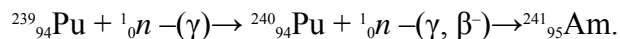


## 95. АМЕРИЦИЙ

### 95.0. Общие замечания

Классическая схема получения америция выглядит так:



Америций – металл серебристо-белого цвета, тягучий и ковкий. Больше всего он похож на металлы редкоземельного семейства, но вряд ли когда-нибудь удастся использовать на практике металлические свойства америция. Поэтому разговор пойдет лишь о его индивидуальных изотопах.

Самый долгоживущий изотоп америция –  $^{243}\text{Am}$ . Период полураспада у него 7370 лет. Используется он, главным образом, для радиохимических исследований и для накопления более отдаленных трансуранов, вплоть до фермия. Мишени из америция-243 применяли в Дубне при синтезе некоторых изотопов элементов №102, 103 и 105.

Значительно многообразнее применение изотопа  $^{241}\text{Am}$ . Его период полураспада составляет 432,2 года. Этот изотоп, распадаясь, испускает альфа-частицы и мягкие, малоэнергичные гамма-кванты. Их энергия – всего 60 кэВ. (К примеру, энергия жестких гамма-квантов, испускаемых кобальтом-60 ~ миллионы электронвольт.) Защита от мягкого излучения америция-241 сравнительно проста и немассивна: вполне достаточно сантиметрового слоя свинца. В этом одна из причин появления многочисленных приборов с америцием-241.

В частности, предложена конструкция просвечивающего аппарата размером чуть больше спичечного коробка для медицинских целей. Основа такого аппарата – шарик диаметром 3...4 см (источник гамма-излучения) которому, в отличие от рентгеновской установки не нужна громоздкая высоковольтная аппаратура – трансформаторы, выпрямители, усилители и т.д. Так источник мягкого гамма-излучения с америцием-241 используется для изучения болезней щитовидной железы. Стабильный иод, присутствующий в щитовидной железе, под действием гамма-лучей начинает испускать слабое рентгеновское излучение. Его интенсивность пропорциональна концентрации иода в исследуемой точке. Такая установка позволяет получить сведения о распределении иода в щитовидной железе, не вводя радиоактивный изотоп внутрь организма. Суммарная доза облучения пациента оказывается намного ниже, чем при радиоиодном обследовании.

Промышленность нескольких стран мира уже освоила выпуск различных контрольно-измерительных и исследовательских приборов с америцием-241. В частности, такими приборами пользуются для непрерывного измерения толщины стальной (от 0,5 до 3 мм) и алюминиевой (до 50 мм) ленты, а также листового стекла. Аппаратуру с америцием-241 используют также для снятия электростатических зарядов в промышленности пластмасс, синтетических пленок и бумаги.

Полагают, что найдет применение и более короткоживущий (141 года) изотоп –  $^{242\text{m}}\text{Am}$ , которому свойственно очень высокое сечение захвата тепловых нейтронов – около 7000 барн.

В виде индивидуальных изотопов америций очень дорог, во много раз дороже золота. По прейскуранту Комиссии по атомной энергии США грамм америция-241 оценивается в 150 долларов, а ведь это самый доступный из изотопов элемента №95. Но по мере развития атомной техники америций должен стать дешевле. Подсчитано, что к 1980 г. в США будут ежегодно получать примерно 200 кг америция и стоимость основных изотопов элемента №95 снизится до 20...50 долларов за грамм.

Для библиотеки РОСФОНД следовало отобрать три изотопа америция, имеющих период полураспада более суток и два изотопа америция, имеющих период полураспада менее суток, но нейтронные свойства которых, используются для анализа выгорания ядерного топлива.

## 95.1. Америций-240

Оценка нейтронных данных Am-240 имеется только в одной библиотеке – EAF-2003 (оценка R. A. Forrest, J. Kopecky и J-Ch Sublet).

### 1, Общие характеристики

- 1.1.  $Z = 95$  -зарядовое число;
- 1.2.  $A = 240$  (атомный вес);
- 1.3.  $AWR = 237.993$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада  $T_{1/2} = 50.8$  часа; доминирует  $\epsilon$ -распад в Pu-240, но с вероятностью  $1.9E-40\%$  испытывает  $\alpha$ -распад в Np-236.
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$ , МэВ	Ядро-продукт <sup>*</sup>
16	n,2n	-5.9654	5.9905	Am-239(11.9 ч.)
17	n,3n	-13.0594	13.1143	Am-238(98 мин.)
18	деление		0	продукты деления
102	n,g	6.5802	0	Am-241(432.2 г.)
103	n,p	2.1021	0	Pu-240(6564 г.)
107	n,a	12.2160	0	Np-237(2.144E+6 г.)

### 2 Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

#### Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов отсутствует.

Сечения в тепловой точке и резонансные интегралы приводятся в таблице 1.

Таблица 1. Резонансные свойства Am-240.

