

V

00000

11
1154



**А. Н. Гудков С. В. Кривашеев А. Б. Колдобский
Е. Ю. Бобков Н. С. Пивень О. И. Воронина**

058-88

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КУМУЛЯТИВНЫХ ВЫХОДОВ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ
ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ
АКТИНИДНЫХ ЯДЕР**

МОСКВА 1988

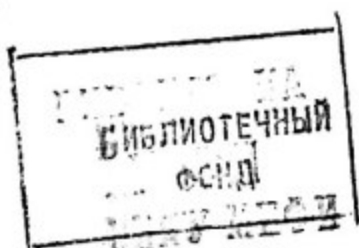
Государственный комитет СССР по народному
образованию

Московский ордена Трудового Красного Знамени
инженерно-физический институт

А.Н.Гудков С.В.Кривашеев А.Б.Колдобский
Е.Ю.Бобков Н.С.Пивень О.И.Воронина

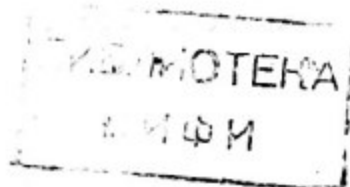
МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ
ВЫХОДОВ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ
НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ АКТИВИДНЫХ ЯДЕР

Препринт 058-88



Утверждено
редсоветом института

Москва 1988



Гудков А.Н., Кривашев С.В., Колдобский А.Б., Бобков Е.Ю.,
Пивень Н.С., Воронина О.И. Методика и результаты определения
кумулятивных выходов предшественников запаздывающих нейтронов
деления актинидных ядер. - М.: Препринт/МИФИ, 058-88,
1988.-20с.

В работе приводятся результаты экспериментального определения кумулятивных выходов некоторых короткоживущих продуктов деления (ПД), являющихся предшественниками запаздывающих нейтронов (ЗН). Для реализации задачи выбран итерационный метод инкрементальной деконволюции в применении к компонентному анализу интегральной временной зависимости спада потока нейтронного излучения во времени нефракционированной смеси ПД с учетом известных вероятностей эмиссии ЗН отдельными осколочными ядрами. Экспериментально исследовались реакции деления ^{229}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{249}Cf тепловыми нейтронами; ^{233}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am нейтронами спектра деления; ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{242}Pu нейтронами с энергией 14,7 МэВ. Полученные значения кумулятивных выходов сравниваются с опубликованными ранее экспериментальными, а при их отсутствии - расчетными данными, при этом в большинстве случаев обнаруживается хорошее взаимное согласие. Значительное количество выходов измерено впервые, некоторые из них определены с меньшей погрешностью, нежели в работах других авторов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время, несмотря на вот уже 50-летние исследования, накопленная информация по выходам короткоживущих продуктов деления (ПД) актинидных ядер нейтронами различных энергий весьма далека от исчерпывающей полноты даже в практически значимом интервале зарядов и масс. Актуальность этих исследований, кроме очевидной важности получаемых с их помощью ядерных констант для формирования достоверных наборов выходов короткоживущих ПД, установления физики процесса деления, оценки радиационной обстановки при аварии ядерных энергетических установок, обусловлена также необходимостью детального анализа кинетики, таких, например, нестационарных ядерных систем, как высокотемпературные реакторы с высокой удельной мощностью или циркулирующим топливом — с целью корректного учета влияния диффузионных потерь отдельных предшественников на безопасность реактора [1].

Как правило, подобные исследования реализуются с помощью дорогостоящих установок типа масс-сепараторов, сложной время-пролетной методики или трудоемких методов быстрой радиохимии. Между тем, используя метод инкрементальной деконволюции (ИД) [2], при анализе спада потока нейтронного излучения "свежей" смеси ПД во времени можно достаточно просто получить экспериментальную информацию о кумулятивных выходах отдельных предшественников запаздывающих нейтронов (ЗН).

2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИНКРЕМЕНТАЛЬНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ К АНАЛИЗУ КРИВЫХ СПАДА ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ ВО ВРЕМЕНИ

Как было показано в работе [3], метод инкрементальной деконволюции может быть применен для разложения спектральных мультиплетов на компоненты в набранном амплитудном спектре. В алгоритме итерационного построения приближенного решения системы уравнений

$$A(i) = \sum_{j=1}^M B(j)F(i,j), \quad i=1, \dots, N, \quad (1)$$

где $A(i)$ — наблюдаемый спектр;

N — число экспериментальных точек;

$B(j)$ — истинный спектр;

M — число искомых компонент;

$F(i,j)$ — аппаратная форма линии,

методом ИЦ содержатся только операции сложения и вычитания, вследствие чего он работает быстро и удобен для реализации на микроЭВМ. Дополнительными достоинствами метода являются гарантированная положительность искоемых коэффициентов параметризации $B(j)$ в системе уравнений (I) и отсутствие необходимости задания неодинаковых начальных приближений ($B_0(j) = 0$). Как будет показано ниже, метод ИЦ можно использовать при анализе кривых спада потока излучения запаздывающих нейтронов несепарированной смеси ИЦ для определения кумулятивных выходов отдельных предшественников. Следует заметить, что метод наименьших квадратов (МНК) для решения системы (I) при большом числе определяемых параметров не очень подходит, т.к. не гарантирует положительность решения. К тому же матрица ошибок в этом случае зачастую бывает плохо обусловлена.

