

# ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

С. Ю. Трощев

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

E-mail: sergey.troschiev@googlemail.com

## Введение

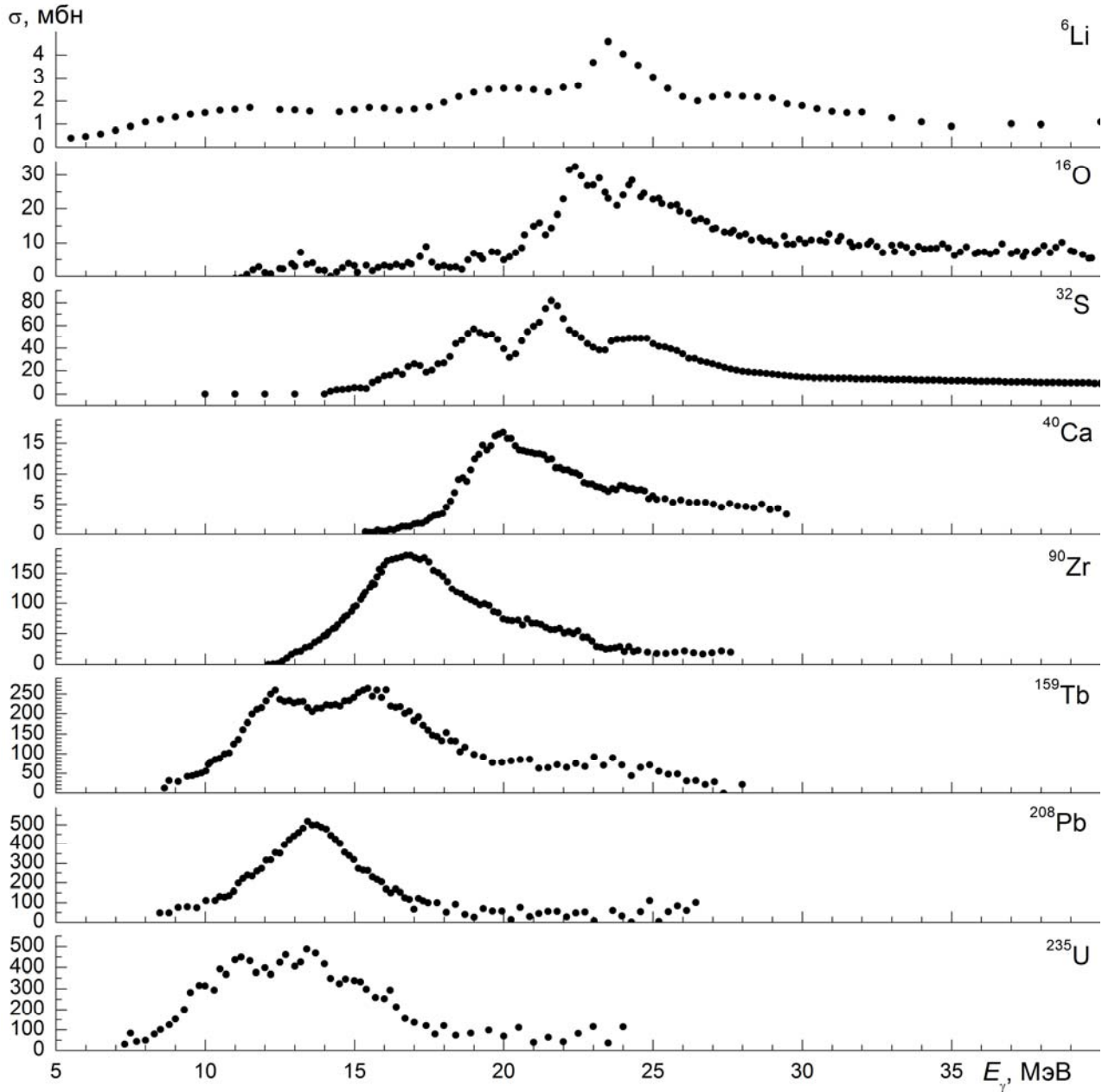


Рис. 1. Сечения фотопоглощения на ядрах  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{90}\text{Zr}$ ,  ${}^{159}\text{Tb}$ ,  ${}^{208}\text{Pb}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ .

