

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ K -ИЗОМЕРОВ $^{179m2}\text{Hf}$ И ^{180m}Hf В (γ, γ') -РЕАКЦИЯХ

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

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.; после доработки 25.12.2019 г.; принята к публикации 25.12.2019 г.

Впервые измерены средневзвешенные сечения заселения $^{179m2}\text{Hf}$ и ^{180m}Hf в (γ, γ') -реакциях при граничных значениях энергии тормозных γ -квантов 17,5, 37 и 55 МэВ. Обнаружен второй максимум в функции возбуждения K -запрещенных изомеров ^{179}Hf и ^{180}Hf в области энергий 20–35 МэВ. Проведено моделирование в рамках модели предравновесных процессов и статистической модели с использованием программных кодов TALYS-1.9 и EMPIRE-3.2. Показано, что интегральные сечения (γ, γ') -реакции в области энергий 20–55 МэВ описываются в статистическом пределе модели составного ядра (код TALYS-1.9).

DOI: 10.31857/S0044002720040200

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование сечений возбуждения высокочастотных изомеров является одним из актуальных направлений для понимания механизмов ядерных реакций. При возбуждении таких изомерных состояний в разных реакциях могут проявляться различные вклады статистических и нестатистических каналов реакций. Изомеры $^{179,180}\text{Hf}$ являются особенно интересными объектами, так как эти K -запрещенные изомеры ($\Delta K = 8$) имеют $I^\pi = 25/2^-$ и 8^- соответственно.

Особый интерес вызывает исследование (γ, γ') -реакций на этих ядрах. Это обусловлено тем, что на ядрах $^{179,180}\text{Hf}$ открывается определенная возможность обнаружения второго резонанса в функции возбуждения (γ, γ') -реакций. Как известно, в области изолированных возбужденных состояний упругое рассеяние фотонов представляет собой упругий процесс, аналогично упругому рассеянию нуклонов. Такое упругое рассеяние конкурирует с неупругим рассеянием, а при большей энергии фотонов — и с испусканием частиц. В области гигантского дипольного резонанса (ГДР) происходит рост сечения поглощения σ , поэтому сечение упругого рассеяния может иметь один максимум

в области испускания частиц, а другой — в области ГДР [1]. Оценки, выполненные в работе [2], дают порядок величины соотношения $\sigma(\gamma, \gamma')/\sigma \sim \Gamma_\gamma N_\gamma / \Gamma_n N_n$, где Γ_γ / Γ_n — отношение радиационной и частичной ширины уровня ядра, по порядку величины равно постоянной тонкой структуры для энергии возбуждения в области ГДР. Отношение числа конечных уровней в области 20 МэВ для тяжелых ядер может оказаться близко и/или больше 1. Таким образом сечение $\sigma(\gamma, \gamma') \sim 10^{-2} \sigma$ и для ядер гафния $\sigma(\gamma, \gamma') = 1$ мбн. Для резонансных γ -квантов измерение таких сечений является не очень сложной задачей. Однако экспериментальное неупругое рассеяние фотонов изучается на ядрах, у которых (γ, γ') -реакция приводит к образованию долгоживущего изомера. Поскольку в качестве источника γ -квантов преимущественно используется тормозное излучение с непрерывным распределением γ -квантов от граничной энергии ($E_{\text{гр}}$), фактически в эксперименте измеряются интегральные сечения. Причем при измерениях с тормозными γ -квантами в области высоких энергий интегральные сечения состоят из суммы двух резонансов. С учетом распределения тормозных γ -квантов вклад второго резонанса, если он соизмерим с первым, очень сложно выделить по выходу изомера. Классическим ядром для изучения (γ, γ') -реакции является ^{115}In , для которого выход этой реакции в максимуме составляет ~ 1 мбн. Такой же выход ожидается и в области высоких энергий, поэтому сложно обнаружить влияние второго резонанса на активацию изомера. Нами предлагается исследование влияния второго резонанса на при-

¹⁾Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия.

²⁾Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина.

³⁾ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А. И. Бурназяна ФМБА, Москва, Россия.