Оценка	$\sigma_{\text{tot}}$	$\sigma_f$	$\sigma_\gamma$	$I_f$	$I_\gamma$
EAF2003	-	2 830.	20.96	1 280.	201.9

### 3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

#### Полное сечение (MT=1)

В оценке EAF2003 полное сечение отсутствует.

#### Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

В оценке EAF2003 сечение упругого рассеяния отсутствует.

### Сечение деления (MT=18)

На рисунке 1 показано оцененное сечение деления Am-240 в области энергий до 20 МэВ в сравнении с оцененными сечениями деления для четных изотопов америция.

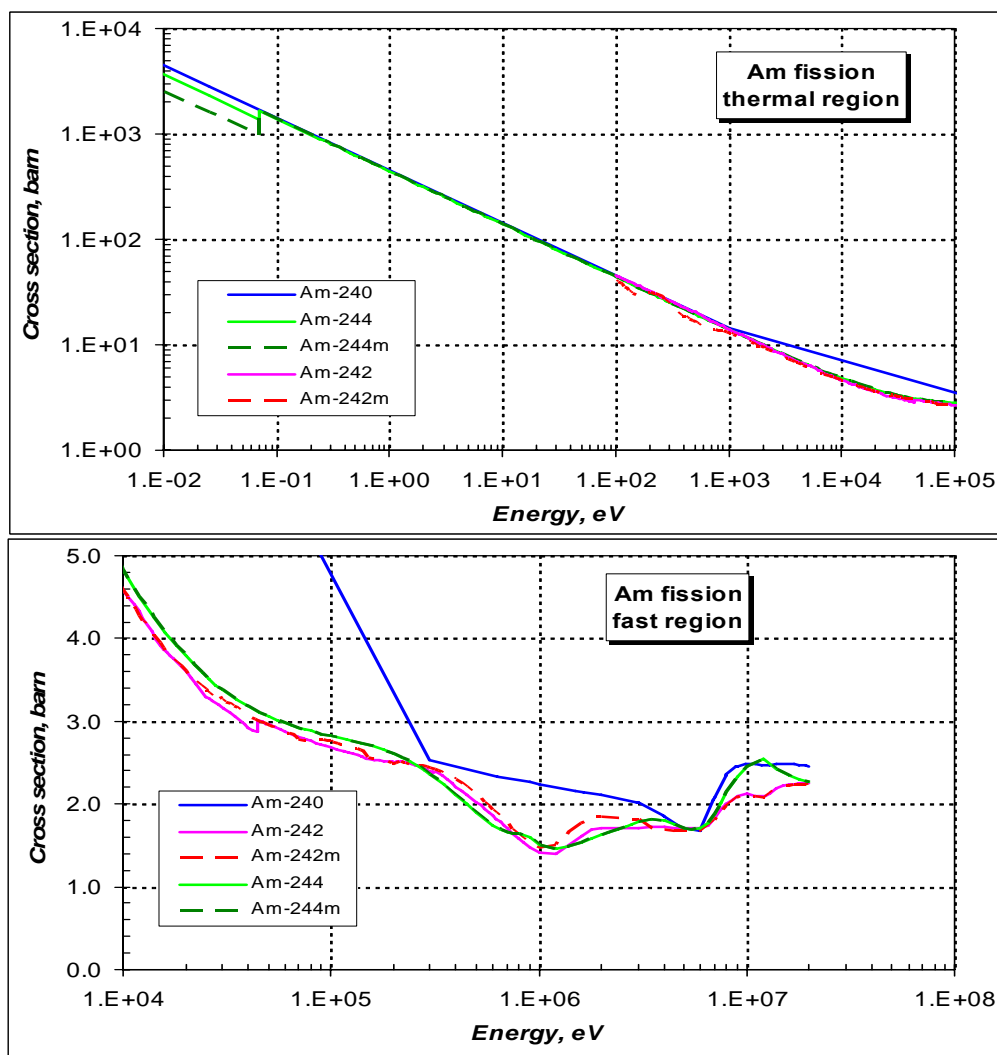


Рисунок 1 - Сечение деления в области энергий нейтронов до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке сравнения видно, что оценка сечения деления для Am-240 выполнена очень грубо. Сечения деления более высоких изотопов америция хорошо согласуются между собой по характеру поведения кривой, различаясь между собой незначительно по величине. Поэтому, как нам кажется, более корректным было бы использование в качестве оценки сечения деления Am-240, например, сечение деления для Am-244.

### Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 2 показано сравнение оцененного значения сечения радиационного захвата Am-240 с аналогичными сечениями более высоких изотопов Am.

