

Кумулятивные выходы продуктов деления  $^{238}\text{U}$  нейтронами спектра деления

Продукт деления	$T_{1/2}$	Выход, %		Продукт деления	$T_{1/2}$	Выход, %	
		Настоящая работа	Работа [4]			Настоящая работа	Работа [4]
$^{85m}\text{Kr}$	4,48 ч	$1,20 \pm 0,06$	$1,50 \pm 0,10$	$^{132}\text{Te}$	78 ч	$4,80 \pm 0,20$	$4,08 \pm 0,18$
$^{87}\text{Kr}$	76,3 мин	$2,25 \pm 0,15$	$2,19 \pm 0,14$	$^{133m}\text{Te}$	55,4 мин	$2,08 \pm 0,14$	
$^{88}\text{Kr}$	2,80 ч	$2,64 \pm 0,20$	$2,80 \pm 0,15$	$^{133}\text{I}$	20,8 ч	$7,45 \pm 0,35$	$6,74 \pm 0,31$
$^{91}\text{Sr}$	9,48 ч	$5,04 \pm 0,20$	$5,38 \pm 0,23$	$^{134}\text{Te}$	41,8 мин	$6,62 \pm 0,46$	
$^{92}\text{Sr}$	2,71 ч	$4,94 \pm 0,26$	$5,93 \pm 0,26$	$^{134}\text{I}$	52,6 мин	$7,37 \pm 0,41$	$7,71 \pm 0,36$
$^{92}\text{Y}$	3,53 ч	$4,86 \pm 0,69$		$^{135}\text{I}$	6,70 ч	$6,32 \pm 0,26$	
$^{93}\text{Sr}$	7,30 мин	$5,82 \pm 0,79$	$5,38 \pm 0,26$	$^{135}\text{Xe}$	9,15 ч	$6,16 \pm 0,29$	$5,48 \pm 0,32$
$^{94}\text{Y}$	18,7 мин	$4,82 \pm 0,28$		$^{138}\text{Xe}$	14,2 мин	$6,36 \pm 0,97$	—
$^{97}\text{Zr}$	17,0 ч	$5,86 \pm 0,21$	$4,77 \pm 0,23$	$^{138}\text{Cs}$	32,2 мин	$8,39 \pm 0,54$	—
$^{99}\text{Mo}$	66,0 ч	$5,54 \pm 0,26$	$5,61 \pm 0,25$	$^{139}\text{Ba}$	82,7 мин	$5,69 \pm 0,20$	—
$^{101}\text{Mo}$	14,6 мин	$4,77 \pm 0,39$		$^{140}\text{Ba}$	12,8 сут	$5,44 \pm 0,23$	$5,44 \pm 0,23$
$^{105}\text{Ru}$	4,40 ч	$2,42 \pm 0,20$	$2,36 \pm 0,12$	$^{141}\text{Ba}$	18 мин	$5,00 \pm 0,44$	$5,27 \pm 0,25$
$^{130m}\text{Sb}$	40 мин	$0,839 \pm 0,050$		$^{142}\text{La}$	92,7 мин	$4,81 \pm 0,17$	$5,54 \pm 0,25$
$^{131m}\text{Te}$	30,0 ч	$0,90 \pm 0,11$		$^{143}\text{Ce}$	33 ч	$5,20 \pm 0,25$	$5,82 \pm 0,26$
$^{131}\text{I}$	8,04 сут	$3,23 \pm 0,15$	$2,88 \pm 0,14$				

дуктов деления [1, 2]. Образец  $^{238}\text{U}$  массой 98 мг с примесями  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  менее 1%, герметически упакованный в алюминевый чехол, облучали в центре активной зоны реактора при плотности потока нейтронов  $10^9$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Были проведены два облучения длительностью 1,5 и 10,35 ч. После каждого из них спектр  $\gamma$ -излучения смеси продуктов деления определяли на Ge(Li)-спектрометре с разрешением 3,2 кэВ для энергии 1333 кэВ. Измерения проводили в течение 30 сут в диапазоне энергии 100—1800 кэВ. Необходимые для обработки результатов эксперимента значения абсолютных квантовых выходов и периодов полураспада взяты из работы [3].

