

УДК 539.172.3

В.С. Бохінюк, В.І. Жаба, О.М. Парлаг, Л.О. Шабаліна

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

e-mail: viktorzh@meta.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНИХ СТАНІВ В (γ, n)-РЕАКЦІЯХ

На гальмівному пучку бетатрона Б25/30 проведено вимірювання абсолютних виходів короткоживучих ізотопів ^{78m}Br , ^{88m}Y , ^{114m}In , ^{115m}Sn , ^{202m}Tl , ^{206m}Pb , ^{208m}Bi ($1 \cdot 10^{-4} \geq T_{1/2} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ с) та довгоживучих ізотопів ^{80m}Br , ^{120m}Sb в інтервалі енергій 10-25 MeV з кроком 0,5–1 MeV. Методом Пенфольда–Лейса розраховані ефективні перерізи відповідних реакцій. Проведено порівняння їх з отриманими по програмі TALYS-1.4.

Ключові слова: фотоядерна реакція, вихід, диференціальний переріз, ізомер, метод Пенфольда–Лейса.

Для детального вивчення властивостей збуджених станів ядер бажано отримати їх в широкому діапазоні, як енергій збудження, так і величин повного кутового моменту, тому особливий інтерес становлять ядерні реакції, що приводять до утворення ізомерних станів.

Згідно [1], каталог ізотопів показує, що для більше ніж сотні ядер є можливість вивчення перерізів збудження ізомерних станів в реакції (γ, n). На сьогодні маємо тільки біля 10% потенційної інформації, причому значна частина інформації отримана в 60-их роках і потребує уточнення на новому експериментальному рівні.

Оскільки для ізомерних станів вдається встановити не тільки квантові характеристики, але й безпосередньо поміряти ймовірність переходів із цих станів, то дані про ефективні перерізи збудження ізомерних станів дають інформацію про механізм протікання ядерних реакцій, структуру енергетичних рівнів ядра і можливість уточнення та розвитку певних моделей ядра.

Широкий пошук короткоживучих ізомерних станів обмежений труднощами експерименту, бо наведену активність доводиться вимірювати безпосередньо в пучку. Для таких досліджень найкраще підходить бетатрон, що дозволяє змінювати енергію гальмівного випромінювання в широких межах, підтримувати її з високою точністю і стабільністю та проводити вимі-

ри γ -випромінювання, яке супроводжує розпад ізомерного стану в проміжках між імпульсами бетатрона.

Інтенсивність γ -пучка дозволяє досягти високої статистичної точності при прямих вимірюваннях виходів реакції. Це дає можливість легко і надійно виділяти злами в енергетичній залежності виходу і, тим самим, дозволяє з великою надійністю визначити наявність і енергетичне положення структурних особливостей в досліджуваному перерізі [2].

У період 1990-2010 рр. на бетатроні Б25/30 УжНУ проведено серію досліджень енергетичної залежності перерізів збудження ізомерних станів ядер, які утворюються у фотоядерних реакціях [3-9].

Бетатрон Б25/30 дає можливість проводити виміри виходів реакції в енергетичному інтервалі 5-25 MeV з довільним кроком. Тривалість імпульсу опромінення 7 мкс, частота пучка 50 Гц.

Для дослідження ізомерів з періодами напіврозпаду $1 \cdot 10^{-4} \geq T_{1/2} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ с було зроблено оригінальну установку, що дає можливість реєструвати γ -кванти, які супроводжують розпад ізомерного стану безпосередньо в пучку. Використовувався сцинтиляційний гама-спектрометр, що на час пучка запирався по модулюючій сітці. Установка детально описана в [3, 4].

В даній роботі приведено результати досліджень збудження ізомерних станів в (γ, n)-реакціях. Для вимірів використовувалися

лись зразки із природної суміші ізотопів, збагаченої досліджуваним ізотопом.

