

УДК 539.163

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВАЦИИ ^{177}Lu В (γ, pn) -РЕАКЦИЯХ

© 2020 г. В. А. Желтоножский¹, М. В. Желтоножская^{1, *}, А. В. Саврасов²,
С. С. Бельшев¹, А. П. Черняев¹, В. Н. Яценко³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

²Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

³Федеральное государственное бюджетное учреждение

“Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр
имени А.И. Бурназяна” Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

*E-mail: zhelton@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

В (γ, pn) -реакциях впервые измерены взвешенные по спектру интегралы сечения и средневзвешенные сечения для ^{177}Lu при граничных значениях энергии тормозных γ -квантов 17.5, 20, 37 и 55 МэВ. Результаты моделирования с использованием программных кодов TALYS-1.9 и EMPIRE-3.2 демонстрируют доминирование нестатистических процессов.

DOI: 10.31857/S0367676520080347

ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимодействия фотонов с атомными ядрами продолжается уже несколько десятков лет, несмотря на это, пока наиболее изучены сечения (γ, n) - и (γ, γ') -реакций [1, 2], а реакция с вылетом протона исследована значительно хуже. Основной причиной этого является то, что ее сечение значительно ниже по сравнению с (γ, n) -каналом вследствие кулоновского барьера. В то же время в (γ, p) -реакциях могут возбуждаться состояния, часто недоступные для (γ, n) -канала. Также для фотоядерных реакций с вылетом протонов ожидается значительный вклад прямых и полупрямых процессов. Вклад этих процессов для тяжелых ядер на порядки превышает вклад процессов, идущих через составное ядро.

Экспериментальные данные о фотоядерных реакциях для ядер с $Z > 50$ очень малочисленны, поэтому получение новых экспериментальных данных о фотоядерных реакциях на различных мишенях с $Z = 72$ (гафний) в широком диапазоне энергий тормозных γ -квантов имеют важное фундаментальное значение.

В то же время данные о сечениях реакций с вылетом протона на природном гафнии и его изотопах имеют и большое прикладное значение. Методика лечения опухолей костных тканей и внутренних органов радиофармацевтическими препаратами на основе радионуклида ^{177}Lu является одной из но-

вейших разработок в области ядерной медицины. Низкая энергия β -излучения ($E^{max} = 0.497$ МэВ) обеспечивает небольшую проникающую способность и соответственно локальность терапии. В связи с этим ^{177}Lu представляет менее токсичную альтернативу радионуклида ^{90}Y , что отражается в меньшей дозовой нагрузке на пациента и возможности повторения циклов терапии. Эти свойства в сочетании с периодом полураспада 6.71 сут. позволяют достигать хорошего паллиативного и радиотерапевтического эффекта при относительно низкой миелотоксичности [3]. В настоящее время изотоп ^{177}Lu производят, в основном, методом облучения нейтронами мишеней из высокообогащенного ^{176}Lu , при этом обогащение по ^{176}Lu из природной смеси изотопов должно быть не менее 82%. Получение ^{177}Lu в реакции $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$ приводит к наличию химически неотделимых примесей редкоземельных элементов как стабильного исходного ^{176}Lu , так и долгоживущего ^{177m}Lu , что ухудшает радиохимическую чистоту получаемого радиофармпрепарата. Этих неотделимых примесей можно избежать, используя реакцию $^{176}\text{Yb}(n, \gamma)^{177}\text{Yb}$, далее ^{177}Yb с $T_{1/2} = 1.9$ ч превращается в ^{177}Lu . В таком случае необходима процедура отделения Lu от Yb, что связано с определенными методическими трудностями [4]. Поэтому исследование альтернативных каналов получения этого перспективного медицинского изотопа является важной и актуальной задачей.