Из приведенного на рисунке 2 сравнения видно, что в области энергий гладких сечения  $\sim$  до 10 кэВ, где сечение радиационного захвата определяется среднестатистическими резонансными параметрами, сечения более высоких изотопов америция, согласуясь между собой, отличаются от оценки EAF2003 для Am-240. Трудно

что либо сказать об оценке сечения в тепловой точке ( $E=0.0253$  эВ). Однако, для наиболее промеренных изотопов Am-242 и Am-242m зависимость сечения  $\sim 1/v$  справедливо приблизительно до 0.07 эВ. Этот факт учитывается при оценке сечения для Am-244 и Am-244m, о которых также мало что известно, как и для Am-240. Далее ход сечения для изотопов америция 244 определяется по средним резонансным параметрам с подключением оптической модели.

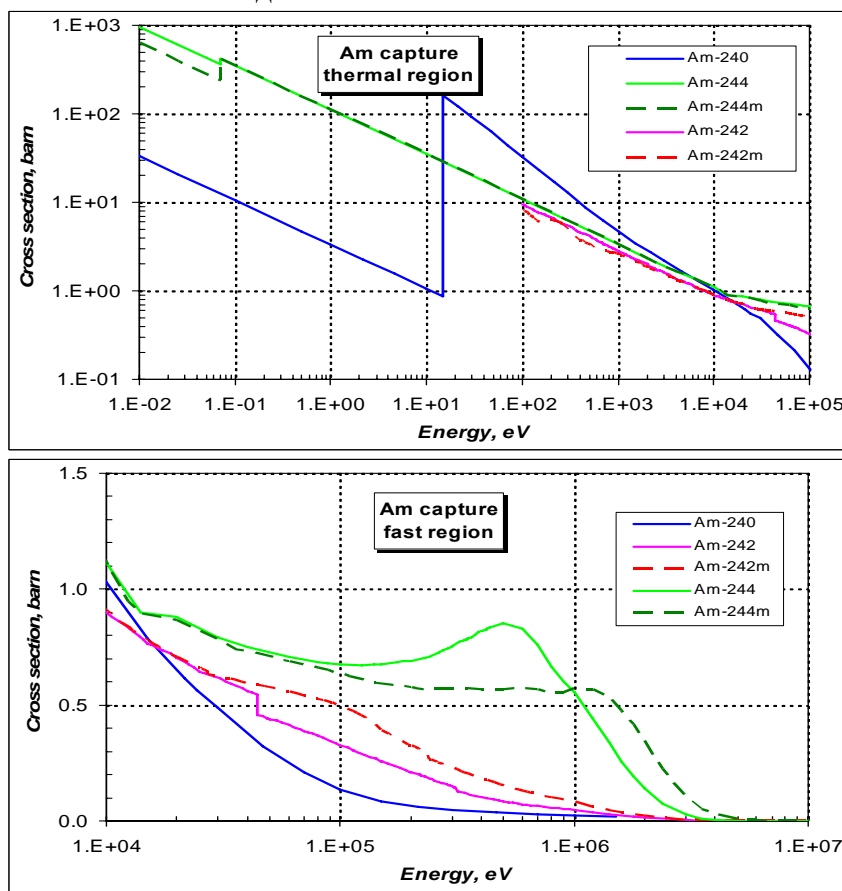


Рисунок 2 - Сечение радиационного захвата в области энергий нейтронов 1-10 МэВ.

Выше 40 кэВ в оценке сечения радиационного захвата проявляются особенности используемой модели расчета нейтронных сечений в области высоких энергий.

### Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16, 17)

На рисунке 3 показаны оцененные сечения реакции (n,2n), (n,3n). Согласно имеющейся систематики, они оценены достаточно корректно (см. раздел ...).

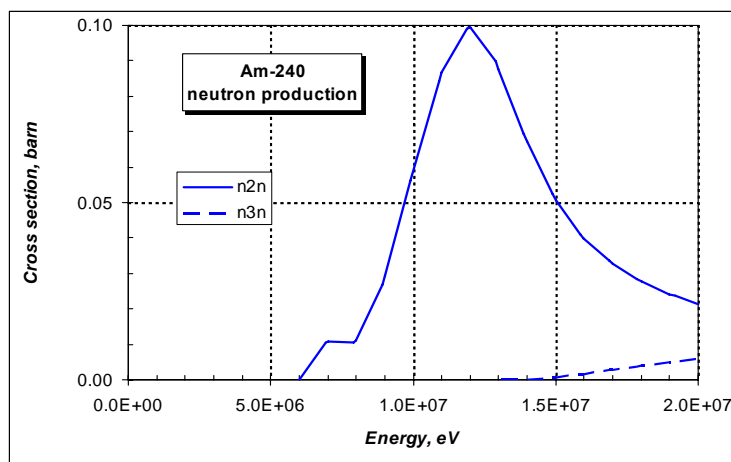


Рисунок 3 - Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) .

### Заключение.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку EAF2003. Рекомендуется ее модифицировать следующим образом. В качестве сечения деления взять оценку для Am-244 (JENDL-3.3). Сечение радиационного захвата выше 0.07 эВ и до 10 кэВ модифицировать в соответствии с оценкой сечения для Am-244.