Вимірювання інтенсивності гальмівного пучка γ -квантів прохідною тонкостінною іонізаційною камерою, прокаліброваною по абсолютній алюмінієвій товстостінній камері типу Флауерса, дало можливість отримати виходи (γ, n)-реакції, що приводять до утворення ізотопів, в абсолютних одиницях. Розрахунки виходів проводились по загальноприйнятій методиці [2].

Для перевірки правильності методики виміру виходів і розрахунку з них ефективних диференціальних перерізів нами було поміряно виходи реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ і $^{109}\text{Ag}(\gamma, n)^{108}\text{Ag}$ на розділених ізотопах срібла. Отримані залежності ефективних перерізів від енергії для кожного ізотопу приведені в [5]. Для порівняння там же приведені перерізи, отримані в роботі [10] на квазімонохроматичних пучках γ -квантів, де, як мішень використано природну суміш ізотопів срібла. Наші дані добре узгоджуються з опублікованими, що свідчить про відсутність систематичних похибок в методиці.

У таблиці 1 приведено ядерно-фізичні характеристики досліджуваних ізотопів [11], де Епор – поріг реакції (γ, n), що приводить до утворення даного ізотопу; $T_{1/2}$ - період напіврозпаду; E_γ – енергія гамма-квантів, що випромінює ізотоп; J_m , J_g – повний момент ізотопного і основного станів; «+», «-» - парність стану.

У випадку досліджень ізотопу In^{114m} ($T_{1/2}=43\text{мс}$) проміжок часу між імпульсами бетатрона було збільшено до 80 мс. Враховувався також той факт, що в кожному циклі опромінення активність зразка складалася з двох частин: власне утвореної і залишкової від попередніх циклів опромінення [5].

Вимірювання абсолютних виходів довгоживучих ізотопів ^{80m}Br і ^{120m}Sb проводилось по класичній активаційній методиці [6].

Із отриманих кривих виходів розраховувався ефективний диференціальний переріз збудження ізотопних станів в залежності від енергії методом Пенфольда-

Лейса. Суть цього методу, його переваги і недоліки детально проаналізовано в [2].

Таблиця 1

Ядерно-фізичні характеристики досліджуваних ізотопів

Ізотоп	Епор, MeV	$T_{1/2}$	E_γ , keV	J_m	J_g
^{78m}Br	10,7	120mks	149	4+	1+
^{80m}Br	10,16	4.42h	37	5-	1+
^{88m}Y	11,45	300mks	393	1+	4-
^{114m}In	9,03	43ms	310	8-	1+
^{115m}Sn	10,4	159mks	497	11/ 2-	1/2 +
^{120m}Sb	9,24	15,8m	1023; 1171	8-	1+
^{202m}Tl	7,8	570mks	460; 491	7+	2-
^{206m}Pb	6,8	132mks	803; 880	7-	0+
^{208m}Bi	7,2	2,53mc	511; 919	10-	5+

На рис. 1-рис. 7 приведено енергетичні залежності диференціальних перерізів (γ, n)-реакції, що приводять до утворення короткоживучих ізотопів ^{78m}Br , ^{88m}Y , ^{114m}In , ^{115m}Sn , ^{202m}Tl , ^{206m}Pb , ^{208m}Bi , а на рис. 8 - для довгоживучих ізотопів ^{80m}Br і ^{120m}Sb . При цьому помилка в i -ій точці перерізу розраховувалась по формулі згідно [12].

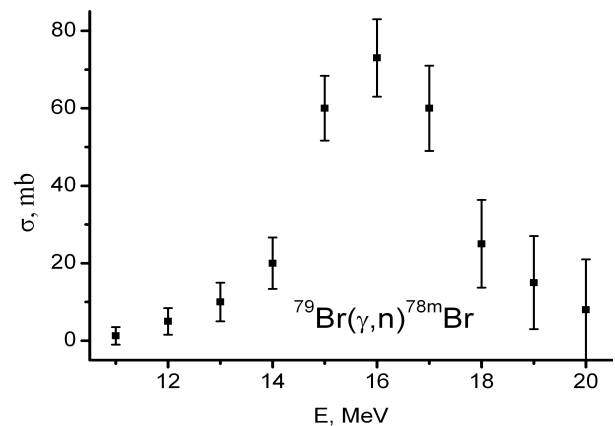


Рис. 1. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакції $^{79}\text{Br}(\gamma, n)^{78m}\text{Br}$.