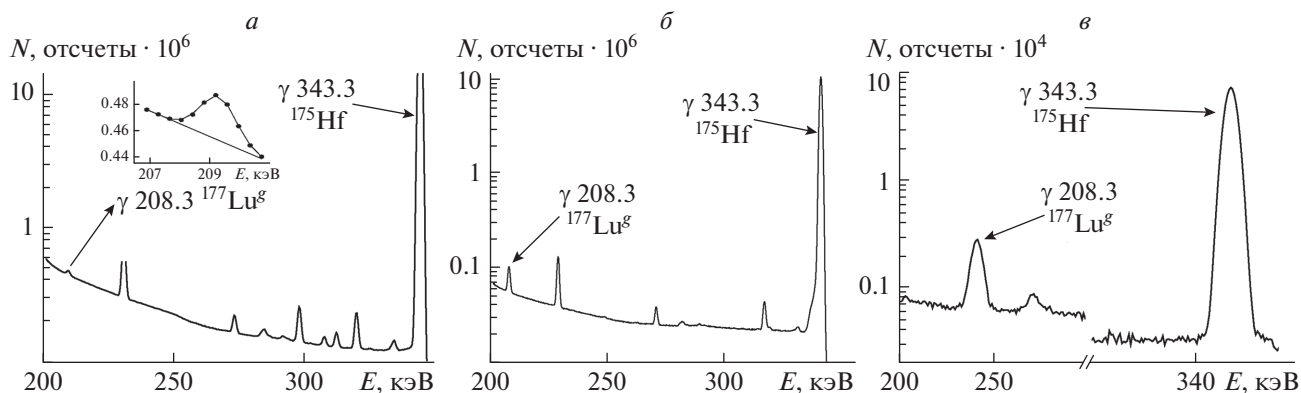


Рис. 1. Фрагменты γ -спектра мишени естественного Hf облученной тормозными γ -квантами с $E^{max} = 17.5$ МэВ (а), $E^{max} = 37$ МэВ (б) и $E^{max} = 55$ МэВ (в).

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились с использованием гамма-активационных методов. Была проведена серия облучений мишеней металлического и порошкообразного гафния, как природного изотопного состава, так и обогащенного порошкообразного гафния по ^{179}Hf и ^{180}Hf на линейных ускорителях электронов и микротронах. Облучение мишеней проводилось на тормозных γ -пучках для электронов с энергией E^{max} 17.5, 20, 37 и 55 МэВ. Продолжительность облучения образцов в разных экспериментах составляла от 40 мин до 8 ч.

При облучении $E^{max} = 17.5$ МэВ мишень представляла собой порошок $^{nat}\text{HfO}_2$, весом 8.85 г, засыпанная в алюминиевую цилиндрическую емкость высотой 8 мм и диаметром 2 см. При $E^{max} = 20$ и 37 МэВ мишени состояли из прямоугольных полос металлического гафния размерами $3 \times 4 \times 3.5$ мм, весом около 540 мг и $3 \times 6 \times 2.4$ мм и весом около 570 мг, соответственно. При $E^{max} = 55$ МэВ облучались, как мишень гафния естественного изотопного состава в виде прямоугольной полосы размером $4 \times 5 \times 0.7$ мм и весом около 180 мг, так и обогащенные мишени, которые представляли собой порошки $^{179}\text{HfO}_2$ ($^{179}\text{Hf} - 73.7\%$) и $^{180}\text{HfO}_2$ ($^{180}\text{Hf} - 94.3\%$), засыпанные в полиэтиленовые пакеты размерами $0.8 \times 0.9 \times 0.3$ см, вес 350 мг и $1 \times 1 \times 0.3$ см вес 390 мг, соответственно. Для оценки потока тормозных γ -квантов при $E^{max} = 55$ МэВ и $E^{max} = 20$ МэВ, использовалась хорошо изученная ядерная реакция $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ [5]: вместе с гафнием располагались мишени металлического естественного тантала размером $2 \times 2 \times 0.01$ см, весом 0.656 г и $1 \times 1 \times 0.043$ см, весом 0.7 г, соответственно. При $E^{max} = 17.5$ МэВ для оценки потока тормозных γ -квантов использовалась реакция $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$, хорошо изученная в этом энергетическом диапазоне [6], а при $E^{max} = 37$ МэВ для оцен-

ки потока использовались реакции $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174}\text{Lu}$ и $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$, также хорошо изученные в исследуемом энергетическом диапазоне [7].

Спектры гамма-лучей облученных мишеней измерялись на гамма-спектрометрах, собранных на базе сверхчистых полупроводниковых детекторов фирм Canberra и Ortec с эффективностью регистрации 15–40% по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами $3' \times 3'$. Энергетическое разрешение спектрометров составило 1.2 кэВ на γ -линии 343 кэВ ^{175}Hf и 1.8–2.0 кэВ на γ -линиях 1173, 1332 кэВ ^{60}Co .