Интенсивность делений в образце находили с помощью трековых детекторов. Нанесенные на стеклянную подложку калиброванные слои с известным числом ядер  $^{238}\text{U}[(4,02 \pm 0,08) \cdot 10^{16}$  ядер] помещали в специальные контейнеры с коллимирующими отверстиями для определения эффективности трекового детектора. Содержание примесей в  $^{238}\text{U}$ , использовавшемся в слоях, не превышало  $(0,155 \pm 0,049)\%$ . После облучения стекла протравливали

и проявленные треки подсчитывали визуально с помощью оптического микроскопа.

Результаты измерений кумулятивных выходов в сравнении с результатами работы [4] представлены в таблице. Так как в работе [4] выходы получены относительно  $^{140}\text{Ba}$ , они перенормированы на полученное нами значение выхода  $^{140}\text{Ba}$ . За исключением значений выходов для массовых чисел, равных 92, 97, 132, результаты в пределах погрешностей согласуются.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бялко А. А. и др. В кн.: Экспериментальные методы ядерной физики. Вып. 3. Под ред. В. М. Колобашкина. М., Атомиздат, 1978, с. 82.
2. Гудков А. Н. и др. Там же, вып. 4, с. 105.
3. Blachot J., Fiche C. «Atomic Data and Nucl. Data Tables», 1977, v. 20, p. 241.
4. Ferrieu A., Blachot J., Lhospice G. Thesis, Univ. of Grenoble, 1977.

Поступило в Редакцию 11.12.79

УДК 539.172.12

## Выходы $^{165}\text{Tl}$ , $^{166}\text{Tl}$ , $^{167}\text{Tl}$ , $^{168}\text{Tl}$ , $^{170}\text{Tl}$ в реакциях с протонами, дейтронами и альфа-частицами

ДМИТРИЕВ П. П., МОЛИН Г. А., ПАНАРИН М. В.

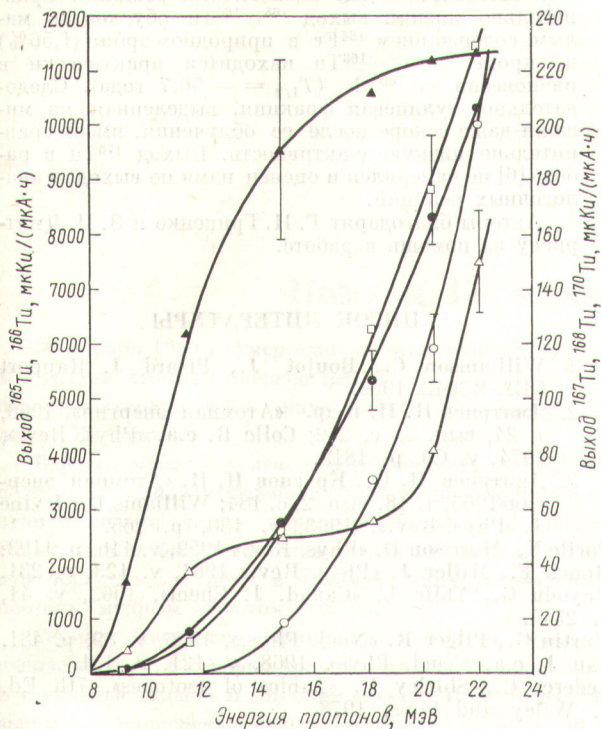
При облучении эрбия протонами и дейтронами и гольмия  $\alpha$ -частицами с высоким выходом образуются радионуклиды таллия, из них  $^{167}\text{Tl}$ , например, широко применяется в ядерной медицине, и поэтому особый интерес представляет получение  $^{167}\text{Tl}$  высокой радионуклидной чистоты. В настоящей работе измерены выходы  $^{165-168}, ^{170}\text{Tl}$  при облучении толстых мишеней эрбия протонами и дейтронами с энергией от 9 до  $\sim 22$  МэВ и гольмия  $\alpha$ -частицами энергией от 17 до 43,5 МэВ.

На отклоненном пучке циклотрона ФЭИ облучали образцы окиси эрбия  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (коэффициент пересчета выхода на чистый эрбий 1,28) и стопку фольг металлического гольмия, средняя толщина фольги  $\sim 25$  мг/см $^2$ . Энергию протонов и дейтронов варьировали алюминиевыми фольгами, торможение частиц в алюминии и гольмии определяли по данным работы [1]. Радионуклиды идентифицированы по энергии  $\gamma$ -квантов и периоду полураспада.