Исследование взаимодействия фотонов с атомными ядрами продолжается несколько десятков лет, но, несмотря на это, многие принципиальные вопросы структуры и динамики атомных ядер остаются открытыми. Процесс возбуждения ДГР и его особенности: изоспиновое расщепление, конфигурационное расщепление, деформационное расщепление – исследованы сравнительно хорошо. Однако в области энергии на спаде ДГР ситуация изучена значительно хуже. Основная причина в том, что в этой

области энергии преобладает распад возбужденного состояния ядра с испусканием нескольких нейтронов. Традиционно фотоядерные реакции в области ДГР исследовались в экспериментах с использованием нейтронных детекторов. Из-за низкой эффективности одновременной регистрации нескольких частиц в конечном состоянии фотоядерные реакции при энергии  $E_\gamma \geq 20$  МэВ исследованы плохо, практически отсутствуют данные о реакциях с вылетом более трех нейтронов, а сечения реакций с вылетом двух нейтронов, измеренные в разных лабораториях, часто отличаются в 1.5–2 раза.

В настоящей работе изучаются фотоядерные реакции на пучках тормозных фотонов с энергией  $E_\gamma$  до 67.7 МэВ. При таких энергиях происходят реакции с вылетом до 7 нейтронов из ядра. Целью работы является получение новых экспериментальных данных о фотонуклонных реакциях на стабильных изотопах тантала, золота, ртути и свинца.

### Методика эксперимента

Эксперимент по исследованию фотоядерных реакций в области ДГР проводился по гамма-активационной методике. Пучок электронов из разрезного микротрона RTM-70 [1] с энергией  $E^m$  попадал на вольфрамовую тормозную мишень, в которой генерировалось тормозное гамма-излучение. За тормозной мишенью располагался образец исследуемого вещества.

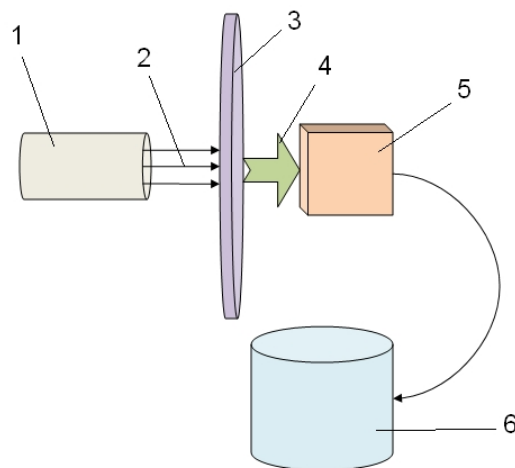


Рис. 2. Схема эксперимента. 1 – ускоритель, 2 – пучок электронов, 3 – тормозная мишень, 4 – гамма-излучение, 5 – исследуемый образец, 6 – HPGe детектор.

Под действием тормозных гамма-квантов в образце проходили фотонуклонные реакции. В результате некоторых реакций образовывались радиоактивные изотопы – происходила активация образца.

После облучения спектр наведенной активности образца измерялся детектором из сверхчистого германия. В измеренном спектре выделялись максимумы, образующиеся при регистрации гамма-квантов наведенной активности. Идентификация максимумов проводилась по их энергии и по скорости их уменьшения в спектрах остаточной активности.

Выход реакции  $Y(E^{\max})$  связан со спектром тормозных фотонов, падающих на образец,  $W(E, E^{\max})$  и сечением реакции  $\sigma(E)$  соотношением

$$Y(E^{\max}) = k \int_0^{E^{\max}} \sigma(E)W(E, E^{\max})dE,$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий массу и размер образца и ток ускорителя. В эксперименте выход реакции определялся соотношением

$$Y(E^{\max}) = \frac{\lambda A}{nI\varepsilon(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_d}(1 - e^{-\lambda t_m})},$$

