции, гамма-кванты, ^{140}Ce , ^{142}Ce , микротрон.

V. M. Mazur, Z. M. Bigan, P. S. Derechkey, I. Yu. Seyka, V. V. Grinyov, S. I. Luchkan

Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod

**ANALYSIS OF PHOTONEUTRON CROSS SECTION ACCURACY
OBTAINED AT QUASIMONOCROMATIC GAMMA-BEAMS**

Using gamma-spectroscopic methods, comparative measurements of (γ, n) reaction yields on the isotopes ^{140}Ce and ^{142}Ce were carried out in the energy region of 9 - 18 MeV using gamma-quanta. It was shown, that for the isotopes of Cerium using the quasimonochromatic beams of photons [1] the error of the measurement of the (γ, n) reaction cross section due to the contribution of the $(\gamma, 2n)$ reaction did not exceed 2 %.

Keywords: nuclear reaction cross section, gamma-quanta, ^{140}Ce , ^{142}Ce , microtron.

REFERENCES

1. *Dietrich S.S., Berman B.L.* // *Atom. Data and Nucl. Data Tables.* - 1988. - Vol. 38. - P. 1998.
2. *Varlamov A.V., Varlamov V.V., Stepanenko P.S. et al.* // *Atlas of Giant Dipole Resonances, IAEA, INDS (NDS)-394.* - Austria, Vienna, 1999.
3. *Berman B.L., Fultz S.S.* // *Rev. Mod. Phys.* - 1975. - Vol. 47. - P. 713.
4. *Wolinec E., Martinez A.R.V., Guffon P. et al.* // *Phys. Rev.* - 1984. - Vol. C29. - P. 1137.
5. *Wolinec E., Martins M.N.* // *Revista Brasileira Fisica.* - 1987. - Vol. 17. - P. 56.
6. *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S.* // *IAEA, INDS (CCP)-440, NDS.* - Austria, Vienna, 2004.
7. *Nair C. et al.* // *Phys. Rev.* - 2010. - Vol. C81. - P. 055806.
8. *Arnould M., Goriely S.* // *Phys. Rep.* - 2009. - Vol. 384. - P. 1.
9. *Berman B.L., Pywell R.E., Dietrich S.S.* // *Phys. Rev.* - 1986. - Vol. C 36. - P. 1286.
10. *Plaisir C., Hanuachi F., Gobet F. et al.* // *Eur. Phys. J.* - 2013. - Vol. A48. - P. 68.
11. *Sauerwein A., Sonnabend K., M.Fritzsche et al.* // *Phys. Rev.* - 2014. - Vol. C89. - P. 035803.
12. *Filipescu D.M., Gheorghe I., Utsunomiya H. et al.* // *Phys. Rev.* - 2014. - Vol. C90. - P. 064616.
13. *Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Troschiev S.Yu.* // *Phys. of Atomic Nuclei.* - 2012. - Vol. 75. - P. 253 - 2632.
14. *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. et al.* // *Eur. Phys. J.* - 2014. - Vol. A50. - P. 114.
15. *Leprêtre A., Beil H., Bergère R. et al.* // *Nucl. Phys.* - 1976. - Vol. A258 - P. 350.
16. *Bogdankevich O.V., Nikolaev F.A.* *Methods in Bremsstrahlung Research.* - New York: Academic Press, 1996.
17. *Mazur V.M., Symochko D.M., Bigan Z.M., Poltorzhitska T.V.* // *Phys. Rev.* - 2014 - Vol. C87. - P. 044604.
18. *Firestone R.B.* // *Table of Isotopes.* 8th Edition. - New York: Wiley, 1996.

Надійшла 04.02.2016
Received 04.02.2016