Регистрация активности ^{177}Lu проводилась по γ -линии 208 кэВ. Фрагменты измеренных γ -спектров приведены на рис. 1, 2. Обработка γ -спектров проводилась с помощью программы Winspectrum [8]. Эффективность регистрации γ -квантов распада была определена с помощью стандартных калибровочных источников $^{152, 154}\text{Eu}$ и ^{133}Ba .

Для определения взвешенных по спектру интегралов сечений (Y^{int}) реакций необходимо знать потоки тормозных γ -квантов на мишенях. Для их получения при $E^{max} = 17.5$ МэВ определялись площади фотопиков γ -линии 343.4 кэВ, которая соответствует распаду ^{175}Hf (см. рис. 1) и взвешенный по спектру интеграл сечения реакции $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$. При $E^{max} = 55$ МэВ и $E^{max} = 20$ МэВ определялись интенсивности γ -линий 93.3 и 103.6 кэВ, сопровождающие распад ^{180}Ta и взвешенный по спектру интеграл сечения реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$. При $E^{max} = 37$ МэВ определение потока проводилось с помощью измерения активности ^{174}Lu ($T_{1/2} = 3.31$ г., $\gamma 76.5$ кэВ), ^{173}Lu ($T_{1/2} = 1.37$ г., $\gamma 272$ кэВ) и данных об взвешенных по спектру интегралах сечений реакций $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174}\text{Lu}$ и $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$.

Взвешенные по спектру интегралы сечений реакций на мониторинговых мишенях $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174}\text{Lu}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$, $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$ и $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$

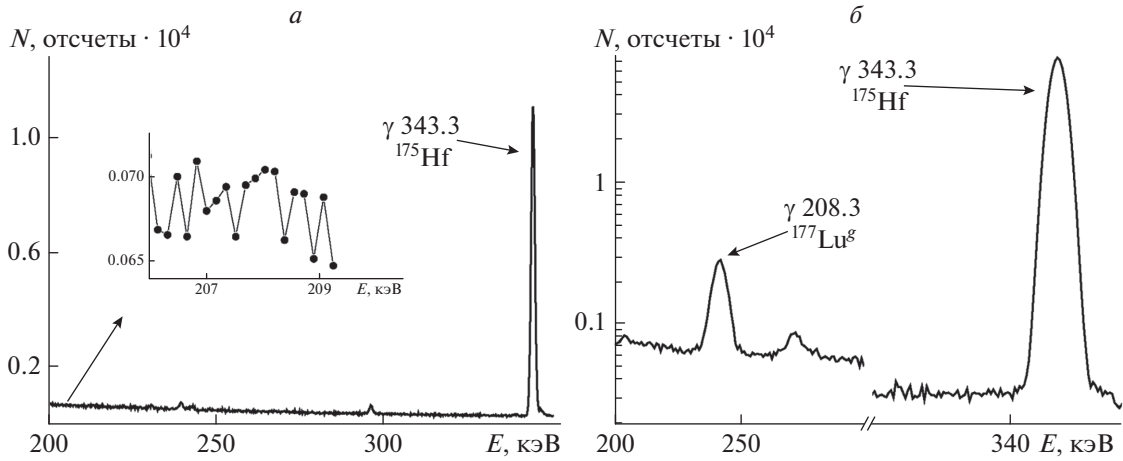


Рис. 2. Фрагменты γ -спектра мишени ^{179}Hf облученной тормозными γ -квантами с $E^{\text{max}} = 20$ МэВ (а) и $E^{\text{max}} = 55$ МэВ (б).