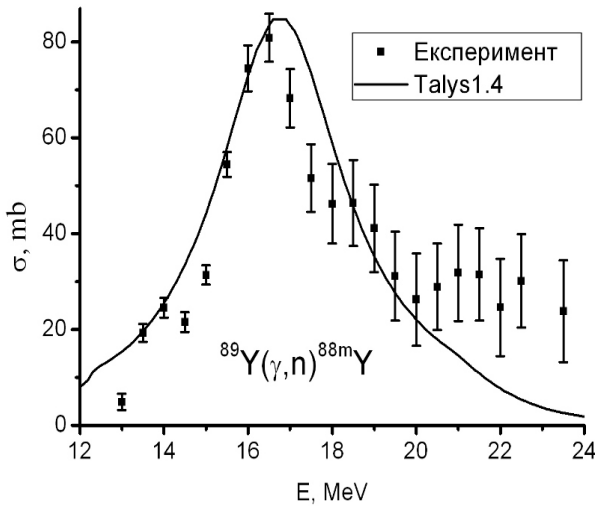


Рис. 2. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакції $^{89}\text{Y}(\gamma, n)^{88\text{m}}\text{Y}$.

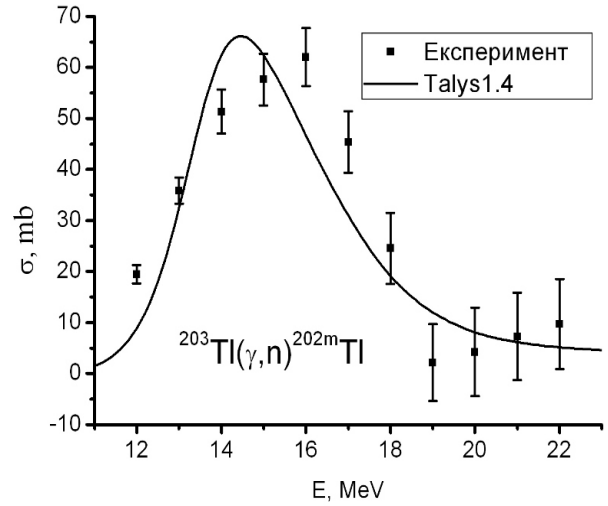


Рис. 5. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакції $^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202\text{m}}\text{Tl}$.

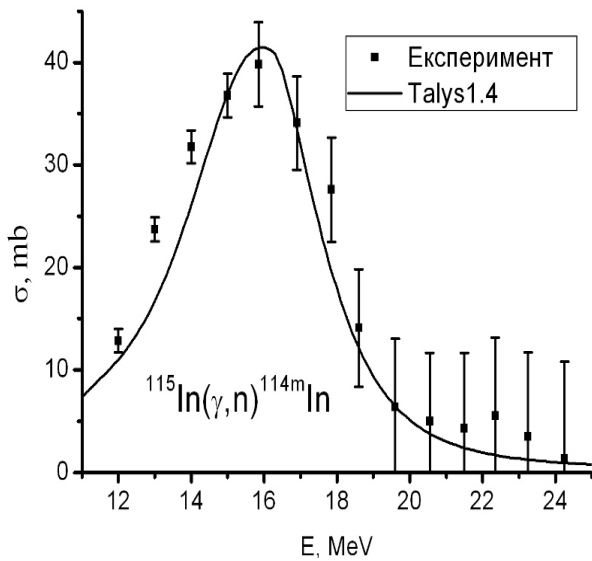


Рис. 3. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакції $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114\text{m}}\text{In}$.