По определению, для конкретного нуклида - предшественника ЗН справедливо соотношение

$$Y^h(j) = Y^e(j) \times P_n(j), \quad (2)$$

где $Y^h(j)$ - выход ЗН от предшественника с индексом j ;

$Y^e(j)$ - его кумулятивный выход;

$P_n(j)$ - вероятность испустить нейтрон дочерним ядром j -го предшественника.

Коэффициенты $B(j)$ из (I) в данном случае с точностью до константы, включающей в себя число делений в образце в единицу времени и эффективность детектора, равны $Y^h(j)$; $f(i,j)$ - временная функция, описывающая спад потока излучения ЗН на последовательных временных интервалах и зависящая от условий проведения эксперимента, состоящего в избирательном накоплении необходимой радиометрической информации, получаемой при многократно воспроизводимых идентичных циклах, каждый из которых заключается в последовательном облучении исследуемогоделящегося материала нейтронами, доставке его на позицию детектирования, измерении спада потока излучения ЗН во времени и возвращении образца на позицию облучения [II].

В настоящее время экспериментально измерены $P_n(j)$ примерно для 80 предшественников ЗН. Разделяя их по периодам полураспада $T_{1/2}(j)$, можно показать, что основной вклад в интегральную кривую спада потока излучения ЗН спустя 2 с после облучения образца вносят 9-12 ядер - сравнительно долгоживущих предшест-

венников ($T_{I/2} \geq 2c$). Для подтверждения этого положения были проведены расчеты для исследованных реакций деления. При этом использовались рекомендованные значения $Y^c(j)$ и $P_n(j)$ (см. формулу (2)), взятые соответственно из работ [4] и [5]. К предшественникам, дающим основной вклад в полный выход ЗН Y_{tot} , рассчитанный для 4 групп ЗН (при общепринятом шестигрупповом приближении [1]), были отнесены нуклиды (в порядке убывания их периода полураспада): ^{87}Br , ^{137}I , ^{88}Br , ^{138}I , ^{93}Rb , ^{89}Br , ^{94}Rb , ^{139}I , а также группа ядер, период полураспада которых лежит в интервале (1,5 - 2,0 с) - ^{90}Br , ^{85}As , ^{134}Cs , ^{135}Sb , ^{98}Y и др. Отношение вклада учитываемых предшественников к Y_{tot} приведены в табл. I. Там же в скобках даны соответствующие расчетные абсолютные значения на 10^4 делений в образце.

Таким образом, интегральную кривую спада потока излучения ЗН можно анализировать по девяти ($M=9$) основным вкладчикам, с учетом того, что короткоживущие ПД распадутся за время доставки (~ 2 с) исследуемого образца с позиции облучения на позицию детектирования. При этом необходимо учитывать вклад предшественников с $T_{I/2} \approx 2$ с, хотя обусловленный ими выход группы ЗН нельзя приписать какому-то конкретному ядру.

Возможность применения итерационной процедуры для разложения интегральной кривой спада потока излучения ЗН с целью выявления вклада отдельных предшественников была впервые продемонстрирована в работе [6] с использованием метода наименьшего направленного расхождения (МНР) [7-10], сравнение которого с методом ИД представлено ниже.

Для проверки возможности разложения интегральной кривой спада потока излучения ЗН по $T_{I/2}(j)$ выбранных ранее основных вкладчиков ЗН и фоновой составляющей были получены рандомизированные кривые, соответствующие различным статистикам эксперимента и наборам предшественников. При этом псевдоэкспериментальные "замеры" представляли собой выборку из пуассоновских событий. Из-за того, что метод ИД (как и большинство итерационных методов) не позволяет оценить погрешности величин $\beta(j)$, каждой статистике ставилось в соответствие несколько смоделированных рандомизированных кривых. Для оценки погрешностей брались несмещенные выборочные дисперсии равноточных "замеров" с учетом коэффициентов Стьюдента при доверительной вероятности равной 0,70 и заданном числе степеней свободы. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица I

Отношение вклада учитываемых предшественников
к общему выходу ЭН Y_{tot} , в процентах

Деление тепловыми нейтронами		Деление нейтронами спектра активной зоны быстрого реактора		Деление нейтронами с энергией 14,7 МэВ	
изотоп	% выхода	изотоп	% выхода	изотоп	% выхода
^{229}Th *	95 $\left(\frac{134}{142}\right)$	^{233}U *	96 $\left(\frac{80}{83}\right)$	^{235}U *	92 $\left(\frac{77}{84}\right)$
^{233}U	88 $\left(\frac{52}{59}\right)$	^{235}U *(I)	90 $\left(\frac{140}{154}\right)$	^{236}U *	90 $\left(\frac{104}{106}\right)$
^{235}U	90 $\left(\frac{132}{147}\right)$	^{236}U *	83 $\left(\frac{154}{186}\right)$	^{238}U *(5)	88 $\left(\frac{152}{172}\right)$
^{249}Cf *(I)	82 $\left(\frac{14}{17}\right)$	^{237}Np *(I)	93 $\left(\frac{95}{103}\right)$	^{237}Np *	88 $\left(\frac{46}{52}\right)$
		^{240}Pu *(I)	91 $\left(\frac{65}{71}\right)$	^{242}Pu *	85 $\left(\frac{55}{65}\right)$
		^{241}Pu *	87 $\left(\frac{111}{128}\right)$		
		^{241}Am *	85 $\left(\frac{48}{57}\right)$		

* Экспериментальные данные по кумулятивным выходам выбранных основных предшественников ЭН отсутствуют, за исключением количества выходов, указанных в скобках, для рассматриваемых процессов деления.