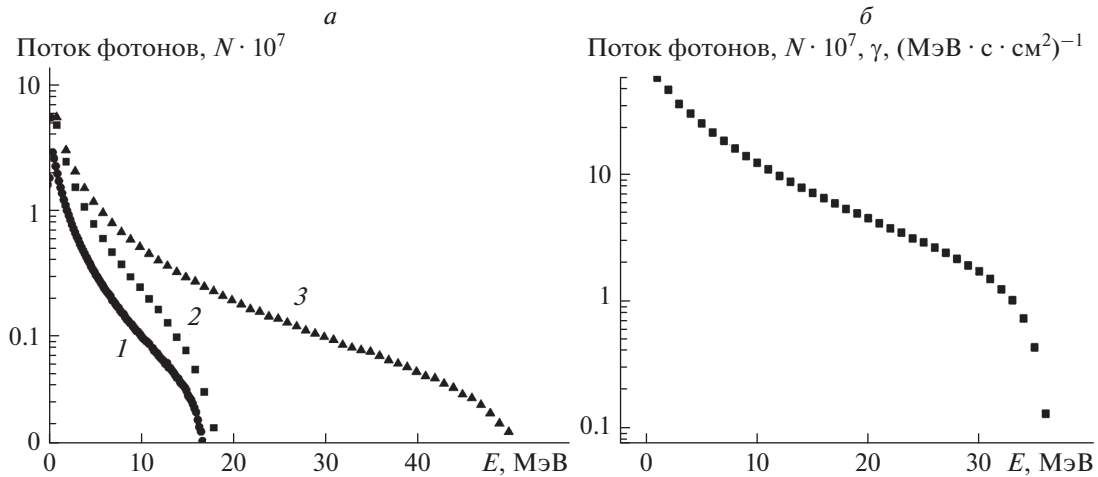


Рис. 3. Смоделированный спектр тормозных γ -квантов для величин энергии электронов: 1 – 17.5, 2 – 20, 3 – 55 МэВ (а), смоделированный спектр тормозных γ -квантов при $E^{\text{max}} = 37$ МэВ из [11] (б).

определялись в результате свертки табличных значений сечения этих реакций для монохроматических γ -квантов с шагом 1 МэВ с относительными величинами моделированного в Geant4 [9] спектра тормозных γ -квантов (см. рис. 3) по формуле, бн · МэВ:

$$Y_{\text{инт}} = \sum_{i=1}^N \sigma_i \varphi_i, \quad (1)$$

где σ_i – табличные значения сечений реакций на мониторных мишенях для монохроматических γ -квантов [5–7]; φ_i – относительные величины потока, моделированного в Geant4 [9] спектра тормозных γ -квантов, приведенные к пороговым величинам реакций на мониторных мишенях. При облучении геометрия мишеней учитывается в са-

мом программном коде Geant4, т.е. учитывается ослабления потока для низкоэнергетических тормозных гамма-квантов. В нашем случае этими поправками можно пренебречь, вследствие высоких пороговых энергий тормозных гамма-квантов для исследуемых реакций.

После этого рассчитывались потоки тормозных γ -квантов по формуле, $n_{\gamma} \cdot (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1})$:

$$F = \frac{S \lambda A}{(1 - e^{-\lambda_{\text{обл}}}) e^{-\lambda_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{изм}}}) \xi k \eta Y_{\text{инт}} N_A t p}, \quad (2)$$

где S – площади фотопиков, соответствующих распадам ^{180}Ta , ^{175}Hf , $^{174g,173}\text{Lu}$; η – квантовые выходы γ -квантов при распаде ^{180}Ta , ^{175}Hf , $^{174,173}\text{Lu}$; ξ – эффективности регистрации γ -квантов, сопровождающих распад ядер продуктов реакций

Таблица 1. Экспериментальные взвешенные по спектру интегралы сечений ($Y^{\text{инт}}$) и средневзвешенные ($\langle\sigma\rangle$) сечения получения ^{177}Lu

Реакция	Энергия E^{max} , МэВ	$Y^{\text{инт}}$, мкб · МэВ			$\langle\sigma\rangle$, мкб
		Эксперимент	TALYS	EMPIRE	Эксп.
$^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$	17.5	2480 ± 250	3.5	2.6	590 ± 60
	20	5760 ± 800	6.5	8.2	1360 ± 190
$^{\text{nat}}\text{Hf}(\gamma, pxn)^{177}\text{Lu}$	37	4470 ± 700	374	—	450 ± 70
	55	2200 ± 400	480	—	200 ± 30
$^{179}\text{Hf}(\gamma, pn)^{177}\text{Lu}$	55	1320 ± 150	866	—	120 ± 20
$^{180}\text{Hf}(\gamma, p2n)^{177}\text{Lu}$		20 ± 5	0.7	0.24	1.7 ± 0.5

на мониторинговых мишенях; $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{охл}}$, $t_{\text{изм}}$ — времена облучения, охлаждения и измерения, соответственно (с); k — коэффициенты самопоглощения γ -квантов распада. Они рассчитываются после моделирования реальных облучаемых мишеней в программном коде MCNP [10]. Рассчитывается эффективность регистрации нужных γ -линий для точечной (ϵ_r) и реальной (ϵ_p) мишеней и вводится поправка на самопоглощение $k = \epsilon_p/\epsilon_r$. При этом эффективность регистрации для точечной мишени совпадает с экспериментальной, полученной с помощью калибровочных точечных источников; p — абсолютное содержание ^{181}Ta , ^{176}Hf , ^{175}Lu в естественной смеси; $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ — число