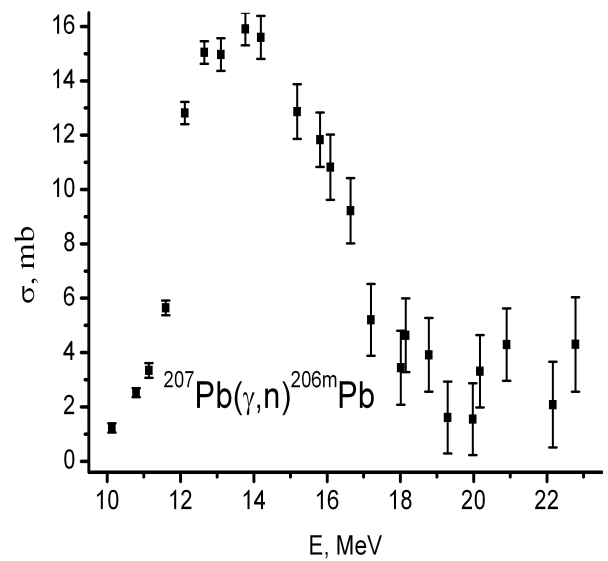


Рис. 6. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакції $^{207}\text{Pb}(\gamma, n)^{206\text{m}}\text{Pb}$.

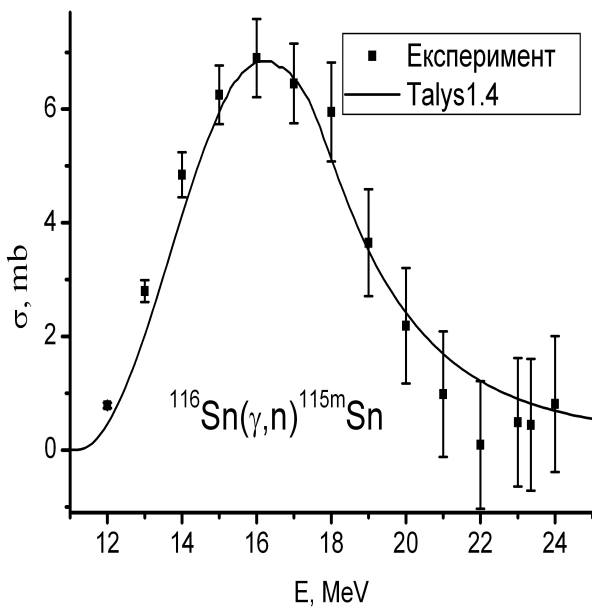


Рис. 4. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакції $^{116}\text{Sn}(\gamma, n)^{115\text{m}}\text{Sn}$.

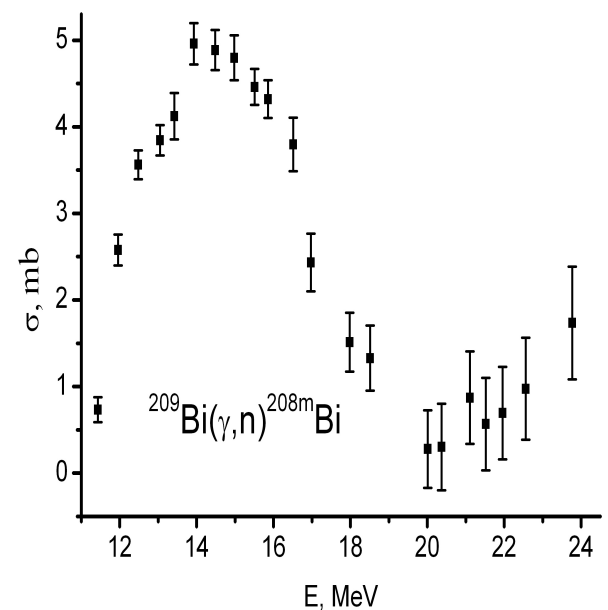


Рис. 7. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакції $^{209}\text{Bi}(\gamma, n)^{208\text{m}}\text{Bi}$.