*E-mail: zhelton@yandex.ru

Таблица 1. Параметры ускорителей электронов

Установка	Рабочая энергия пучка на выходе	Средний рабочий ток пучка на выходе	Организация, страна
Импульсный разрезной микротрон	55 МэВ	45 нА	НИИЯФ МГУ, Россия
Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-50	37 МэВ	3.5 мкА	ННЦ ХФТИ, Украина
Varian Trilogy	20 МэВ	1 мкА	ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А. И. Бурназяна ФМБА, Россия
Микротрон М-30	17.5 МэВ	2 мкА	ИЭФ НАНУ, Украина

мере активации K -запрещенных изомерных состояний. В работе [3] экспериментально показано, что сечение активации в области первого резонанса $^{180m}\text{Hf} \approx 10^{-5}$ мбн, т.е. его вклад может оказаться несущественным, если вышеприведенные оценки второго резонанса близки к реальным величинам.

Отметим, что ранее исследование выхода (γ, γ') -реакции в высокоэнергетической области было выполнено в работе [4] для тормозных γ -квантов с граничной энергией 20 МэВ. Был получен выход (γ, γ') -реакции на три порядка выше, чем в области первого резонанса.

Исходя из вышесказанного целью нашей работы является исследование механизма возбуждения ядер $^{179m2}\text{Hf}$ и ^{180m}Hf в (γ, γ') -реакциях в области энергий тормозных γ -квантов 17.5–55 МэВ путем измерения сечений этих реакций.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение сечений проводилось методом наведенной активности на тормозных γ -пучках для электронов с величиной энергии 17.5, 20, 37 и 55 МэВ (характеристики установок приведены в табл. 1). Было проведено несколько серий облучений и измерений. Продолжительность облучения образцов составляла 1–8 ч.

Мишени изготавливали как из металлического и порошкообразного гафния природного изотопного состава, так и из обогащенного порошкообразного гафния. Облучаемая при $E_{\text{гр}} = 17.5$ МэВ мишень представляла собой порошок $^{\text{nat}}\text{HfO}_2$ весом 8.85 г, засыпанный в алюминиевую цилиндрическую емкость диаметром 2 см и высотой 8 мм. При $E_{\text{гр}} = 20$ и 37 МэВ мишени состояли из прямоугольных полос металлического гафния размерами $3 \times 4 \times 3.5$ мм³ и весом около 540 мг и $3 \times 6 \times 2.4$ мм³ и весом около 570 мг соответственно. При $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ облучались как мишень гафния естественного изотопного состава

в виде прямоугольной полосы размером $4 \times 5 \times 0.7$ мм³ и весом около 180 мг, так и обогащенные мишени, которые представляли собой порошки $^{179}\text{HfO}_2$ (^{179}Hf — 73.7%) и $^{180}\text{HfO}_2$ (^{180}Hf — 94.3%), засыпанные в полиэтиленовые пакеты размерами $0.8 \times 0.9 \times 0.3$ см³, весом 350 мг и $1 \times 1 \times 0.3$ см³, весом 390 мг соответственно. Для расчета потока тормозных γ -квантов при $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ и $E_{\text{гр}} = 20$ МэВ использовалась хорошо изученная ядерная реакция $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ [5]. Для этого вместе с гафнием располагались мишени металлического естественного тантала квадратной формы размером $2 \times 2 \times 0.01$ см³, весом 0.656 г и $1 \times 1 \times 0.043$ см³, весом 0.7 г соответственно. При $E_{\text{гр}} = 17.5$ МэВ для расчета потока использовалась реакция $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$, хорошо изученная в этом энергетическом диапазоне [5], при 20 МэВ — реакция $^{174}\text{Hf}(\gamma, n)^{173}\text{Hf}$, а при $E_{\text{гр}} = 37$ МэВ для расчета 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 [5].

Наведенную активность измеряли γ -спектрометрами на базе HPGe-детекторов с эффективностью регистрации 15–40% по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами $3' \times 3'$ и энергетическим разрешением 1.8–2 кэВ на γ -линиях ^{60}Co .