**Автор отбора данных**  
Кошечев В.Н.

## 95.2. Америций-241

Оценки сечений Am –241 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и в библиотеке Маслова и др. (Минск).

В JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Оценка БРОНД-3 выполнена в 1997 году, в 2001 выполнена ревизия файла. Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2006 году. Оценка Маслова и др. выполнена в 1996 году. Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году, она является модификацией оценки Маслова и др. (Минск).

### 1. Общие характеристики

- 1.1.  $Z = 95$  -зарядовое число;
- 1.2.  $A = 241$  (атомный вес);
- 1.3.  $AWR = 238.986$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада  $T_{1/2} = 432(7)$  года, доминирует  $\alpha$ -распад с вкладом 4Е-10% спонтанного деления;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$ , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	n,n'	-.0411	.0413	Am-241
16	n,2n	-6.638	6.666	Am-240
17	n,3n	-12.567	12.619	Am-239
18	деление		0	продукты деления
102	n,g	5.537	0	Am-242

### 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

#### Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов во всех библиотеках ограничена энергией 150 эВ. Сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными экспериментальными данными [1] приведены в нижеследующей таблице 2.

Таблица 2. Резонансные свойства Am-241.

	JENDL-3.3	МИНСК	БРОНД-3	ENDF/B-VII	Мухабхаб, барн
$\sigma_{\text{tot}}$	654.44	599.47-	633.2	633.2	
$\sigma_f$	3.14	3.14	3.14	3.13	$3.20 \pm 0.09$
$\sigma_\gamma$	639.47	584.80	618.7	618.7	$587 \pm 12$
$I_f$	14.8	14.51	14.66	15.79	$14.4 \pm 1.0$
$I_\gamma$	1460	1351.2	1383.9	1384.8	$1425 \pm 100$

На рисунках 4 - 6 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий разрешенных резонансов.

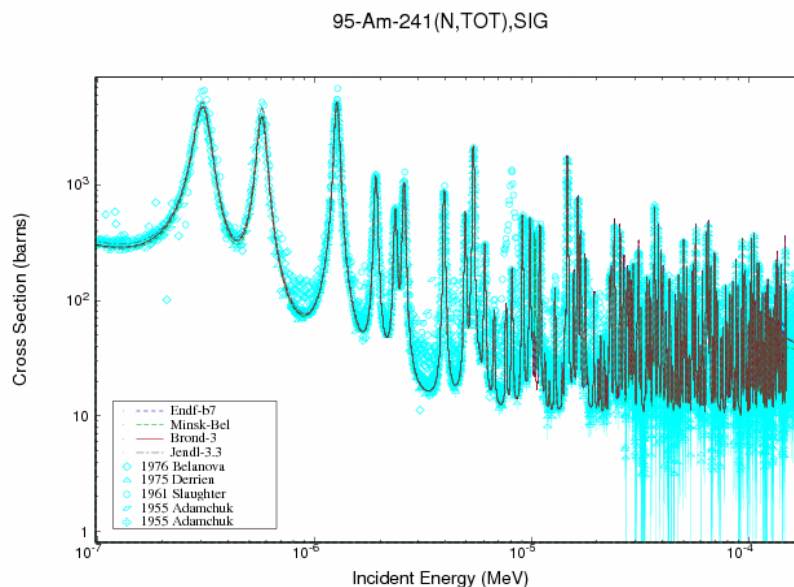


Рисунок 4. Полное сечение Am-241 в области энергий разрешенных резонансов.

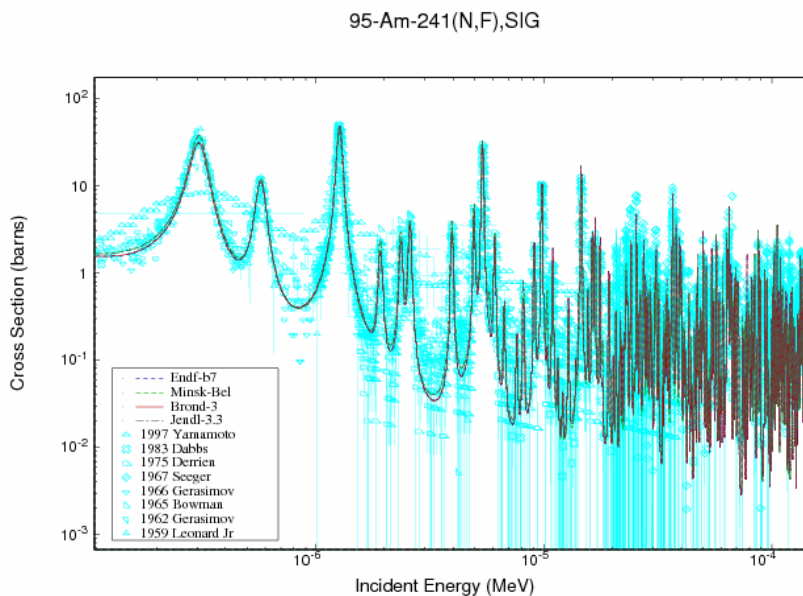


Рисунок 5. Сечение деления Am-241 в области энергий разрешенных резонансов.