Таблица 2

Анализ рацемизированных кривых ЗН методом ИД

Предш. ЗН	Т : c	Т	э	Т	э	Т	э	Т	э	Т	э	Т	э	Т	э
87 _г	55,7	1300	1289±56	130	144±6	130	189±44	3250	3268±74	-	-	-	-	-	-
137 _г	24,5	7952	7679±212	795	738±25	795	643±144	19880	19780±442	-	-	-	-	-	-
88 _г	16,0	4241	4736±249	424	495±46	424	566±151	10604	10810±718	-	-	-	-	-	-
138 _г	6,53	3344	2966±375	334	307±94	334	294±106	8360	6783±342	3344	3113±121	-	-	-	-
93 _г	5,86	1675	1769±69	167	155±52	167	126±79	4188	6617±2057	1675	2124±191	-	-	-	-
89 _г	4,38	6872	6387±480	687	666±164	687	641±129	17182	15400±1479	6872	6567±140	-	-	-	95±58
94 _г	2,76	6405	8017±909	640	700±133	640	958±253	16014	15640±416	-	120±79	4804	3970±208	-	-
139 _г	2,38	3841	3470±693	384	413±137	384	304±117	9603	10050±454	-	-	2880	2578±1284	-	-
Смесь															
ЦД	2,0	6573	5459±1443	657	509±157	657	483±363	16434	17010±3471	-	-	4930	5953±1182	-	-
Фон	∞	32	32	32	32	32	32	80	80	32	32	24	24	24	24
Число обработан. кривых		5		5		5		3		5		3		3	
Время облучения, с		10		60		10		60		60		60		60	

Т - значения $b(f)$, заданные при моделировании кривойэ - величины $b(f)$, полученные в результате обработки данных

Анализ результатов, приведенных в табл.2, позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, для получения несмещенных оценок величин $B(j)$ необходимо увеличить число обрабатываемых кривых и улучшить статистику эксперимента. Последнее достигается увеличением числа циклов, массы исследуемых препаратов и плотности потока делящихся нейтронов.

Во-вторых, с целью уменьшения погрешностей определения $B(j)$, необходимо время облучения исследуемого образца при оценке вклада долгоживущих предшественников ЗН увеличить, а для короткоживущих — соответственно уменьшить. В противном случае нельзя говорить о сколь-нибудь удовлетворительном (в пределах σ) разрешении экспонент с $T_{1/2}(j) \lesssim 5$ с.

Метод ИД и МНР были совместно исследованы на трех псевдо-экспериментальных кривых, полученных по 68 предшественникам ЗН для деления ^{235}U тепловыми нейтронами, включая и короткоживущие нуклиды ($T_{1/2}(j) \approx 0,8$ с). Из табл.3 видно, что МНР, обладая лучшей устойчивостью, дает, тем не менее, значительно больше смещенных оценок, чем метод ИД. Было обнаружено также, что МНР уступает методу ИД в эффективности (метод быстро сходится только на первых шагах итераций) и быстродействии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ВЫХОДОВ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ ЗН

Предложенный метод был реализован при обработке экспериментальных данных, полученных по методике, изложенной в работе [11], для типов деления, приведенных в табл.1. Эксперименты проводились на ИРТ МИФИ (деление тепловыми нейтронами), БР-1 ФЭИ (деление нейтронами активной зоны БР) и НГ-150 ЛИЯФ (деление нейтронами с энергией 14,7 МэВ) [12]. Надежность методики экспериментально проверялась на делении ^{233}U и ^{235}U тепловыми нейтронами, поскольку для этих случаев существуют достаточно надежные прямые измерения кумулятивных выходов предшественников ЗН [13-15]. Из-за отсутствия прямых измерений плотности потока делящихся нейтронов нормировка величин $Y(j)$ осуществлялась по выходу первой группы ЗН в шести-групповом приближении с учетом разницы в постоянных распада ^{87}Br и первой группы, как это рекомендовано в работе [16].

Результаты экспериментального определения выходов предшественников ЗН вместе с соответствующими их рекомендованными значениями представлены в таблицах 4 - 9.

Таблица 3

Анализ рандомизированных кривых методом ИД и МНР

Предшеств. ЗН	$T_{I/2(j)}$ с	$B(j)$ Т	$B'(j)$ метод ИД	$B''(j)$ МНР
^{87}Br	55,7	1564	1571 ± 60	1739 ± 34
^{137}I	24,5	7093	7189 ± 191	6415 ± 62
^{88}Br	16,0	3639	4359 ± 254	5058 ± 28
^{138}I	6,53	2508	1834 ± 927	2581 ± 32
^{93}Rb	5,86	1444	1598 ± 264	2597 ± 20
^{89}Br	4,38	5155	5392 ± 1721	2915 ± 15
^{94}Rb	2,76	4804	7882 ± 1059	4195 ± 64
^{139}I	2,38	2881	2347 ± 1074	4799 ± 79
Смесь ЦД	2,0	5800	3986 ± 1286	5636 ± 122
Смесь ЦД	0,8	6200	7667 ± 3499	11990 ± 1234
фон	∞	24	24	24