Обработка γ -спектров проводилась с помощью программы Winspectrum [5]. Эффективность регистрации γ -квантов распада была определена с помощью стандартных калибровочных источников $^{152,154}\text{Eu}$ и ^{133}Ba .

Для определения средневзвешенных сечений ($\sigma^{\text{ср}}$) реакций нужно знать средневзвешенные потоки тормозных γ -квантов на мишенях. Для их получения при $E_{\text{гр}} = 17.5$ и 20 МэВ определялись площади фотопиков γ -линий 297 и 343.4 кэВ, которые соответствуют распаду ^{173}Hf и ^{175}Hf соответственно, и средневзвешенное сечение реакции $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$. При $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ

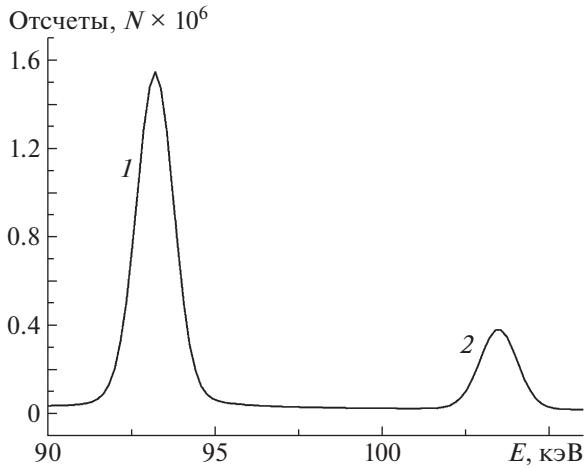


Рис. 1. Фрагменты γ -спектра танталовой мишени, облученной тормозными γ -квантами при $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ, время измерения на спектрометре — 14645 с. Кривые (соответствующие распаду ^{180}Ta): 1 — γ -линия 93.3 кэВ, 2 — γ -линия 103.6 кэВ.

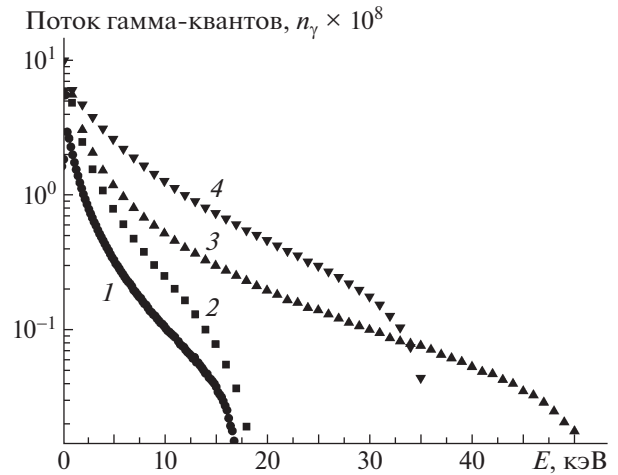


Рис. 2. Смоделированный с использованием программного кода Geant4 спектр тормозных γ -квантов для разных величин энергии электронов: 1 — для $E_{\text{гр}} = 17.5$ МэВ, 2 — для $E_{\text{гр}} = 20$ МэВ, 3 — для $E_{\text{гр}} = 55$ МэВ, 4 — для $E_{\text{гр}} = 37$ МэВ.

определялись интенсивности γ -линий 93.3 и 103.6 кэВ, сопровождающие распад ^{180}Ta (см. рис. 1), и средневзвешенные сечения реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$. При $E_{\text{гр}} = 37$ МэВ определение средневзвешенного потока проводилось с помощью измерения активности ^{174}Lu ($T_{1/2} = 3.31$ г., $\gamma = 76.5$ кэВ) и ^{173}Lu ($T_{1/2} = 1.37$ г., $\gamma = 272$ кэВ) и данных о средневзвешенных сечениях реакций $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174}\text{Lu}$ и $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$.