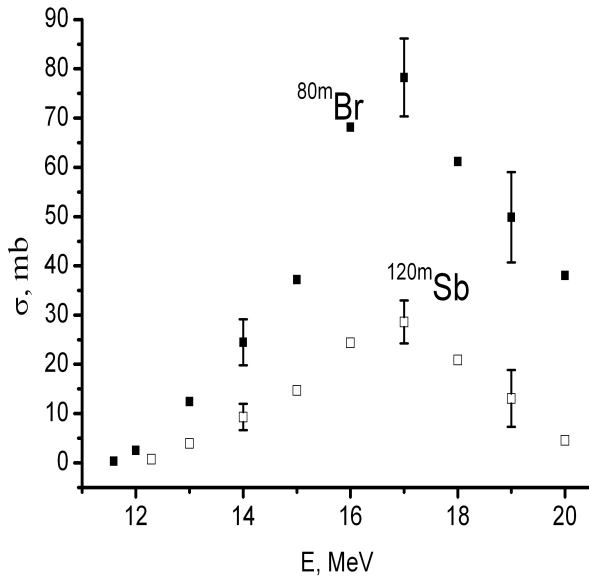


Рис. 8. Залежність диференціального перерізу від енергії для реакцій $^{81}\text{Br}(\gamma,n)^{80m}\text{Br}$ і $^{121}\text{Sb}(\gamma,n)^{120m}\text{Sb}$.

Всі отримані перерізи в загальних рисах повторюють форму перерізу (γ,n) -реакції на цих же ізотопах [13]. Вони мають однокорбний вид, але максимум (в районі 16-17 MeV) дещо зсунутий в бік більших енергій для ізомерів. По абсолютній величині перерізи, що ведуть до утворення ізомерів, значно менші. Так, наприклад, для ^{89}Y переріз (γ,n) -реакції становить 225 mb при енергії в максимумі перерізу 16,5 MeV, а отримані нами значення для ізомера ^{88m}Y – 80,8 mb і 16,7 MeV, відповідно.

На жаль, у згаданій роботі [13] дані про досліджувані нами ізомери відсутні.

Тому, було проведено порівняння отриманих нами перерізів [3-9] з приведеними в огляді робіт [1] по дослідженню збудження ізомерних станів в (γ,n) -реакції на ізотопах ^{44}Sc , $^{73,77,79,81}\text{Se}$, $^{85,87}\text{Sr}$, $^{129-137}\text{Ba}$, $^{121,123,129}\text{Te}$, ^{141}Nd , ^{144}Sm , ^{152}Eu , ^{164}Ho , ^{167}Er , ^{179}Hf , ^{183}W , ^{184}Re , ^{196}Au . Перерізи для ^{197}Pt і ^{197}Hg взяті з роботи [14].

На рис. 9 приведено залежність максимального значення перерізу від числа протонів у ядрі, а на рис. 10 – від числа нейтронів. Тут: ●, ○ – позначено перерізи, взяті з робіт [1, 14] і [3-9], відповідно. Як видно, наші результати корелюють з приведеними в огляді перерізами.

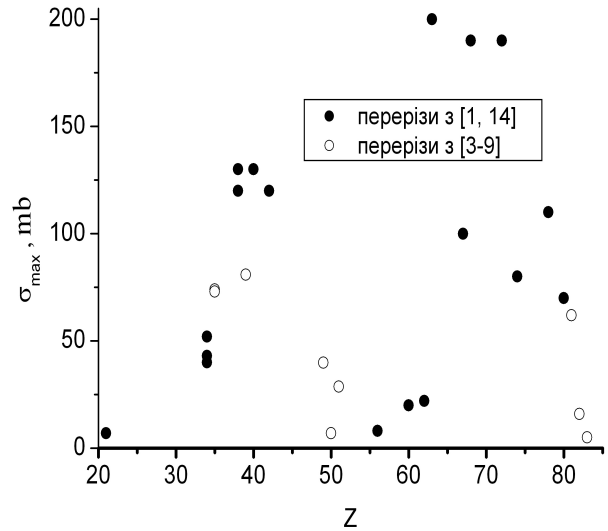


Рис. 9. Залежність максимального значення перерізу від числа протонів у ядрі.