Авогадро (количество ядер $\cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$); $Y^{\text{инт}}$ — взвешенные по спектру интегралы сечений реакций $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174g}\text{Lu}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$ и $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$ рассчитанные согласно (1) (мбн \cdot МэВ); m — массы мишеней тантала, лютеция и гафния на единицу площади ($\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$); $A = 181, 176, 175$ — массовые числа атомов тантала, гафния и лютеция (а. о. м.); λ — постоянные распада ^{180}Ta , ^{175}Hf , ^{174}Lu и ^{174}Lu (с^{-1}).

Величины λ , α , A , p берутся из [11]; S — из экспериментальных γ -спектров, а ξ — из калибровочных кривых, дополнительно проверенных с помощью моделирования с использованием программного кода Geant4.

Далее по формуле (2), используя эти данные и поправки на разницу энергетических порогов и кулоновских барьеров исследуемых реакций и реакций на мониторах рассчитывались $Y^{\text{инт}}$ реакций $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ при $E^{\text{max}} = 17.5$ и 20 МэВ, $^{\text{nat}}\text{Hf}(\gamma, pxn)^{177}\text{Lu}$ при $E^{\text{max}} = 37$ МэВ и $^{\text{nat}}\text{Hf}(\gamma, pxn)^{177}\text{Lu}$, $^{179}\text{Hf}(\gamma, pn)^{177}\text{Lu}$ и $^{180}\text{Hf}(\gamma, p2n)^{177}\text{Lu}$ при $E^{\text{max}} = 55$ МэВ. Результаты приведены в табл. 1.

В последнем столбце таблицы приведены экспериментальные средневзвешенные сечения наработки ^{177}Lu , которые рассчитывались также согласно форм. (2), в которой поток тормозных γ -квантов

F был заменен на интегральный поток. Он, в свою очередь, был получен для средневзвешенных сечений $\langle\sigma^{\text{мон}}\rangle$ реакций на мониторах, рассчитанных по формуле (2) [12]:

$$\langle\sigma^{\text{мон}}\rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^N \varphi} \quad (3)$$

Обозначение физических величин в формуле (3) аналогично формуле (1). В работе [12] приведено детальное описание этой методики.

Экспериментальные величины взвешенных по спектру интегралов сечения и средневзвешенные сечения для $^{\text{nat}}\text{Hf}$ рассчитывались с учетом того, что 76% атомов разных изотопов гафния могут приводить к образованию ^{177}Lu при $E^{\text{max}} = 55$ и 37 МэВ и лишь ^{178}Hf (27%) при $E^{\text{max}} = 17.5$ и 20 МэВ.

Статистическая погрешность в наших измерениях составила менее 5%. В то же время моделирование спектра тормозных γ -квантов достаточно сложная задача, т. к. при облучении использовались разные по размерам и массам сборки. Наша оценка погрешности за счет формы тормозного γ -спектра составила около 10%. Для оценки систематической погрешности измерения проводились на разных спектрометрах, в таблице указана общая погрешность.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки механизмов протекания исследуемых ядерных реакций нами проведено моделирование этих процессов с использованием программных кодов TALYS-1.9 и EMPIRE-3.2. Более детально о моделировании с помощью этих кодов изложено в [13, 14], в них учитываются доминирующие статистические и предравновесные процессы.

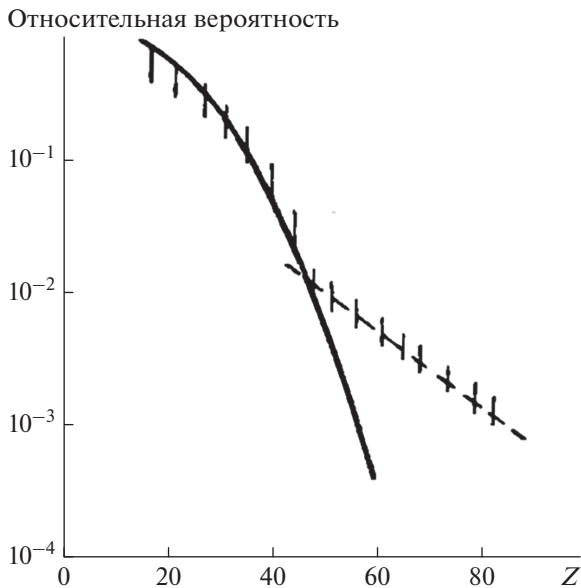


Рис. 4. Зависимость относительной вероятности испускания протонов от Z [15, 16] сплошная кривая — статистический канал возбуждения, штриховая кривая — прямой канал возбуждения.