Средневзвешенные сечения реакций на мониторах $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174}\text{Lu}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$, $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$ и $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ определялись в результате свертки табличными их значениями для монохроматических γ -квантов с шагом 1 МэВ и с относительными величинами моделированного в Geant4 [6] спектра тормозных γ -квантов (см. рис. 2):

$$\sigma_{\text{мон}}^c = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^N \varphi_i}, \quad (1)$$

где σ_i — табличные значения сечений реакций на мониторах для монохроматических γ -квантов [5]; φ_i — относительные величины потока, смоделированного в Geant4 спектра тормозных γ -квантов, приведенные к пороговым величинам реакций на мониторах.

После этого рассчитывались средневзвешенные

потоки F ($n_\gamma / (\text{см}^2 \text{ с МэВ})$) тормозных γ -квантов:

$$F = \frac{S \lambda A}{(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{п}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) \xi k \alpha \sigma_{\text{мон}}^{\text{cp}} N_A m p}, \quad (2)$$

где S — площади фотопиков, которые сопровождают распады ^{180}Ta , ^{175}Hf , $^{174g, 173}\text{Lu}$; α — квантовые выходы γ -квантов при распаде ^{180}Ta , ^{175}Hf , $^{174, 173}\text{Lu}$; ξ — эффективности регистрации γ -квантов, сопровождающих распад ядер продуктов реакций на мониторах; $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{п}}$, $t_{\text{изм}}$ — времена облучения, охлаждения и измерения соответственно (с); k — коэффициенты самопоглощения γ -квантов распада; p — абсолютное содержание ^{181}Ta , ^{176}Hf , ^{175}Lu в естественной смеси; $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ — число Авогадро в единицах ядер/(г моль); $\sigma_{\text{мон}}^{\text{cp}}$ — средневзвешенные сечения реакций $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174g}\text{Lu}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$, $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$ и $^{174}\text{Hf}(\gamma, n)^{173}\text{Hf}$, рассчитанные согласно (1); m — массы мишеней тантала, лютетия и гафния в г см^{-2} ; A — массовые числа атомов тантала, гафния и лютетия в а.е.м.; λ — постоянные распада этих ядер в с^{-1} .

Величины λ , k , α , A , p взяты нами из [7]; S — из экспериментальных γ -спектров, а ξ — из калибровочных кривых, дополнительно проверенных с помощью моделирования в Geant4.

Далее по формуле (2), используя полученные данные о потоках и поправки на разницу энергетических порогов, рассчитывались σ^{cp} реакций (γ, γ') на изотопах $^{179, 180}\text{Hf}$ и естественном гафнии, приводящих к активации K -изомеров в $^{179, 180}\text{Hf}$.

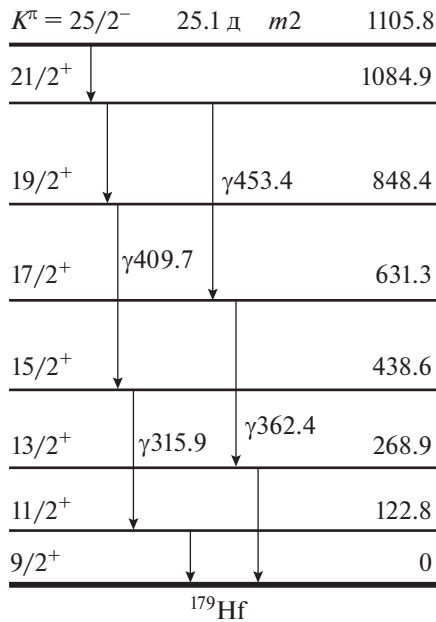


Рис. 3. Схема распада $^{179m2}\text{Hf}$.

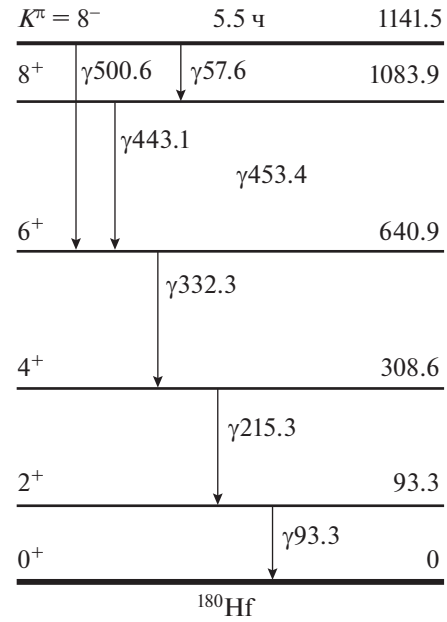


Рис. 4. Схема распада ^{180m}Hf .