Таблица 4

Кумулятивные выходы предшественников ЗН
деления ^{233}U тепловыми нейтронами

$$(\lambda_1 = 0,0126 \quad ; \quad Y_1 = 0,060 \pm 0,005 [21])$$

Изотоп	$T_{1/2}$, с	ρ_n , %	Эксперим. наст. раб.	Расчет	Эсперим. др. исследований.
^{87}Br	55,7	$2,58 \pm 0,21$	$2,27 \pm 0,28$	$2,16 \pm 0,13$ [4] $2,75 \pm 0,33$ [22] $1,93 \pm 0,08$ [15]	$2,25 \pm 0,16$ [30] $2,18 \pm 0,13$ [14] $2,31 \pm 0,19$ [16]
^{137}I	24,5	$7,1 \pm 0,5$	$1,67 \pm 0,22$	$1,66 \pm 0,07$ [4] $1,54 \pm 0,49$ [22]	$1,91 \pm 0,20$ [30] $1,60 \pm 0,10$ [14] $1,67 \pm 0,10$ [16]
^{88}Br	16,0	$6,35 \pm 0,51$	$1,26 \pm 0,24$	$1,32 \pm 0,11$ [4] $2,11 \pm 0,44$ [22] $1,23 \pm 0,08$ [15]	$1,37 \pm 0,10$ [14] $2,56 \pm 0,33$ [30]
^{138}I	6,53	$5,5 \pm 0,6$	$0,70 \pm 0,21$	$0,59 \pm 0,09$ [4]	$0,70 \pm 0,13$ [14] $0,62 \pm 0,54$ [30]
^{93}Rb	5,86	$1,36 \pm 0,08$	$2,32 \pm 0,51$	$2,11 \pm 0,49$ [4] $2,14 \pm 0,10$ [15]	-
^{89}Br	4,38	$14,2 \pm 1,0$	$0,55 \pm 0,10$	$0,65 \pm 0,05$ [4] $0,91 \pm 0,29$ [22] $0,58 \pm 0,08$ [15]	$0,73 \pm 0,16$ [14] $1,18 \pm 0,56$ [30]
^{94}Rb	2,76	$10,2 \pm 0,6$	$0,38 \pm 0,13$	$0,65 \pm 0,42$ [4] $0,60 \pm 0,05$ [15]	-
^{139}I	2,38	$9,9 \pm 0,8$	$0,15 \pm 0,05$	$0,21 \pm 0,09$ [4]	$0,21 \pm 0,12$ [14]

Здесь и далее λ_1 и Y_1 - нормировочные значения

Таблица 5

Кумулятивные выходы предшественников 3Н деления ^{235}U тепловыми нейтронами
 ($\lambda_1 = 0,0124$; $\gamma_1 = 0,054 \pm 0,007$ [21])

Изотоп	Эксперимент: наст. работа	Расчет	Эксперимент
^{87}Br	2,11 \pm 0,32	2,02 \pm 0,06 [4] 2,19 \pm 0,13 [22]	2,13 \pm 0,20 [13] 2,08 \pm 0,10 [14] 2,70 \pm 0,81 [33]
^{137}I	3,10 \pm 0,47	3,33 \pm 0,13 [4] 3,05 \pm 0,67 [22]	3,30 \pm 0,50 [32]
^{88}Br	2,19 \pm 0,35	1,91 \pm 0,11 [4] 2,15 \pm 0,32 [22]	1,53 \pm 0,10 [14] 1,90 \pm 0,08 [27]
^{138}I	1,24 \pm 0,28	1,56 \pm 0,09 [4]	1,52 \pm 0,15 [14]
^{93}Rb	3,87 \pm 0,74	3,54 \pm 0,05 [4]	3,72 \pm 0,13 [27] 3,50 \pm 0,55 [13]
^{89}Br	1,11 \pm 0,17	1,18 \pm 0,05 [4] 1,42 \pm 0,31 [22]	1,14 \pm 0,08 [14] 0,92 \pm 0,15 [13]
^{94}Rb	1,79 \pm 0,27	1,69 \pm 0,05 [4]	1,73 \pm 0,08 [19] 2,11 \pm 0,44 [13]
^{139}I	0,89 \pm 0,19	0,96 \pm 0,03 [4]	0,54 \pm 0,20 [14]