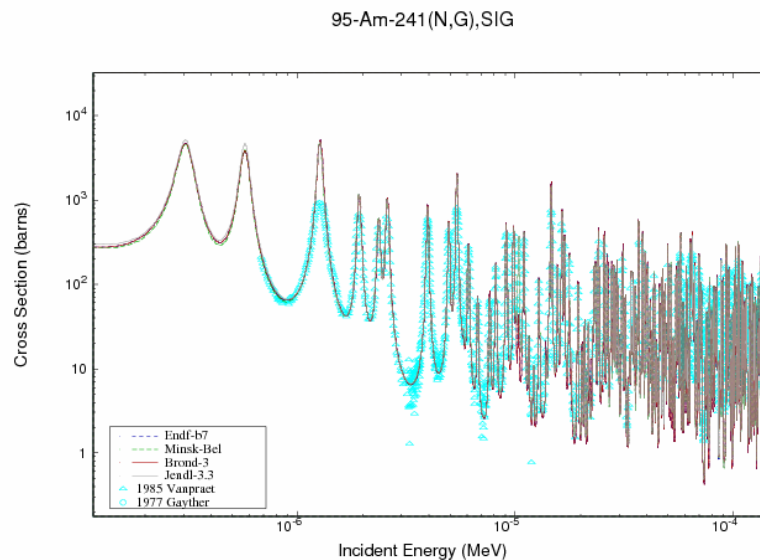


Рисунок 6. Сечение радиационного захвата Am-241 в области энергий разрешенных резонансов.

### Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов приняты следующие границы:

БРОНД-3	150 эВ – 20 кэВ
ENDF/B-VII	150 эВ – 20 кэВ
JENDL-3.3	150 эВ – 40 кэВ
МИНСК	150 эВ – 41.3 кэВ

На рисунке 7 представлены экспериментальные и оцененные данные по полному сечению в области энергий неразрешенных резонансов. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3 совпадают. Хотя оценки ENDF/B-VI и Маслова отличаются от оценки БРОНД-3, но нет существенных аргументов, чтобы отдать предпочтение одной из них.

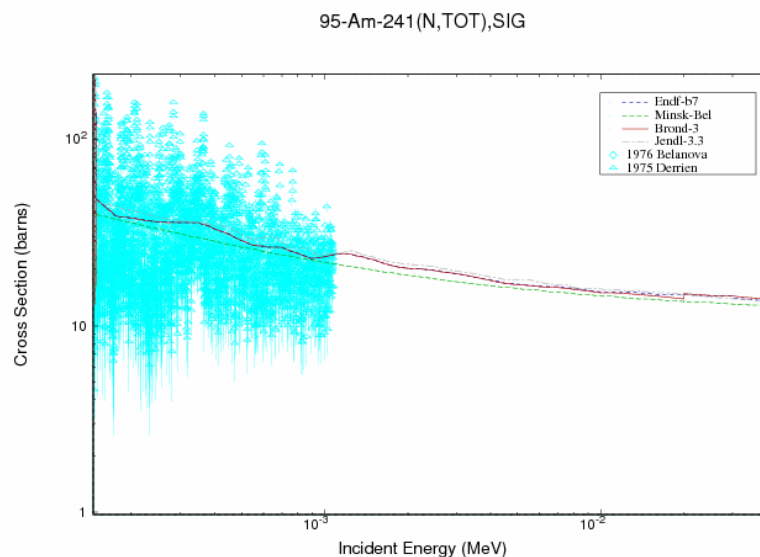


Рисунок 7. Полное сечение Am-241 в области энергий неразрешенных резонансов.

На рисунке 8 показаны сечения деления в области неразрешенных резонансов. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3, ENDF/B-VI и оценка Маслова практически совпадают.

На рисунке 9 представлены экспериментальные и оцененные данные для радиационного захвата. Оценки БРОНД-3 и JENDL-3.3, ENDF/B-VI очень близки, но

оценка Маслова лежит несколько ниже и имеет плавный ход, однако в пределах разброса имеющихся экспериментальных данных нет достаточных оснований отдать ей предпочтение.