Фрагменты схем распада $^{179m2}\text{Hf}$ и ^{180m}Hf приведены на рис. 3 и 4. Для получения средневзвешенных сечений заселения изомерных состояний $^{179m2}\text{Hf}$ и ^{180m}Hf определяли площади фотопиков γ -линий 453.6 и 443.2 кэВ соответственно (см. рис. 5 и 6). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Статистическая погрешность в наших измерениях была лучше чем 5%. В то же время моделирование спектра тормозных γ -квантов достаточно сложная задача, так как в облучениях использовались большие по размерам и массам сборки. Наша оценка погрешности за счет формы тормозного γ -спектра составила около 20%. Для оценки систематической погрешности измерения проводились на разных спектрометрах, в таблице указана общая погрешность.

Из экспериментальных γ -спектров мы определили сечение $\sigma^{\text{ср}}$ для $^{179m2}\text{Hf}$ и ^{180m}Hf :

$$\sigma^{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{мон}}^{\text{ср}} \lambda_{\text{м}} f_{\text{мон}}(t) \xi_{\text{мон}} k_{\text{мон}} \alpha_{\text{мон}} N_{\text{м}} A_{\text{м}} m_{\text{мон}} \varphi_{\text{мон}}}{\lambda_{\text{мон}} f_{\text{м}}(t) \xi_{\text{м}} k_{\text{м}} \alpha_{\text{м}} N_{\text{мон}} A_{\text{мон}} m_{\text{м}} \varphi_{\text{м}}}, \quad (3)$$

где

$$f_{\text{мон}}(t) = (1 - e^{-\lambda_{\text{мон}} t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda_{\text{мон}} t_{\text{п}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{мон}} t_{\text{изм}}}), \quad (4)$$

$$f_{\text{м}}(t) = (1 - e^{-\lambda_{\text{м}} t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda_{\text{м}} t_{\text{п}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{м}} t_{\text{изм}}}), \quad (5)$$

$\sigma_{\text{мон}}^{\text{ср}}$ — средневзвешенные сечения реакций на ядрах-мониторах, рассчитанные по (1); $N_{\text{м, мон}}$ — количество отсчетов под фотопиками, которые

сопровождают распад изомеров Hf (м) и ядер продуктов реакций на мониторах (мон); $\alpha_{\text{м, мон}}$ — выход γ -квантов, которые сопровождают распад изомеров Hf и продуктов реакций на мониторах соответственно; $\xi_{\text{м, мон}}$ — эффективность регистрации вышеупомянутых γ -квантов; $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{п}}$, $t_{\text{изм}}$ — время облучения, паузы и измерения соответственно, $k_{\text{м}}(k_{\text{мон}})$ — коэффициенты самопоглощения γ -квантов распада изомеров Hf (ядер — продуктов реакций на мониторах); $\varphi_{\text{м}}(\varphi_{\text{мон}})$ — абсолютное