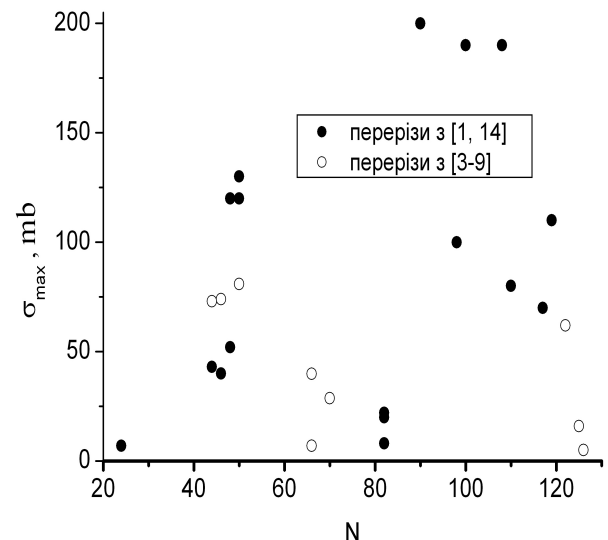


Рис. 10. Залежність максимального значення перерізу від числа нейтронів у ядрі.

Також для ^{88m}Y , ^{114m}In , ^{115m}Sn і ^{202m}Tl енергетичну залежність перерізів (γ,n) -реакцій, що призводять до утворення цих ізомерів, було розраховано по програмі TALYS-1.4 [15, 16]. Результати цих розрахунків вказано суцільною лінією на відповідних графіках. Енергетична залежність перерізу непогано узгоджується по формі, енергії в максимумі перерізу практично співпадають (в межах 0,5-1,0 MeV). Але чисельні значення перерізів у максимумі відрізняються: для ^{88m}Y , ^{115m}Sn і ^{114m}In співвідношення між експериментальним і розрахунковим становить 0,5-0,7 (0,5263, 0,5882, 0,7142); для ^{202m}Tl – 10.

Отримані результати можуть поповнити банк ядерних даних в області ізомерних станів, що знаходять засто-