* Независимый выход

Таблица 6

Кумулятивные выходы предшественников ЗН
деления тепловыми нейтронами

Изотоп	^{229}Th $\lambda_1 = 0,0132$ $\gamma_1 = 0,198 \pm 0,016$		^{249}Cf $\lambda_1 = 0,0129$ [16] $\gamma_1 = 0,0077 \pm 0,0006$	
	наст. работа	оценка [4]	наст. работа	оценка [4]
^{87}Br	$6,77 \pm 0,78$	$5,28 \pm 1,21$	$0,28 \pm 0,10$	$0,12 \pm 0,08$ $0,30 \pm 0,03$ *
^{137}I	$3,10 \pm 0,35$	$2,61 \pm 0,60$	$0,42 \pm 0,19$	$0,81 \pm 0,36$
^{88}Br	$3,83 \pm 0,46$	$2,82 \pm 0,65$	$0,13 \pm 0,05$ **	$0,082 \pm 0,052$
^{138}I	$0,61 \pm 0,10$	$0,80 \pm 0,36$	$0,121 \pm 0,047$	$0,20 \pm 0,13$
^{93}Rb	$1,42 \pm 0,23$	$1,61 \pm 0,37$	$0,27 \pm 0,13$	$0,34 \pm 0,22$
^{89}Br	$1,17 \pm 0,15$	$1,51 \pm 0,35$	$0,037 \pm 0,017$	$0,035 \pm 0,022$
^{94}Rb	$0,68 \pm 0,09$	$0,43 \pm 0,28$	$0,20 \pm 0,09$ ***	$0,14 \pm 0,09$
^{139}I	$0,30 \pm 0,12$	$0,28 \pm 0,18$	$0,038 \pm 0,018$	$0,043 \pm 0,028$

* Экспериментальное значение [16]

** Возможен вклад ^{103}Nb ($T_{1/2} = 15,7$ с) ~ 30% и ^{136}Te ~ 10%

*** Возможен вклад ^{105}Nb ($T_{1/2} = 2,8$ с) ~ 30%

Примечание: существуют расхождения в оценке периодов полураспада и вероятностей эмиссии ЗН ядрами ^{103}Nb и ^{105}Nb (сравн. работы [16-19]), а в работе [5] указанные ядра не рассматриваются в качестве предшественников ЗН)

Таблица 7

Кумулятивные выходы предшественников 3Н деления нейтронами активной зоны БР

Изотоп	^{233}U		^{235}U		^{236}U	
	наст. работа $\lambda' = 0,0128$ $\gamma = 0,071 \pm 0,005$	оценка [4] $[24]$ $2,70 \pm 0,62$	наст. работа $\lambda' = 0,0127$ $\gamma = 0,063 \pm 0,007$	оценка [4] $[21]$ $2,13 \pm 0,34$ $2,17 \pm 0,42$	наст. работа $\lambda' = 0,0124$ $\gamma = 0,060 \pm 0,010$	оценка [4]
^{87}Br	$2,60 \pm 0,32$	$2,70 \pm 0,62$	$2,34 \pm 0,44$	$2,13 \pm 0,34$ $2,17 \pm 0,42$	$2,34 \pm 0,67$	$2,03 \pm 0,47$
^{137}I	$1,49 \pm 0,30$	$1,56 \pm 0,36$	$2,70 \pm 0,85$	$3,34 \pm 0,77$	$3,59 \pm 1,42$	$3,87 \pm 0,89$
^{88}Br	$1,85 \pm 0,25$	$1,93 \pm 0,44$	$2,09 \pm 0,48$	$2,27 \pm 0,52$	$2,10 \pm 0,50$	$2,04 \pm 0,47$
^{138}I	$0,77 \pm 0,17$	$0,50 \pm 0,23$	$1,70 \pm 0,62$	$1,71 \pm 0,39$	$1,44 \pm 0,53$	$2,19 \pm 0,50$
^{93}Rb	$3,18 \pm 0,51$	$2,69 \pm 0,62$	$2,99 \pm 1,01$	$3,28 \pm 0,75$	$2,55 \pm 1,24$	$3,90 \pm 0,90$
^{89}Br	$0,77 \pm 0,12$	$0,99 \pm 0,23$	$1,41 \pm 0,37$	$1,79 \pm 0,41$	$0,84 \pm 0,32$	$1,62 \pm 0,37$
^{94}Rb	$0,79 \pm 0,18$	$1,03 \pm 0,24$	$1,57 \pm 0,63$	$2,19 \pm 0,50$	$2,46 \pm 1,18$	$2,24 \pm 0,52$
^{139}I	$0,49 \pm 0,16$	$0,12 \pm 0,08$	$0,74 \pm 0,32$	$0,64 \pm 0,29$	$0,22 \pm 0,13$	$0,27 \pm 0,17$

* Разложение кривой на группы с $T_{1/2} \leq 6$ с условно в связи с недостаточной статистической обеспеченностью эксперимента из-за малой массы образца

** Экспериментальное значение [28]

*** Разделение короткоживущей группы ($T_{1/2} \sim 2,5$ с) условно из-за малого числа экспериментов с коротким облучением