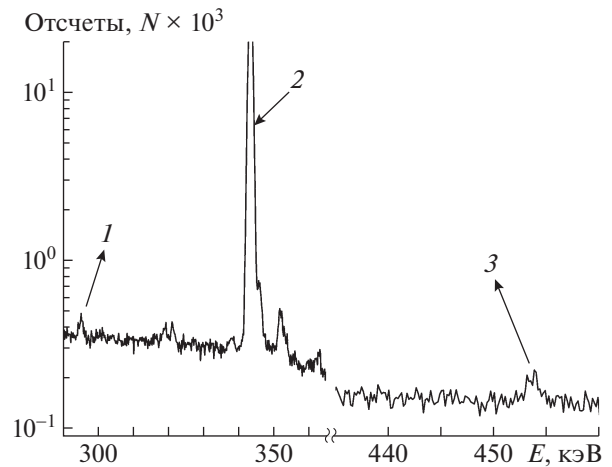


Рис. 5. Фрагмент γ -спектра облученной при $E_{\text{тр}} = 55$ МэВ мишени гафния, обогащенной по ^{179}Hf . Кривые: 1 — γ -линия 297.0 кэВ, соответствующая распаду ^{173}Hf ; 2 — γ -линия 343.4 кэВ, соответствующая распаду ^{175}Hf ; 3 — γ -линия 453.6 кэВ, соответствующая распаду $^{179m2}\text{Hf}$.

Таблица 2. Экспериментальные средневзвешенные (σ^{cp}) сечения наработки $^{179m2}\text{Hf}$ и ^{180}Hf

Реакция	Энергия $E_{гр}$, МэВ	σ^{cp} , мкбн		
		Эксп.	TALYS	EMPIRE
$^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179m2}\text{Hf}$	17.5	≤ 0.3	2.0	0.04
	20	3.8 ± 1.2	1.5	0.04
	37	≤ 1.3	2.6	0.013
	55	0.7 ± 0.1	2.2	0.012
$^{180}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{180m}\text{Hf}$	20	3.9 ± 0.4	2.2	0.03
	55	2.0 ± 0.3	3.1	0.03

содержание $^{179,180}\text{Hf}$ (ядер-мониторов) в природной смеси; A_m ($A_{мон}$) — массовые числа Hf (ядер-мониторов); λ_m ($\lambda_{мон}$) — постоянные распада ядер $^{179m2}\text{Hf}$, ^{180m}Hf (продуктов реакций на ядрах-мониторах); m_m ($m_{мон}$) — массы мишеней Hf (ядер-мониторов) в г см^{-2} .

Величины λ_i , k_i , α_i , φ_m , A_i были взяты из [7], N_i — из экспериментальных γ -спектров. Результаты расчетов по формуле (3) в пределах погрешности совпали с результатами расчетов по формуле (2).

Как видно из данных об интегральных сечениях для ^{179}Hf , ^{180m}Hf , в области энергий 20–35 МэВ наблюдается резонансное возбуждение К-изомеров. В этой области энергий сечение поглощения (σ) спадает до 10–20 мбн, т.е. сечение

(γ, γ')-реакции в области второго резонанса составляет величину $\sim 10^{-3}\sigma$. Такой результат качественно согласуется с оценками, приведенными в [2].

Для оценки механизмов протекания исследуемых ядерных реакций нами проведено моделирование этих процессов в рамках модели предравновесных процессов и статистической модели, реализованных в программных кодах TALYS-1.9 и EMPIRE-3.2. Более детально эти вопросы рассмотрены в [8, 9].

Результаты наших расчетов приведены в таблице. Как видно из таблицы, модельный подход, связанный с учетом статистических процессов в (γ, γ')-реакциях в области максимальной энергии 20–35 МэВ согласно кодам TALYS, описывает экспериментальные интегральные сечения. Более точное количественное описание достигается включением предравновесных процессов в расчеты интегральных сечений. Однако большие погрешности в интегральных сечениях (γ, γ')-реакций и отсутствие надежных экспериментальных данных о сечениях поглощения γ -квантов в этой области энергий делают оценки вклада предравновесных процессов не очень надежными. В целом можно сделать вывод о доминировании статистических процессов в (γ, γ')-реакции в области второго резонанса.

3. ВЫВОДЫ

Впервые измерены средневзвешенные сечения ядерных реакций $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179m2}\text{Hf}$, $^{180}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{180m}\text{Hf}$ при $E_{гр} = 17.5, 20, 37$ и 55 МэВ. Обнаружен второй резонанс функции возбуждения (γ, γ')-реакции в области энергий 20–35 МэВ.