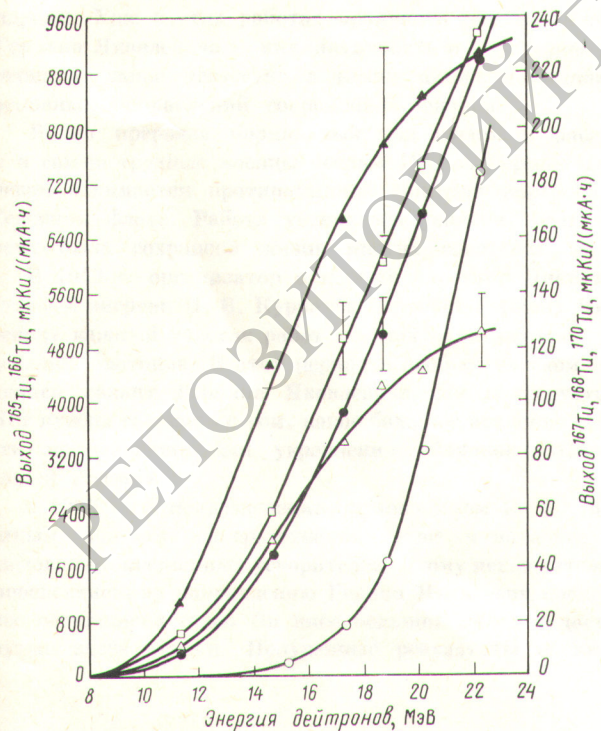
Активность  $^{165-168}, ^{170}\text{Tl}$  определена по фотоикам выбранных  $\gamma$ -линий [8], которые измеряли на гамма-спектрометре с Ge(Li)-детекторами. Фотоэффективность детектора определяли с помощью излучателей из комплекта ОСГИ. Использован также источник  $^{133}\text{Ba}$ , который калибровался по активности путем тщательного сравнения фотоика  $\gamma$  276,38 кэВ  $^{133}\text{Ba}$  с фотоиком  $\gamma$  279,19 кэВ источника  $^{203}\text{Hg}$  из комплекта ОСГИ.

Интегральный ток облучения измеряли по активности  $^{65}\text{Zn}$  в медных мониторинговых фольгах толщиной 18 мг/см $^2$ . Использованы следующие значения сечения мониторинговых реакций:  $^{65}\text{Cu}(pn)^{65}\text{Zn}$ ,  $\sigma = 46$  мб\* ( $E_p = 22,5$  МэВ) [2];  $^{65}\text{Cu}(d2n)^{65}\text{Zn}$ ,  $\sigma = 525$  мб ( $E_d = 22,5$  МэВ) [3];  $^{63}\text{Cu}(\alpha, pn + 2n)^{65}\text{Zn}$ ,  $\sigma = 325$  мб ( $E_\alpha = 44$  МэВ) [4]. Значения

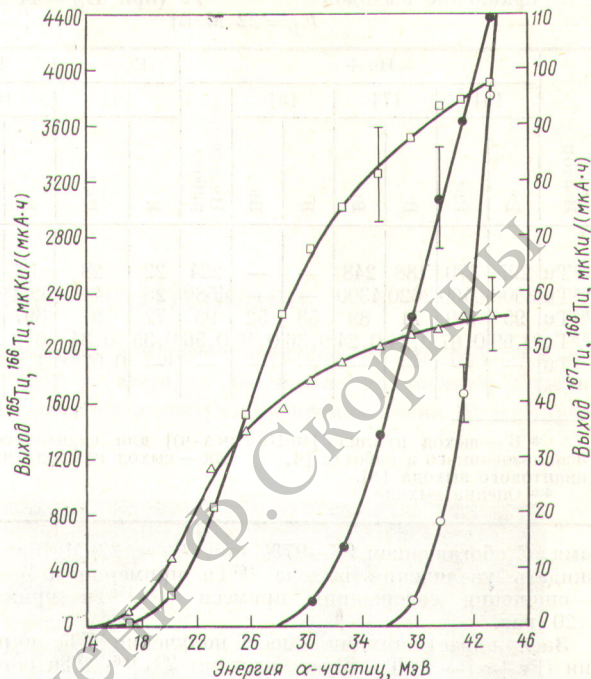
\*  $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$ ;  $1 \text{ Ки} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Бр}$ .