Таблица 8

Кумулятивные выходы предшественников ЗН деления нейтронами активной зоны БР

Изотоп	^{237}Np $\lambda_1 = 0,0127$ [24] $\gamma_1 = 0,0490 \pm 0,0031$		^{240}Pu $\lambda_1 = 0,0128$ [24] $\gamma_1 = 0,0265 \pm 0,0025$		^{241}Pu $\lambda_1 = 0,0128$ [24] $\gamma_1 = 0,0276 \pm 0,0012$		^{241}Am $\lambda_1 = 0,0122$ [24] $\gamma_1 = 0,0192 \pm 0,0021$	
	наст. раб.	оценка [4]	наст. раб.	оценка [4]	наст. раб.	оценка [4]	наст. раб.	оценка [4]
$^{87}\beta_{\gamma}$	$1,82 \pm 0,26$	$1,42 \pm 0,33$ $1,51 \pm 0,14$	$0,97 \pm 0,19$	$0,78 \pm 0,35$ $0,92 \pm 0,13$	$1,01 \pm 0,20$	$0,65 \pm 0,21$	$0,77 \pm 0,13$	$0,52 \pm 0,33$
^{137}I	$2,70 \pm 0,50$	$2,82 \pm 0,65$	$2,21 \pm 0,52$	$2,36 \pm 0,54$	$2,88 \pm 0,58$	$3,92 \pm 0,90$	$1,37 \pm 0,32$	$1,90 \pm 0,44$
$^{88}\beta_{\gamma}$	$1,74 \pm 0,33$	$1,19 \pm 0,27$	$0,93 \pm 0,22$	$0,58 \pm 0,37$	$1,13 \pm 0,20$	$0,59 \pm 0,27$	$0,78 \pm 0,17$	$0,49 \pm 0,31$
^{138}I	$0,99 \pm 0,24$	$1,32 \pm 0,30$	$0,56 \pm 0,19$	$0,86 \pm 0,39$	$1,58 \pm 0,46$	$1,87 \pm 0,43$	$0,74 \pm 0,29$	$0,60 \pm 0,27$
^{93}Rb	$2,21 \pm 0,55$	$2,94 \pm 0,68$	$1,20 \pm 0,42$	$1,86 \pm 0,43$	$1,41 \pm 0,36$	$2,00 \pm 0,46$	$1,34 \pm 0,39$	$1,20 \pm 0,28$
$^{89}\beta_{\gamma}$	$0,64 \pm 0,13$	$0,68 \pm 0,31$	$0,35 \pm 0,10$	$0,36 \pm 0,23$	$0,57 \pm 0,10$	$0,52 \pm 0,33$	$0,18 \pm 0,05$	$0,27 \pm 0,17$
^{94}Rb	$1,50 \pm 0,29$	$1,85 \pm 0,43$	$1,01 \pm 0,25$	$0,87 \pm 0,39$	$1,35 \pm 0,26$	$1,33 \pm 0,31$	$0,36 \pm 0,13$	$0,71 \pm 0,32$
^{139}I	$0,53 \pm 0,18$	$0,34 \pm 0,22$	$0,33 \pm 0,12$	$0,28 \pm 0,18$	$0,72 \pm 0,24$	$0,76 \pm 0,34$	$0,20 \pm 0,07$	$0,12 \pm 0,08$

1) экспериментальное значение [16]

2) возможен вклад ^{136}Te ($T_{1/2} = 17,3$ с) $\sim 30\%$ и ^{103}Nb $\sim 10\%$

3) возможен вклад ^{103}Nb ($T_{1/2} = 15,7$ с) $\sim 10\%$ и ^{136}Te $\sim 10\%$

4) возможен вклад ^{105}Nb ($T_{1/2} = 2,8$ с) $\sim 12\%$

Таблица 9

Кумулятивные выходы предшественников ЭИ деления нейтронами с энергией 14,7 МэВ

Исход	235U $\lambda_1=0,0127$ [25] $\gamma_1=0,049\pm0,004$		236U $\lambda_1=0,0124$ $\gamma_1=0,033\pm0,006$		238U $\lambda_1=0,0123$ $\gamma_1=0,049\pm0,005$		237Np $\lambda_1=0,0127$ $\gamma_1=0,030\pm0,004$		242Pu $\lambda_1=0,0126$ [25] $\gamma_1=0,027\pm0,004$	
	наст. раб.	оценка [4]	наст. раб.	оценка [4]	наст. раб.	оценка [4]	наст. раб.	оценка [4]	наст. раб.	оценка [4]
87 $\beta\gamma$	I, 82 \pm 0,22	I, 63 \pm 0,26	I, 29 \pm 0,29	I, 66 \pm 0,38	I, 94 \pm 0,31	I, 53 \pm 0,98	I, 11 \pm 0,18	I, 04 \pm 0,20		
137 I	I, 37 \pm 0,21	I, 24 \pm 0,29	I, 85 \pm 0,45	2, 22 \pm 0,51	3, 28 \pm 0,66	3, 34 \pm 0,27	0, 77 \pm 0,14	I, 65 \pm 0,34		
88 $\beta\gamma$	I, 41 \pm 0,28	I, 87 \pm 0,30	I, 57 \pm 0,40	I, 68 \pm 0,39	I, 90 \pm 0,37	I, 58 \pm 0,17	0, 80 \pm 0,15	I, 00 \pm 0,23		
138 I	I, 18 \pm 0,33	0, 47 \pm 0,30	I, 10 \pm 0,35	I, 03 \pm 0,24	I, 94 \pm 0,33	I, 91 \pm 0,21	0, 44 \pm 0,10	0, 82 \pm 0,27		
93 $\beta\beta$	2, 21 \pm 0,48	2, 71 \pm 0,62	I, 58 \pm 0,87	3, 23 \pm 0,74	4, 77 \pm 1,22	3, 46 \pm 0,80	3, 55 \pm 1,03	3, 52 \pm 0,94		
89 $\beta\gamma$	0, 88 \pm 0,37	I, 13 \pm 0,26	0, 70 \pm 0,23	I, 38 \pm 0,32	I, 19 \pm 0,20	I, 56 \pm 0,25	0, 34 \pm 0,07	0, 39 \pm 0,12		
94 $\beta\beta$	I, 32 \pm 0,59	I, 46 \pm 0,34	I, 50 \pm 0,59	2, 05 \pm 0,47	2, 67 \pm 0,78	2, 99 \pm 0,69	0, 42 \pm 0,17	0, 74 \pm 0,27		
139 I	0, 22 \pm 0,12	0, 14 \pm 0,09	0, 47 \pm 0,17	0, 37 \pm 0,24	0, 37 \pm 0,19	0, 91 \pm 0,58	0, 16 \pm 0,06	0, 25 \pm 0,12		