где  $\lambda$  – постоянная распада образующегося в реакции изотопа,  $n$  – процентное содержание исходных ядер в образце  $\varepsilon$  – эффективность регистрации германиевым детектором соответствующей гамма-линии в спектре остаточной активности образовавшихся изотопов [2],  $t_i$  – время облучения,  $t_d$  – время между концом облучения и началом измерения спектра,  $t_m$  – продолжительность измерения спектра,  $A$  – количество отсчетов детектора, соответствующих выбранной гамма-линии спектра остаточной активности образца,  $I$  – интенсивность линий в спектре гамма-квантов дочерних ядер, образующихся при бета-распадах продуктов реакций. При расчетах использовались интенсивности гамма-переходов [3]. Для каждого из образцов было проведено моделирование GEANT4 [4] и была рассчитана эффективность регистрации гамма-квантов с учетом самопоглощения в образце.

### Анализ результатов

Измеренные выходы фотонуклонных реакций приведены в табл. 1–4. Все выходы нормировались на выходы соответствующих реакций: на изотопе  $^{181}\text{Ta}$  на выход реакции  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{g.s.}}\text{Ta}$ , на изотопе  $^{197}\text{Au}$  на выход реакции  $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ , на изотопах ртути на выход реакции  $^{196}\text{Hg}(\gamma, n)^{195}\text{Hg}$ , на изотопах свинца на выход изотопа  $^{203}\text{Pb}$ .

Табл. 1. Нормированные выходы фотонуклонных реакций на ядре  $^{181}\text{Ta}$ . Указаны спины и четности продуктов реакций  $J_f^P$ . Спин-четность  $^{181}\text{Ta}$   $J_i^P = 7/2^+$ .

Реакция	$J_f^P$	Выход $Y$						
		Облучение 1	Облучение 2	КМ [5]	TALYS [6]	[7]	[8]	[9]
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{g.s.}}\text{Ta}$	$1^+$	1	1	1	0.93	1	1	1
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{m}}\text{Ta}$	$9^-$				0.07			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{179}\text{Ta}$	$7/2^+$	$0.34 \pm 0.07$		0.29	0.32	0.42	0.24	0.37
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{g.s.}}\text{Ta}$	$1^+$	$(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$(2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$		$2 \cdot 10^{-2}$	
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	$(7^-)$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$					
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$(1.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 5n)^{176}\text{Ta}$	$(1^-)$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 6n)^{175}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(1.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 7n)^{174}\text{Ta}$	$3^+$			$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{g.s.}}\text{Hf}$	$0^+$			$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$	$8^-$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$		$3 \cdot 10^{-5}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{g.s.}}\text{Hf}$	$9/2^+$			$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{m}}\text{Hf}$	$25/2^-$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-5}$						

Табл. 2. Относительные выходы фотонейтронных реакций на  $^{197}\text{Au}$ .

Реакция	$(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	$(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	$(\gamma, 1n)^{196\text{m}2}\text{Au}$
Выход реакции			
наст. раб.	$0.17 \pm 0.03$	$(1.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
теор. [5]	0.15	$2.0 \cdot 10^{-3}$	
эсп. [10]	0.12	$1.2 \cdot 10^{-3}$	
эсп. [11]	0.18		
оцен. [12]	0.14	$1.4 \cdot 10^{-3}$	

Исследование фотонуклонных реакций на изотопах ртути позволило сравнить выходы реакций  $(\gamma, n)$  на соседних изотопах. Согласно комбинированной модели, сечения реакций  $(\gamma, n)$  в области ДГР практически не отличаются на соседних изотопах Hg, поэтому рассчитанные выходы совпадают с точностью 10%. Однако измеренные выходы реакций  $(\gamma, n)$  на изотопах  $^{196}, ^{198}, ^{204}\text{Hg}$  равняются соответственно 1, 1.36 и 1.22 для  $E^{\text{max}} = 19.5$  МэВ и 1, 1.42 и 1.16 для  $E^{\text{max}} = 29.1$  МэВ (табл. 1–4). Отклонение от рассчитанных на основе комбинированной модели выходов превышает величину погрешности эксперимента. Это отклонение может быть объяснено неточностью в описании сечения реакции  $(\gamma, n)$  в области от порога реакции до максимума ДГР в комбинированной модели. За счет того, что в тормозных пучках с максимальными энергиями  $E^{\text{max}} = 19.5$  МэВ и  $E^{\text{max}} = 29.1$  МэВ фотонов с энергиями  $\sim 10$  МэВ в 2–5 раз больше, чем фотонов с энергиями  $\sim 15$  МэВ, даже малое отклонение в определении сечения реакции в этой энергетической области может приводить к значительным ошибкам в рассчитанном выходе.