Р и с. 1. Зависимости выхода  $^{165}\text{Tu}$ ,  $^{166}\text{Tu}$ ,  $^{167}\text{Tu}$ ,  $^{168}\text{Tu}$ ,  $^{170}\text{Tu}$  от энергии протонов для толстой мишени из эрбия: ○ —  $^{165}\text{Tu}$  (× 5); ● —  $^{166}\text{Tu}$ ; □ —  $^{167}\text{Tu}$ ; △ —  $^{168}\text{Tu}$  (× 20); ▲ —  $^{170}\text{Tu}$  (× 50)



Р и с. 2. Зависимости выхода  $^{165}\text{Tu}$ ,  $^{166}\text{Tu}$ ,  $^{167}\text{Tu}$ ,  $^{168}\text{Tu}$ ,  $^{170}\text{Tu}$  от энергии дейтронов для толстой мишени из эрбия: ○ —  $^{165}\text{Tu}$  (× 10); ● —  $^{166}\text{Tu}$ ; □ —  $^{167}\text{Tu}$ ; △ —  $^{168}\text{Tu}$  (× 10); ▲ —  $^{170}\text{Tu}$  (× 50)



Р и с. 3. Зависимости выхода  $^{165}\text{Tu}$ ,  $^{166}\text{Tu}$ ,  $^{167}\text{Tu}$ ,  $^{168}\text{Tu}$  от энергии  $\alpha$ -частиц для тонкой мишени из гольмия: ○ —  $^{165}\text{Tu}$  (× 20); ● —  $^{166}\text{Tu}$ ; □ —  $^{167}\text{Tu}$ ; △ —  $^{168}\text{Tu}$  (× 100)

сечений получены из анализа данных работ [2—4] и измерений относительного хода функций возбуждения указанных реакций, выполненных авторами настоящей работы.

Результаты измерения выходов  $^{165}\text{—}^{168}\text{Tu}$ ,  $^{170}\text{Tu}$  приведены на рис. 1—3. Погрешности значений выхода  $^{165}\text{—}^{168}\text{Tu}$  составляют 11—12% и в основном обусловлены систематическими погрешностями при измерении активности нуклидов и интегрального тока облучения. Погрешность значений выхода  $^{170}\text{Tu}$  ~ 18 ÷ 20% и определяется процедурой исключения сильного фона  $\gamma$ -линии 79,82 кэВ  $^{168}\text{Tu}$  при измерении фотопика  $\gamma$ -линии 84,26 кэВ  $^{170}\text{Tu}$ . Авторы работ [5—7] активность нуклидов измеряли на сцинтилляционном гамма-спектрометре по фотопикам выбранных  $\gamma$ -линий. Использование при этом значения квантового выхода  $\gamma$ -квантов (а также энергии)  $\gamma$ -квантов устарели и в ряде случаев резко отличаются от современных данных [8]. Поэтому выходы радионуклидов были скорректированы с использованием современных значений квантового выхода  $\gamma$ -квантов. Сравнение скорректированных выходов с результатами настоящей работы приведено в таблице. Если сечения были измерены до меньшей энергии частиц, то выход нуклида при  $E_p = 22$  МэВ и  $E_\alpha = 44$  МэВ находился экстраполяцией кривой выхода с использованием относительного хода кривых выхода, измеренных в настоящей работе. Удовлетворительное согласие наблюдается с измерениями Сау и др. [7], кроме  $^{168}\text{Tu}$ , где авторы работы [7] получили заниженные сечения реакции.