* Экспериментальное значение [30]

** Нет рекомендованных значений выходов

4. ВЫВОДЫ

4.1. Удовлетворительное согласие (в пределах погрешностей) между кумулятивными выходами ПЦ ^{233}U и ^{235}U тепловыми нейтронами, измеренными в данной работе, и соответствующими их значениями, рекомендованными и измеренными в других работах (см. таблицы 4, 5), свидетельствует о надежности предложенной методики определения выходов ядер – предшественников ЗН. Следует отметить, что полученные в настоящей работе значения являются верхней оценкой исследовавшихся кумулятивных выходов (табл.4–9).

Это обусловлено, во-первых, наличием неучтенных предшественников, вносящих вклад в выход близлежащих по периоду полураспада учитываемых ядер (табл.1). При этом в каждом конкретном случае возможные искажения зависят от сдвигов легкого и тяжелого пиков в массовых распределениях ПЦ. Как правило, искажения от неучтенных предшественников не превышают ~10%.

Во-вторых, некоторое завышение найденных значений кумулятивных выходов ПЦ являются следствием того, что в работе не учитывалась динамика распада предшественников ЗН, период полураспада материнских ядер которых превышал 3 с. Учет подобных эффектов увеличивает число определяемых параметров почти вдвое и делает решение менее устойчивым. Исследования этого завышения свидетельствуют о возможном отклонении за его счет результатов до 5% [19]. Однако при этом следует также иметь в виду, что сами материнские ядра являются излучателями ЗН и поэтому частично должны компенсировать указанный эффект.

4.2. Погрешности оцененных в работе значений кумулятивных выходов составляют, как правило, не менее 10%. Основной вклад здесь вносит нормировочный коэффициент. Для уменьшения ошибок исследуемых величин следует в каждом эксперименте точнее измерять скорость делений в образце. Тогда определение выходов по предложенной методике сможет, по-видимому, конкурировать с прямыми измерениями этих величин. Тем не менее 105 из 128 представленных в настоящей работе кумулятивных выходов предшественников ЗН до сих пор больше никем не были измерены и могут быть приняты в качестве рекомендованных значений.

4.3. На основании представленных в данной работе сведений можно найти оценки параметров σ_2 , A_p изотопных распределений тех ядер В γ и I, для которых независимый выход мало отличается

от кумулятивного. Затем с помощью этих параметров, в свою очередь, можно оценить среднее число мгновенных нейтронов, испускаемых парными осколками [20]. Так, например, для ^{242}Pu получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_2(Bz) &= 1,07 \pm 0,18 & A_p(Bz) &= 87,46 \pm 0,20 & \lambda &= 4,8 \pm 1,1 \\ \sigma_2(I) &= 1,65 \pm 0,82 & A_p(I) &= 135,59 \pm 1,01 \end{aligned}$$

При этом учитывались погрешности ненормированных значений выходов.

Список литературы

1. Кишин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967, с.136.
2. Kennett T. J., Priestwich W. V. *Incremental deconvolution.* - *Nucl. Instr. Meth.*, 1982, v. 203, p. 317.
3. Коваленко В.В. Применение метода инкрементальной деконволюции к анализу спектральных мультиплетов. - в Кн.: Автоматизация физических исследований. М.: Энергоатомиздат, 1984, с.173.
4. Rider B.F. *Compilation of fission product yields vallecitos Nuclear Center, 1980, NEDD-12154-3(B)*
5. Reeder P.L. *Survey of delayed neutron emission probabilities, 1963, PNL-SA-11747.*
6. Тараско М.З., Максютенко Б.П. О новом подходе к поиску распределения предшественников запаздывающих нейтронов. - *Ядерная физика*, 1973, т.17, вып.6, с.1149.
7. Шиманский А.А., Тараско М.З. Об ускорении итерационного процесса в методе наименьшего направленного расхождения. Препринт ФЭИ-791, Обнинск, 1977.
8. Kennett T. J., Priestwich W. V., Robertson A. *Bayesian deconvolution I: convergent properties.* - *Nucl. Instr. Meth.*, 1978, v. 151, p. 285.
9. Kondor A. *Method of Convergent Weights an Iterative Procedure for Solving Fredholm's Integral Equations of the first kind.* - *Nucl. Instr. Meth.*, 1983, v. 216, p. 177.
10. Dempster A. D., Laird N.M., Rubin D.B. *Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm.* - *J. Royal. Statist. Soc.*, 1977, v. B39, p. 1.