Табл. 3. Измеренные и рассчитанные в рамках модели [5] выходы фотоядерных реакций на стабильных изотопах Hg.

Начальное ядро	Реакция	Конечное ядро	Спин, четность $J^{\pi}$		Выход реакции					
			Начальное ядро	Конечное ядро	Эксперимент		Расчет [5]			
					Осн. сост.	Изомер. сост.	$E^{\text{max}} = 19.5$ МэВ	$E^{\text{max}} = 29.1$ МэВ	$E^{\text{max}} = 19.5$ МэВ	$E^{\text{max}} = 29.1$ МэВ
$^{204}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	$^{203}\text{Hg}$	$0^+$	$5/2^-$			$1.22 \pm 0.24$	$1.16 \pm 0.23$	1.05	0.99
$^{200}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	$^{199}\text{Hg}$	$0^+$	$1/2^-$					1.06	1.10
		$^{199\text{m}}\text{Hg}$			$13/2^+$	$0.087 \pm 0.018$	$0.085 \pm 0.017$			
$^{198}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	$^{197}\text{Hg}$	$0^+$	$1/2^-$			$1.26 \pm 0.26$	$1.27 \pm 0.29$	1.02	1.01
		$^{197\text{m}}\text{Hg}$			$13/2^+$	$0.10 \pm 0.02$	$0.15 \pm 0.03$			
$^{196}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	$^{195}\text{Hg}$	$0^+$	$1/2^-$			$0.90 \pm 0.17$	$0.88 \pm 0.20$	1	1
		$^{195\text{m}}\text{Hg}$			$13/2^+$	$0.10 \pm 0.03$	$0.12 \pm 0.03$			
$^{202}\text{Hg}$	$(\gamma, p)$	$^{201}\text{Au}$	$0^+$	$3/2^+$			$< 10^{-4}$	$(1.4 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
$^{201}\text{Hg}$	$(\gamma, p)$	$^{200}\text{Au}$	$3/2^-$	$1(-)$			$(2.3 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$	$(2.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$0.7 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$
		$^{200\text{m}}\text{Au}$			$12^-$	$< 4 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-5}$			
$^{200}\text{Hg}$	$(\gamma, p)$	$^{199}\text{Au}$	$0^+$	$3/2^+$			$(4.6 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$(2.8 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
$^{199}\text{Hg}$	$(\gamma, p)$	$^{198}\text{Au}$	$1/2^-$	$2^-$			$(3.9 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$	$(2.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
		$^{198\text{m}}\text{Au}$			$(12^-)$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-5}$			
$^{198}\text{Hg}$	$(\gamma, n + p)$	$^{196}\text{Au}$	$0^+$	$2^-$			$< 2 \cdot 10^{-6}$	$(6 \pm 2) \cdot 10^{-5}$	$10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-4}$

Табл. 4. Измеренные и рассчитанные [5] суммарные выходы продуктов фотонуклонных реакций на естественной смеси изотопов Pb. Выходы нормированы на выход изотопа  $^{203}\text{Pb}$ . Указано разделение каналов образования конечных изотопов в результате фотонуклонных реакций на различных начальных изотопах, основанное на расчете в рамках комбинированной модели [5].