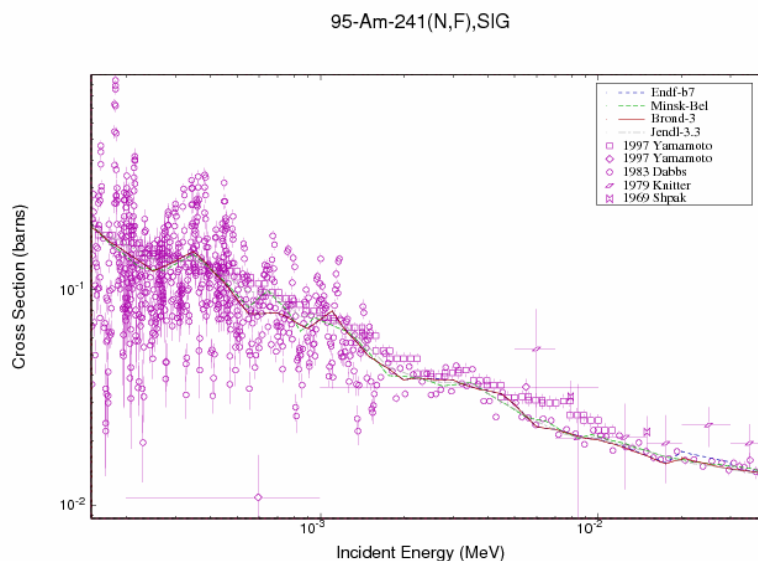


Рисунок 8. Сечение деления Am-241 в области энергий неразрешенных резонансов.

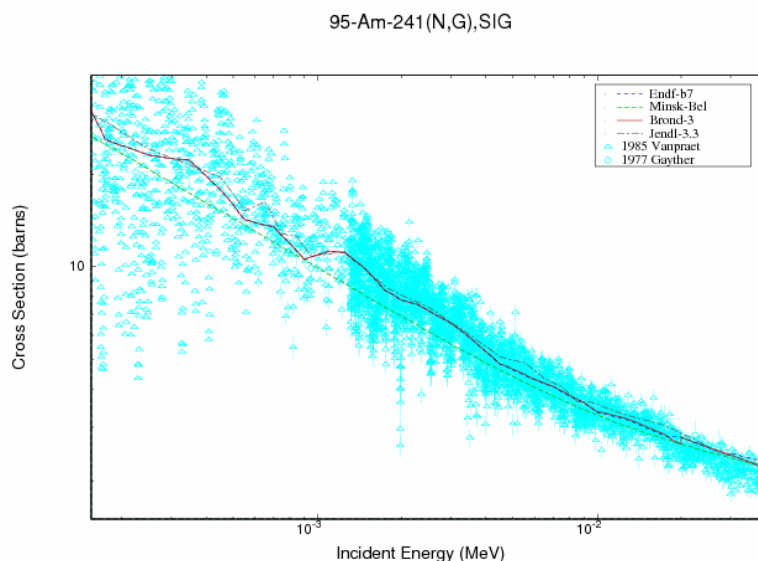


Рисунок 9. Сечение радиационного захвата Am-241 в области энергий неразрешенных резонансов.

### 3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

#### Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов имеется один ряд экспериментальных данных, по которым проведена оценка ENDF/B-VII (рис. 10). Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и Маслова, полученные расчетом по теоретическим моделям, различаются с оценкой ENDF/B-VII и между собой, причем в разных диапазонах по-разному. Может быть использована любая из представленных оценок, хотя оценка ENDF/B-VII выглядит предпочтительней.



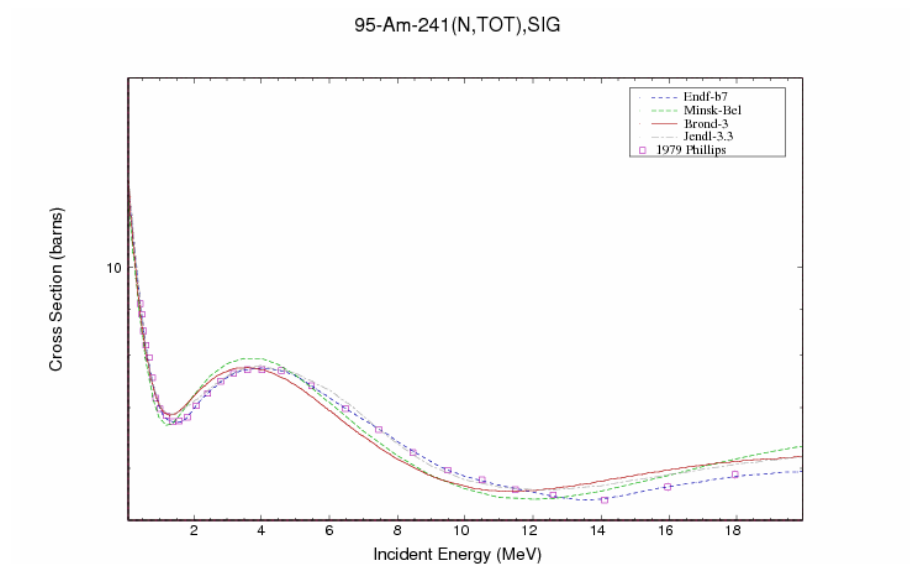


Рисунок 10. Полное сечение Am-241 в области энергий быстрых нейтронов.

### Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечение упругого рассеяния получено как разница полного сечения и суммы всех неупругих сечений. На рисунке 11 дано сравнение разных оценок. Расхождения между оценками не имеют принципиального характера, и за неимением экспериментальных данных нет возможности отдать предпочтение какой-либо одной из оценок.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, обычно, опираются на расчеты по оптической модели, и разногласия в форме дифференциальных сечений рассеяния оказываются подобными расхождениям в полных нейтронных сечениях. Без соответствующих экспериментальных данных предпочтительными являются оценки, в которых достигается лучшее описание полных сечений.

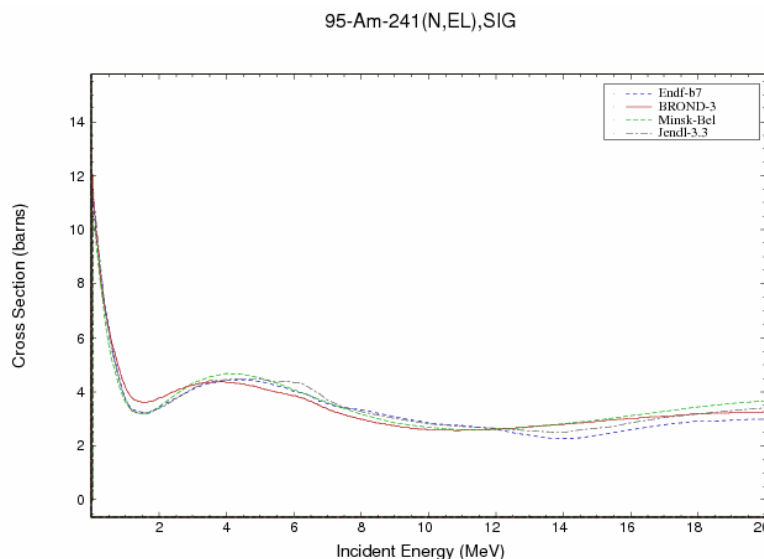


Рисунок 11. Сечение упругого рассеяния Am-241 в области энергий 1-20 МэВ.

### Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 12 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII имеют одинаковую форму функции возбуждения и в области энергий выше 6 МэВ оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII практически совпадают, однако при энергиях ниже 6 МэВ имеются различия по абсолютной величине функции возбуждения. Зависимость оценки JENDL-3.3, совпадающая с оценкой Маслова, трудно объяснима при сравнении с функцией возбуждения реакции (n,2n). Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, ее форма лучше согласована с формой функции возбуждения реакции (n,2n).

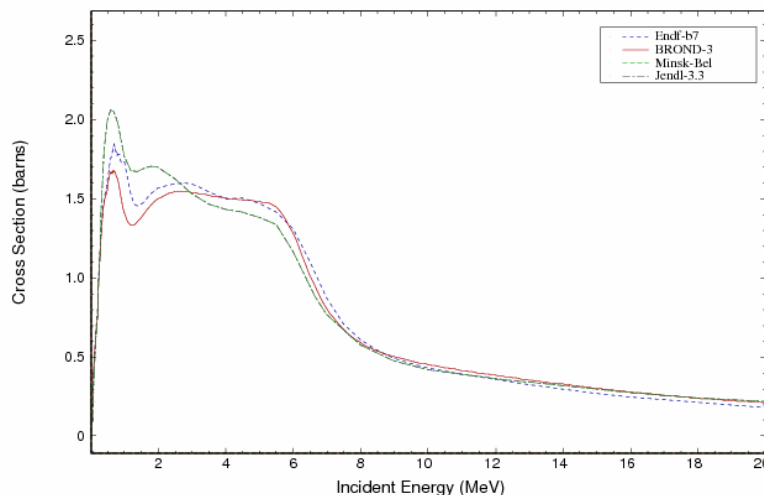


Рисунок 12. Сечение неупругого рассеяния Am-241 в области энергий 1-20 МэВ..

### Сечение деления (MT=18)

На рисунке 13 показаны оценки сечений деления. Оценки ENDF/B-VII, БРОНД-3, JENDL-3.3 в области энергий нейтронов до 12 МэВ в пределах экспериментальных погрешностей примерно согласуются между собой. Однако выше 12 МэВ данные оценок ENDF/B-VII и JENDL-3.3 имеют значительный подъем, хотя большой разброс экспериментальных данных не дает уверенности в правильности такого решения. В то же время данные оценки Маслов в этой области сильно занижены и противоречат общей тенденции некоторого подъема сечения деления в области выше максимума в сечении реакции (n,2n) (11-12 МэВ). То же самое можно сказать об оценке Маслова при энергиях 7 - 9 МэВ, предложенный минской группой ход сечения деления не подтверждается другими оценками и экспериментальными данными (и это не только для Am-241).