11. Гудков А.Н., Живун В.М., Коваленко В.В. и др. Экспериментальное определение выходов групп запаздывающих нейтронов деления ^{233}U и ^{235}U тепловыми нейтронами. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1986, вып.2, с.56.
12. Воронин Г.Г., Дюмин А.Н., Морозов А.В. и др. Генератор нейтронов с выходом 10^{12} с^{-1} . - Атомная энергия, 1984, т.57, вып.4, с.268.
13. Lund E., Rudstam E., Aagaard P., Zwicky H.-U. Gamma-branching ratios for fission products: application to the study of the yield distribution from ^{235}U (thermal neutrons, fission), BNK-51778 NEANDC Specialists meeting on yields and decay data of fission product nuclides, N.Y. (USA), 1983, p.137.
14. Brissot R., Cranson J., Ristori Ch. et al. Distributions isotopiques des gaz rares dans la fission par neutrons thermiques de ^{235}U et ^{233}U . - Nucl. Phys., 1975, A 255, p.461.
15. Quade U., Rudolph K., Skorka S. et al. Nuclear Yields of light fission products from thermal-neutron induced fission of ^{233}U at different kinetic energies, IAEA 88/4, March, 1988.
16. Waldo R.W., Karam R.A., Meyer R.A. Delayed neutron yields: Time dependent measurements and a predictive model. - Phys. Rev. C, 1981, v. C 23, n3, p.1113.
17. Alexander D.R., Peng Y.K. Calculated Time-dependent Delayed Neutron Group Yields for Thermal Neutron fission of Uranium-235, - Nucl. Sci. Eng., 1979, v. 70, p.184.
18. England T.R., Wilson W.B., Schenter R.E., Mann F.M. Aggregate Delayed Neutron Intensities and Spectra. Using Augmented ENDF/B-5 precursor data, - Nucl. Sci. Eng., 1983, v.85, p.139.
19. Маневич Л.Г., Немировский П.Э., Юркевич М.С. Константы запаздывающих нейтронов. - Препринт/ИАЭ - 4308/4. М., 1986.
20. Максютенко Б.П., Шиманский А.А. Запаздывающие нейтроны и симметричное деление. - Ядерная физика, 1979, т.29, вып.1, с.3.
21. Случевская В.М., Матвиенко И.П. Основные данные по запаздывающим нейтронам. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. ядерные константы, 1980, т.3, вып.38, с.29.
22. Nethaway D.R., Barton G.W. A compilation of fission product yields in use at the Lawrence Livermore laboratory. - Rept. UCRL-51458, 1973.

23. Chung C. Reevaluation of independent fission yields in thermal-neutron fission of ^{235}U . - *Radiochim. Acta.*, 1986, v.39, p. 113.
24. Benedetti G., Cesana A., Sangiust V., Terrani M. Delayed Neutron yields from fission of uranium-233, neptunium-237, plutonium-238, -240, -241, and americium-241. - *Nucl. Sci. Eng.*, 1982, v.80, p.379.
25. Tomlinson L. Delayed Neutrons from Fission. A compilation and evaluation of experimental data. Rept. AERE - R 6993, 1972.
26. Lang W., Clerc H.-G., Wohlfarth H. Nuclear charge and mass yields for $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$ as a function of the kinetic energy of the fission products. - *Nucl. Phys.*, 1980, A-345, p. 34.
27. Siegert G., Wollnik H., Greif J. et al. Nuclear charge distribution of fission products from $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$ of the masses 79 to 100. - *Phys. Rev.*, 1976, c. 14, n5, p. 1864.
28. Amiel S., Feldstein H. Odd-even systematics in neutron fission yields of ^{233}U and ^{235}U . - *Phys. Rev.*, 1975, v. C 11, n3, p. 845.
29. Stritmatter R.B. thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign (1978).
30. Grimm W. Charge distribution of halogen neutron emitters from neutron induced fission of thorium, uranium, and plutonium isotopes. - Mainz. Univ. Thesis (1973), 270p, USA 28; 19990 (1973).
31. Kratz J.V., Herrmann G., Yields of short-lived fission products in the 50-neutron shell region in thermal neutron induced fission of ^{235}U . - IAEA/SM-174/14, IAEA Third symposium on the physics and chemistry of fission, (USA), N.Y., 1973.
32. Marmol P., Fethweiss P., Perricos D.C. On the delayed neutrons yields of the longer-lived halogen precursors in thermal neutron fission of ^{235}U . - *Radiochim. Acta.*, 1971, v. 16, N1, p. 4.
33. Sattizahn G.E., Knight J.D., Kahn M. Short-lived bromine and selenium nuclides from fission. - *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1960, v. 12, p. 206.

С о д е р ж а н и е

1. Постановка задачи	3
2. Применение метода инкрементальной деконволюции к анализу кривых спада потока излучения запаздывающих нейтронов во времени	3
3. Результаты экспериментального исследования кумулятивных выходов предшественников ЗН	8
4. Выводы	16
Список литературы	17

Анатолий Николаевич Гудков
Сергей Владимирович Кривашеев
Александр Борисович Колдобский
Евгений Юрьевич Бобков
Наталья Степановна Пивень
Ольга Игоревна Воронина

Методика и результаты определения кумулятивных выходов предшественников запаздывающих нейтронов деления актинидных ядер

Рукопись поступила в издательский отдел 07.07.88
Редактор Е.Г.Станкевич
Ответственная за выпуск Н.С.Пивень

Л.-50535 Подписано в печать 2.09.88г. Формат 60x84 1/16
П.л. I,25 Уч.-изд.л. I,25 Тираж 100 экз.
Изд. №058-88 Заказ 2585 Цена 10 коп.

Московский инженерно-физический институт. Типография МИФИ.
115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31