При теоретических расчетах определяются сечения для каждого изотопа отдельно с шагом 1 МэВ для монохроматических γ -квантов и далее с учетом содержания этого изотопа определяется сечение для ^{nat}Hf , а потом по (1) и (3) рассчитываются взвешенные по спектру интегралы сечений и средневзвешенные сечения, соответственно.

Результаты наших расчетов приведены в табл. 1. Как видно вклад этих процессов в (γ, p) -реакцию в области максимальной энергии 20 МэВ не превышает 0.2–0.3%. Отметим, что вклад (γ, pn) -реакции при $E^{max} = 20$ МэВ нами не обнаружен (см. рис. 2а), т.е. активность ^{177}Lu при такой энергии тормозных γ -квантов обусловлена только реакцией (γ, p) . Это полностью совпадает с оценками вклада статистического канала в (γ, p) -реакции, выполненными в работах [15, 16] для тормозных γ -квантов с $E^{max} = 23$ МэВ. На рис. 4 приведены статистические (сплошная линия) и прямые (штриховая линия) расчеты. Из этих соотношений мы можем оценить, что в этой области Z вероятность прямых реакций на порядок больше, чем статистические процессы, из этих данных было оценено, что $Y^{инт} \approx 3$ мбн · МэВ для прямого канала (γ, p) -реакции. Это согласуется с нашими значениями в этой области энергии. Поэтому можно сделать вывод о доминировании прямого канала в (γ, p) -реакции в области максимума гигантского дипольного резонанса. Совсем иная ситуация в более высокой области энергий. Из данных о вкладе (γ, pn) -канала при $E^{max} = 55$ МэВ можно оценить, что выходы (γ, p) -реакции при 37

и 55 МэВ составляют 14 мб · МэВ и 12 мб · МэВ, соответственно. Они получены при замене в (2) $p = 0.76$ на $p = 0.273$ (абсолютное содержание ^{178}Hf в естественной смеси) с учетом формы тормозного спектра и вычета вкладов (γ, pn) и $(\gamma, p2n)$ -каналов. В этом случае вклад статистических и предравновесных каналов увеличивается и достигает для (γ, pn) -реакции 50% (см. табл. 1). На наш взгляд это указывает на больший вклад высокоспиновых состояний в этой области энергий, т. к. прямые реакции, как правило, приводят к возбуждению низкоспиновых состояний.

Из наших данных следует, что в естественной смеси вклад (γ, p) -реакции больше в (1.5–2) раза чем вклад (γ, pn) -реакции. Некоторое расхождение этих данных с оценками работы [17], на наш взгляд, связано с тем, что в [17] оценки делались на основе расчетов в коде Talys, в котором не учитывается вклад прямого канала. Отметим, что и наши расчеты, проведенные с помощью кода Talys-1.9, также дают заниженные оценки по сравнению с экспериментом (см. таблицу). Наши данные о наработке ^{177}Lu при $E^{max} = 20$ МэВ указывают на то, что прямые реакции увеличивают взвешенные по спектру интегралы сечения при $E^{max} = 55$ МэВ как минимум в 2 раза и учет этого вклада позволяет приблизить расчетные значения сечений к экспериментальным данным. В работе [18] получен выход реакции $^{nat}\text{Hf}(\gamma, pxn)^{177}\text{Lu}$, равный 610 ± 60 мкбн при $E^{max} = 40$ МэВ, а наше средневзвешенное сечение (выход) этой реакции 450 ± 70 мкбн при $E^{max} = 37$ МэВ. С учетом увеличения вклада (γ, pn) -канала при увеличении E^{max} , на наш взгляд, совпадение хорошее. Нами проводились также измерения долгоживущего изомера ^{177m}Lu , и были получены оценки, что вклад активности ^{177m}Lu не превышает 0.01% при облучении мишеней на протяжении 7–10 дней. Эта оценка не противоречит оценке вклада ^{177m}Lu , полученной в [17].