Результаты моделирования в рамках модели составного ядра с использованием программного кода TALYS-1.9 демонстрируют доминирование статистических процессов в (γ, γ')-реакции в области

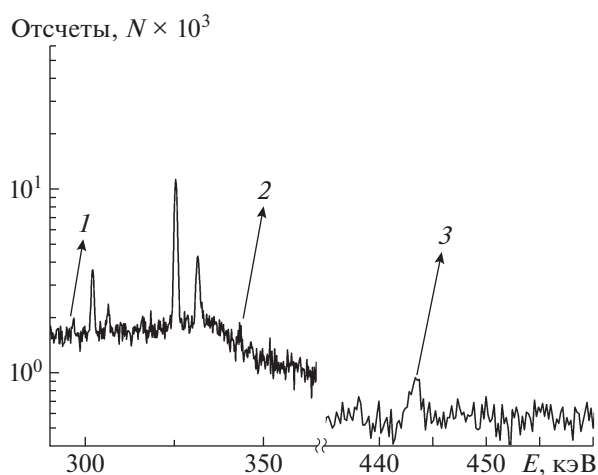


Рис. 6. Фрагмент γ -спектра облученной при $E_{гр} = 55$ МэВ мишени гафния, обогащенной по ^{180}Hf . Кривые: 1 — γ -линия 297.0 кэВ, соответствующая распаду ^{173}Hf ; 2 — γ -линия 343.4 кэВ, соответствующая распаду ^{175}Hf ; 3 — γ -линия 443.2 кэВ, соответствующая распаду ^{180m}Hf .

второго резонанса функции возбуждения (γ, γ')-реакции.

В заключение авторы высказывают большую благодарность С. С. Бельшеву, Е. Н. Лыковой, сотрудникам НИИЯФ МГУ за помощь в облучении мишеней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Экспериментальная ядерная физика*, под ред. Э. Серге (Изд-во иностр. лит., Москва, 1953), т. 1.
2. J. S. Levinger and H. A. Bethe, *Phys. Rev.* **78**, 115 (1950).
3. Z. N. Bigan, V. M. Mazur, and I. V. Sokolyuk, Preprint No. KIYaI-86-54, Institute for Nuclear Research (Kiev, 1986).
4. Н. А. Демехина, А. С. Данагулян, Г. С. Карапетян, *ЯФ* **64**, 1879 (2001) [*Phys. At. Nucl.* **64**, 1796 (2001)].
5. В. В. Варламов, Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, Н. Н. Песков, М. Е. Степанов, *ЯФ* **76**, 1484 (2013) [*Phys. At. Nucl.* **76**, 1403 (2013)].
6. S. Agostinelli *et al.* (GEANT4 Collab.), *Nucl. Instrum. Methods A* **506**, 250 (2003).
7. R. B. Firestone, *Table of Isotopes* (Wiley Intersci., New York, 1996).
8. J. Koning and J. P. Delaroche, *Nucl. Phys. A* **713**, 231 (2003).
9. M. Herman, R. Capote, B. V. Carlson, P. Obložinský, M. Sin, A. Trkov, H. Wienke, and V. Zerkin, *Nucl. Data Sheets* **108**, 2655 (2007).

INVESTIGATION OF THE EXCITATION OF $^{179m2}\text{Hf}$ AND ^{180m}Hf K ISOMERS IN (γ, γ') REACTIONS

V. A. Zheltonozhsky¹⁾, M. V. Zheltonozhskaya¹⁾,
A. N. Savrasov²⁾, A. P. Chernyaev¹⁾, V. N. Yatsenko³⁾

¹⁾ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²⁾ *Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, Kiev*

³⁾ *A. I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia*

For the first time, weighted average cross sections for the $^{179m2}\text{Hf}$ and ^{180m}Hf populations in (γ, γ') reactions were measured at the boundary energies of 17.5, 37, and 55-MeV bremsstrahlung gamma rays. A second maximum was found in the excitation function of the K -forbidden ^{179}Hf and ^{180}Hf isomers in the 20–35 MeV energy range. The simulation was carried out with the TALYS-1.9 and EMPIRE-3.2 program codes. It is shown the integral cross sections for (γ, γ') reactions in the 20–55 MeV energy range are described by the TALYS-1.9 code.