Полученные в настоящей работе данные позволяют указать оптимальные способы получения нуклидов туллия. Из рис. 1 следует, например, что при получении  $^{167}\text{Tu}$  облучение эрбия протонами в диапазоне энергии 19—22 МэВ («тонкая» мишень) позволяет уменьшить примесь  $^{168}\text{Tu}$  примерно в 5 раз и  $^{170}\text{Tu}$  примерно в 1,5 раза по сравнению с облучением толстой мишени протонами энергией 22 МэВ. Использование тонкой мишени гольмия в 1,5 раза снижает примесь  $^{168}\text{Tu}$  (см. рис. 3). Весьма перспективно использование обогащенного  $^{167}\text{Er}$  при облучении дейтро-

Сравнение выходов  $^{165-168, 170}\text{Tu}$  (при  $E_\alpha = 44$  МэВ,  
 $E_p = 22$  МэВ)

Изотоп	Ho + $\alpha$							Eg + $\alpha$		Eg + p		
	[6]		[7]		[5]		Настоящая работа	[6]		[5]		Настоящая работа
	В*	Вк*	В	Вк	В	Вк		В	Вк	В	Вк	
$^{165}\text{Tu}$	295	370	188	248	—	—	224	22	28	19	440	1960
$^{166}\text{Tu}$	3800	6460	2620	4300	—	—	4580	25	41	3960	13600	7000
$^{167}\text{Tu}$	95	119	71	89	58	52	98	72	91	397	355	224
$^{168}\text{Tu}$	0,69	0,67	0,24	0,24	0,36	0,46	0,56	0,35	0,34	6,2	8	7,2
$^{170}\text{Tu}$	—	—	—	—	—	—	—	—	0,07**	1,3	1,7	0,43

\* В — выход нуклида [мкКи/(мКа·ч)] для квантового выхода, использованного в работах [6, 7]; Вк — выход нуклида для нового квантового выхода [8].  
\*\* Оценка выхода.

нами. С обогащением 96—97% при  $E_d = 22\frac{1}{2}$  МэВ можно ожидать увеличения выхода  $^{167}\text{Tu}$  примерно в 4 раза и снижения содержания примеси  $^{168, 170}\text{Tu}$  примерно в 20 раз.

Заслуживает внимания способ получения  $^{167}\text{Tu}$  по реакции  $(Eg + \alpha) \rightarrow ^{167}\text{Tu}$ . Здесь изотопы  $^{165, 166, 167}\text{Tu}$  образуются в основном через изобарные ядра  $^{165, 166, 167}\text{Yb}$  — по реакциям типа  $(\alpha, xn)$ , а  $^{168, 170}\text{Tu}$  — по реакциям типа  $(\alpha, pxn)$  с меньшим выходом. Реакции типа  $(\alpha, pxn)$  также дают вклад в выход  $^{165, 166, 167}\text{Tu}$ , который учтен в таблице

по известным выходам аналогичных реакций. Сравнительно низкий выход  $^{165, 166}\text{Tu}$  обусловлен малым содержанием  $^{164}\text{Eg}$  в природном эрбии (1,56%) и, кроме того,  $^{166}\text{Tu}$  находится практически в равновесии с  $^{166}\text{Yb}$  ( $T_{1/2} = 56,7$  года). Следовательно, туллевая фракция, выделенная из мишени даже вскоре после ее облучения, имеет сравнительно низкую  $\gamma$ -активность. Выход  $^{170}\text{Tu}$  в работе [6] не измерялся и оценен нами по выходам аналогичных реакций.

Авторы благодарят Г. Н. Гриненко и З. П. Дмитриеву за помощь в работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Williamson C., Boujot J., Picard J. Rapport CEA-R3042, 1966.
- Дмитриев П. П. и др. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 3, с. 279; Colle R. e.a. «Phys. Rev.», 1974, v. C9, p. 1819.
- Дмитриев П. П., Краснов Н. Н. «Атомная энергия» 1965, т. 18, вып. 2, с. 184; Williams D., Irvine J. «Phys. Rev.», 1963, v. 130, p. 265.
- Porile N., Morrison D. «Phys. Rev.» 1959, v. 116, p. 1193; Houck F., Miller J. «Phys. Rev.» 1961, v. 123, p. 231.
- Rayudu G., Yaffe L. «Canad. J. Chem», 1963, v. 41, p. 2544.
- Martin G., Pilger R. «Nucl. Phys.», 1966, v. 89, p. 481.
- Sau J. e.a. «Nucl. Phys», 1968, v. 121, p. 131.
- Lederer C., Shirley V. «Tables of Isotopes», 7th Ed. J. Wiley and Sons, 1978.

Поступило в Редакцию 17.12.79