сування як ядерні константи в прикладних областях, наприклад, для γ -активаційного аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мазур В.М. Возбуждение изомерных состояний ядер в фотонейтронных реакциях в области гигантского дипольного резонанса // ФЭЧАЯ. – 2000. – Том 31. – Выпуск № 2. – С. 384-430.
2. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Фотоядерные реакции. Современный статус экспериментальных данных. - М.: Университетская книга, 2008. – 304 с.
3. Шабалина Л.А., Саболчий М.Т., Осипенко А.П. и др. Исследование короткоживущего изомера таллия возбуждаемого в (γ, n) - реакции // УФЖ. – 1990. – Т.35. – №8. – С. 1153-1157.
4. Беседа Й.З., Гутий А.И., Шабалина Л.А. и др. Исследование фотовозбуждения короткоживущего изомерного состояния иттрия // УФЖ. – 1991. – Т.36. – №9. – С. 1301-1304.
5. Бохинюк В.С., Осипенко А.П., Парлаг О.М. та ін. Дослідження ефективних перерізів реакцій $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$, $^{109}\text{Ag}(\gamma, n)^{108}\text{Ag}$ // Науковий вісник Ужгородського ун-ту. Серія Фізика. – 2002. - Випуск 11. – С. 56-60.
6. Беседа Й.З., Бохинюк В.С., Саболчий М.Т. та ін. Дослідження функції збудження короткоперіодного ізомерного стану $^{114\text{m}}\text{In}$ // УФЖ. – 1995. – Т.40. – № 6. – С. 536-538.
7. Беседа Й.З., Гутий А.И., Шабалина Л.А. и др. Исследование короткоживущих изомерных состояний таллия и иттрия, возбуждаемых в (γ, n) -реакции // ЯФ. – 1991. – Том 54. – Выпуск 3. – С. 609-615.
8. Мазур В.М., Бохинюк В.С., Биган З.М. Фотовозбуждение изомерных состояний в реакции (γ, n) на ядрах ^{81}Br и ^{121}Sb в области 10-25 МэВ // УФЖ. – 1992. – Том 37. – №11. – С. 1632-1635.
9. Беседа Й.З., Бохинюк В.С., Шабалина Л.А. та ін. Функції збудження короткоперіодних ізомерних станів свинцю і вісмуту (γ, n) -реакції // УФЖ. – 1993. – Том 38. – № 6. – С. 846-849.
10. Samual S. Dietrich, Barry L. Berman. Atlas of Photoneutron Cross Section Obtained with Monoenergetic Photons. Atomic Date and Nuclear Date Tables. V.38, № 2, P. 199-338 (1988).
11. Lederer C.M., Shirley V.S. Table of Isotopes. – New York: Wiley, 1978. – 1523 p.
12. Джилавыян Л.З., Кучер Н.П., Мазур В.М. Измерение сечения заселения изомера $^{115}\text{In}^{\text{m}}$ для неупругого рассеяния фотонов при энергиях 4-14 МэВ // Препринт ИЯИ АН СССР, П-0473. – М.: ИЯИ АН СССР, 1986.
13. Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E. Atlas of Giant Dipole Resonances. Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections. INDC(NDS)-394, IAEA NDS, Vienna, Austria, 1999.
14. Желтоножский В.А., Мазур В.М., Биган З.М. Исследование возбуждения метастабильных состояний ^{197}Pt и ^{197}Hg в (γ, n) - и $(d, 2n)$ -реакциях // ЯФ. – 2004. – Том 67. – Выпуск 5. – С. 899-905.
15. Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. “TALYS-1.0”, Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology – ND2007, May 22-27, 2007, Nice, France, editors O.Bersillon, F.Gunsing, E.Bauge, R.Jacqmin and S.Leray, EDPSciences, P. 211-214 (2008).
16. TALYS: Home: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.talys.eu/>

V.S. Bohinyuk, V.I. Zhaba, A.M. Parlag, L.O. Shabalina
Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

RESEARCH OF EXCITATION OF THE ISOMERS STATES IN (γ, n) -REACTIONS

On the bremsstrahlung of betatron B25/30 absolute outputs short living isomers of ^{78m}Br , ^{88m}Y , ^{114m}In , ^{115m}Sn , ^{202m}Tl , ^{206m}Pb , ^{208m}Bi ($1 \cdot 10^{-4} \geq T_{1/2} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ s) and long-living isomers of ^{80m}Br , ^{120m}Sb were measuring in the interval of energies 10-25 MeV with a step 0,5–1 MeV. By Method the Penfold-Leiss effective sections of the proper reactions were calculated. A comparison of them with those obtained under the program TALYS-1.4.

Key words: photonuclear reactions, output, differential section, izomer, method Penfolda-Leiss.

В.С. Бохинюк, В.И. Жаба, О.М. Парлаг, Л.А. Шабаліна
Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ В (γ, n) -РЕАКЦИЯХ

На тормозном пучке бетатрона Б25/30 проведено измерение абсолютных выходов короткоживущих изомеров ^{78m}Br , ^{88m}Y , ^{114m}In , ^{115m}Sn , ^{202m}Tl , ^{206m}Pb , ^{208m}Bi ($1 \cdot 10^{-4} \geq T_{1/2} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ s) и долгоживущих изомеров ^{80m}Br , ^{120m}Sb в интервале энергий 10-25 МэВ с шагом 0,5–1 МэВ. Методом Пенфольда–Лейса рассчитаны эффективные сечения соответствующих реакций. Проведено сравнение их с полученными по программе TALYS-1.4.

Ключевые слова: фотоядерная реакция, выход, дифференциальное сечение, изомер, метод Пенфольда-Лейса.