Как уже обсуждалось во введении, данные об активации ^{177}Lu представляет большой практический интерес для исследования альтернативных каналов получения ^{177}Lu для производства радиофармпрепаратов. Нами рассчитана активация ^{177}Lu при облучении мишеней из природного гафния тормозными гамма-квантами с максимальной энергией 37 и 55 МэВ. Выход ^{177}Lu оказался равным $7.6 \cdot 10^4$ и $16 \cdot 10^4$ Бк · г $^{-1}$ · мкА $^{-1}$ при облучении мишеней в течении одного часа. В работе [17] отмечается, что при облучении мишени весом 10 г из естественного Hf током 0.1 мА в течении 10 суток нарабатывается несколько сотен мКи активности ^{177}Lu . Из наших данных получено, что при подобных условиях облучения нарабатывается 650 мКи активности ^{177}Lu . В настоящее время в ядерной медицине используются источники ^{177}Lu активностью

около 27 мКи. Приведенные величины показывают перспективность использования микротронов и линейных ускорителей для производства ^{177}Lu , особенно при использовании обогащенных мишеней гафния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые измерены интегральные и средневзвешенные сечения (выходы) ядерных реакций $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ при $E^{max} = 17.5$ и 20 МэВ, $^{nat}\text{Hf}(\gamma, pxn)^{177}\text{Lu}$ при $E^{max} = 37$ МэВ и $^{nat}\text{Hf}(\gamma, pxn)^{177}\text{Lu}$, $^{179}\text{Hf}(\gamma, pn)^{177}\text{Lu}$, $^{180}\text{Hf}(\gamma, p2n)^{177}\text{Lu}$ при $E^{max} = 55$ МэВ.

Результаты моделирования в рамках программных кодов TALYS-1.9 и EMPIRE-3.2 демонстрируют доминирование нестатистических процессов в (γ, p) -реакции, однако с ростом энергии тормозных γ -квантов вклад статистических и предравновесных процессов увеличивается на 1–2 порядка и начинает вносить значительный вклад в сечение (γ, p) -реакции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гангерский Ю.П., Мазур В.М. // ЭЧАЯ. 2002. Т. 33. № 3. С. 158.
2. Ditrich S., Berman B. // Atom. Data Nucl. Data Tabl. 1988. V. 38 № 2. P. 199.
3. De Jong M., Breeman W.A., Valkema R. et al. // J. Nucl. Med. 2005. V. 46. № 1. Art. № 13S.
4. Dash A., Pillai M.R., Knapp F.F. Jr. // Nucl. Med. Mol. Imaging. 2015. V. 49. № 2. P. 85.
5. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. и др. // ЯФ. 2013. Т. 76. № 11. С. 1484; Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2013. V. 76. P. 1403.
6. Горячев А.М., Залесный Г.Н. // ЯФ. 1977. Т. 26. С. 465; Goryachev A.M., Zalesnyy G.N. // Sov. J. Nucl. Phys. 1977. V. 26. P. 246.
7. <https://www.nds.iaea.org/exfor/servlet/X4sMakeX4>.
8. Strilchuk N.V. The WinSpectrum manual. Kiev, 2000. 128 p.
9. Agostinelli S., Allison J.R., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250.
10. Briesmeister J.F. MCNP—a general Monte Carlo n-Particle transport code. Los Alamos Nat. Lab. Rep. LA-12625-M, 1997. 989 p.
11. Firestone R.B. Table of isotopes. 8th ed. New York: Wiley Intersci., 1996.
12. Naik H., Kim G.N., Kapote R. et al. // Eur. Phys. J. 2016. V. A52. Art. № 19513.
13. Koning J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. // Proc. Int. Conf. Nucl. Data Sci. Techn. (Santa Fe, 2004). P. 1154.
14. Herman M., Capote R., Carlson B.V. et al. // Nucl. Data Sheets. 2007. V. 108. P. 2655.
15. Weinstock E.V., Halpern J. // Phys. Rev. 1954. V. 94. P. 1651.
16. Wilkinson D.H. // Phys. 1956. V. 22. P. 1039.
17. Kazakov A.G., Belyshev S.S., Ekatova T.Y. et al. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2018. V. 317. P. 1469.
18. Danagulyan A.S., Hovhannisyanyan G.H., Bakhshiyanyan T.M. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. P. 447.