Изотоп, образующийся в результате фотонуклонных реакций	Суммарный выход $Y_f$ , эксп.	Суммарный выход $Y_f$ , [5]	Доля полного выхода, обусловленная реакцией на начальном стабильном изотопе			
			$^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}$
$^{203}\text{Pb}$	1	1	0.68	0.19	0.07	0.05
$^{201}\text{Pb}$	$3.9 \cdot 10^{-2}$	$3.9 \cdot 10^{-2}$	0.264	0.658	0.076	0.002
$^{200}\text{Pb}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$9.2 \cdot 10^{-3}$	0.535	0.458	0.007	<0.001
$^{202}\text{Tl}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$0.57 \cdot 10^{-2}$	0.279	0.623	0.094	0.004
$^{202\text{m}}\text{Pb}$	$6.9 \cdot 10^{-3}$					
$^{204\text{m}}\text{Pb}$	$3.8 \cdot 10^{-2}$					

Проведенные в настоящей работе эксперименты по измерению выходов фотонуклонных реакций различной множественности на изотопах  $^{181}\text{Ta}$  и  $^{197}\text{Au}$  позволяют косвенным образом оценить измеренные сечений этих реакций. В обоих случаях выходы, рассчитанные на основе сечений, измеренных в лаборатории в Ливерморе, оказываются больше, чем выходы, рассчитанные на основе сечений, измеренных в лаборатории в Саклэ. Измеренные в настоящей работе значения выходов реакций  $^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)$  и  $^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)$  лежат между значениями выходов, рассчитанными на основе данных Саклэ и Ливермора. В случае реакции  $^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)$  измеренный выход равен 0.17 и практически точно подтверждает данные Ливермора (0.18). Измеренный выход реакции  $^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)$  равен 0.34 и отличается от данных Ливермора (0.42) и Саклэ (0.24) приблизительно на 30%. В работе [9] проведена оценка экспериментально измеренных сечений фотонуклонных реакций на ядре  $^{181}\text{Ta}$ . Выход, рассчитанный на основе оцененных данных, равен 0.29, что в пределах погрешности соответствует измеренному выходу. Таким образом, эксперимент по измерению остаточной активности косвенно подтверждает оценку [9].

Измеренные выходы реакций  $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)$  и  $^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)$  в пределах погрешности совпадают с выходами, рассчитанными на основе данных Саклэ. Сечения реакции  $(\gamma, 3n)$  для исследуемых в настоящей работе ядер не были измерены в Ливерморе.

Исследование протонного канала распада ДГР, проведенное при помощи методики измерения остаточной активности, а также основанное на данных других работ и на результатах теоретических расчетов, подтвердило решающую роль изоспинового расщепления ДГР для возможности фотопротонных реакций в тяжелых ядрах, так как распад  $T_>$ -компоненты ДГР возможен лишь с вылетом протона. Указанием на это является сравнение измеренных экспериментально и рассчитанных сечений и выходов фотопротонных реакций на тяжелых ядрах: расчет выходов фотопротонных реакций на изотопах ртути при максимальной энергии тормозного спектра 29.1 МэВ в комбинированной модели, учитывающей изоспиновое расщепление ДГР, предсказывает, что доля фотопротонного канала реакции

составляет  $\sim 10^{-3}$ , что хорошо согласуется с экспериментально измеренными выходами.

Табл. 5. Выходы основных и изомерных состояний в фотонуклонных реакциях.

Начальное ядро	Реакция	$E^{\max}$ , МэВ	Конечное ядро	$J_i^P$	$J_f^P$	Выход	Изомерное отношение
$^{181}\text{Ta}$	$(\gamma, 3n)$	67.7	$^{178\text{g.s.}}\text{Ta}$	$7/2^+$	$1^+$	0.018	0.28
			$^{178\text{m}}\text{Ta}$		$7^-$	0.005	
$^{197}\text{Au}$	$(\gamma, n)$	29.1	$^{196\text{g.s.}}\text{Au}$	$3/2^+$	$2^-$	$\approx 1$	0.0005
			$^{196\text{m}}\text{Au}$		$12^-$	0.0005	
$^{198}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	19.5	$^{197\text{g.s.}}\text{Hg}$	$0^+$	$1/2^-$	1.26	0.08
			$^{197\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.1	
$^{196}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	19.5	$^{195\text{g.s.}}\text{Hg}$	$0^+$	$1/2^-$	0.9	0.11
			$^{195\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.1	
$^{198}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	29.1	$^{197\text{g.s.}}\text{Hg}$	$0^+$	$1/2^-$	1.27	0.12
			$^{197\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.15	
$^{196}\text{Hg}$	$(\gamma, n)$	29.1	$^{195\text{g.s.}}\text{Hg}$	$0^+$	$1/2^-$	0.88	0.14
			$^{195\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.12	

В настоящей работе наблюдалось образование одновременно и основных, и изомерных состояний ядер в четырех фотонуклонных реакциях:  $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)$ ,  $^{197}\text{Au}(\gamma, n)$ ,  $^{198}\text{Hg}(\gamma, n)$ ,  $^{196}\text{Hg}(\gamma, n)$ . Спины и четности начальных и конечных ядер, а также выходы соответствующих реакций и изомерные отношения приведены в табл. 5. Полученные данные полностью подтверждают сильную связь между спинами начального ядра и образующегося изомера и вероятностью образования этого изомера. При больших значениях разности спинов вероятность образования изомера сразу после вылета нейтронов реакции чрезвычайно мала, так как из-за центробежного барьера нейтрон, как правило, уносит из ядра сравнительно небольшой орбитальный момент. Поэтому в таком случае изомер образуется главным образом в результате каскадов гамма-переходов из высоко лежащих возбужденных состояний ядра-продукта, образующихся сразу после фотонейтронной реакции.

### Заключение

Впервые измерены спектры гамма-квантов распада ядер, образующихся при облучении естественной смеси изотопов Ta тормозным пучком с  $E^{\max} = 67.7$  МэВ, изотопа  $^{197}\text{Au}$  тормозным пучком с  $E^{\max} = 29.1$  МэВ, естественной смеси изотопов Hg тормозными пучками с  $E^{\max} = 19.5$  и  $29.1$  МэВ и естественной смеси изотопов Pb тормозным пучком с  $E^{\max} = 67.7$  МэВ. На основе измеренных спектров остаточной активности впервые получены выходы 28 фотоядерных реакций.

Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами расчетов по современным теоретическим моделям описания фотоядерных реакций и с результатами известных экспериментальных работ по измерению сечений фотоядерных реакций в области ДГР. Была оценена надежность разделения фотонуклонных реакций различной множественности в экспериментах на пучках квазимонохроматических фотонов.

В реакциях  $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)$ ,  $^{197}\text{Au}(\gamma, n)$ ,  $^{198}\text{Hg}(\gamma, n)$ ,  $^{196}\text{Hg}(\gamma, n)$  наблюдалось образование ядер-продуктов в основном и в изомерном состояниях. Показана

связь полученных изомерных отношений для этих реакций со спинами начальных ядер и ядер-продуктов.

- 1 Shvedunov V. I., Ermakov A. N., Gribov I. V. // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Research A **550**, P. 39 (2005).
- 2 С. Ю. Трощев, в сб.: *Труды X межвузовской научной школы молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине"*, Москва, 2009, под ред. Б. С. Ишханова и Л. С. Новикова (Книжный дом Университет (КДУ), Москва, 2009), с. 174.
- 3 Nuclear wallet cards. National Nuclear Data Center (<http://www.nndc.bnl.gov/>)
- 4 S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **506**, 250 (2003).
- 5 Ишханов Б. С., Орлин В. Н. // ЯФ **74**. С. 21 (2011).
- 6 A. J. Koning, S. Hilaire and M. C. Duijvestijn, in *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Nice, France, Apr. 22–27, 2007*, Ed. by O. Bersillon, F. Gunsing, E. Vauge *et al.* (EDP Sciences, 2008), p. 211.
- 7 Bramblett R. L., Caldwell J. T., Auchampaugh G. F., Fultz S. C. // Phys. Rev. **129**, P. 2723 (1963).
- 8 Bergere R., Beil H., Veysiere A. // Nucl. Phys. A**121**, P. 463 (1968).
- 9 Варламов В. В., Песков Н. Н., Руденко Д. С., Степанов М. Е. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. № 1-2. С. 48 (2003).
- 10 Veysiere A., Beil H., Bergere R., *et al.* // Nucl. Phys. A**159**, С. 561 (1970).
- 11 Fultz S. C., Bramblett R. L., Caldwell T. J., *et al.* // Phys. Rev. **127**, С. 1273 (1962).
- 12 Варламов В. В., Ишханов Б.С., Орлин В. Н., Трощев С. Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. **74**, С. 874 (2010).