Оценке БРОНД-3 следует отдать предпочтение, поскольку она лучше соответствует систематическим тенденциям в поведении энергетической зависимости сечений деления, указанные в работе /7/. Кроме того, авторами этой оценки был проведен тщательный анализ и перенормировка экспериментальных сечений на новые стандартные и справочные данные, а полученные скорректированные данные были аппроксимированы методом Паде-аппроксимации /5/. На основе нового метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных уточнены рекомендуемые погрешности оцененных данных и определены ковариационные матрицы погрешностей.

На рисунке 14 дана энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление. В 2001 году Кузьминовым Б.Д. была проведена коррекция оценки на основе экспериментальных данных Хохлова /2/.

Оценка среднего числа запаздывающих нейтронов во всех оценках основана на систематике работы /3/.

Энергетические спектры нейтронов деления были взяты без изменений из оценок ENDF/B-VI.

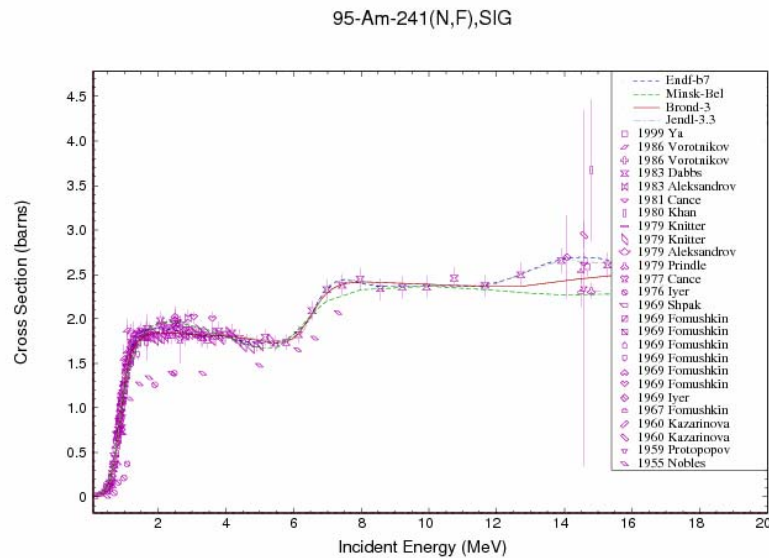


Рисунок 13. Сечение деления Am-241 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

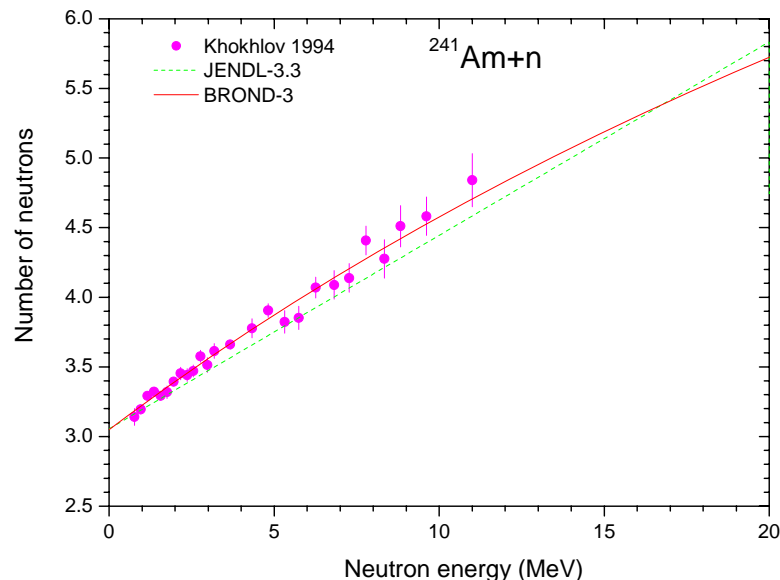


Рисунок 14. Энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление.

### Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 15 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, БРОНД-3, JENDL-3.3 и Маслова. В области энергий до 1 МэВ имеется полное согласие всех оценок. Расхождение при более высоких энергиях связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним.

Экспериментальные данные по сечениям радиационного захвата нейтронов для Am-241 имеются лишь в диапазоне энергий от 1 до 400 кэВ. Детальный анализ и корректировка этих данных выполнены в работе /8/.

В области энергий быстрых нейтронов оценки получены на основе оптико-статистических расчетов с учетом прямого и полупрямого механизма захвата.

В оценке БРОНД-3 для энергий нейтронов выше верхней границы экспериментальных точек в оценке использовалась не только энергетическая зависимость сечений захвата нейтронов, полученная из оптико-статистических расчетов, но и эмпирическая систематика сечений захвата для энергий нейтронов выше 14 МэВ /4/.

Аппроксимирующая кривая для сечений захвата была получена тем же методом, что и для сечений деления.

Анализ совокупности данных по сечениям радиационного захвата нейтронов и накоплению изотопа  $^{242m}\text{Am}$  при облучении образцов  $^{241}\text{Am}$  в реакторе БН-350 подтверждает предыдущую оценку БРОНД-3 для интегрального сечения радиационного захвата, но указывает на необходимость 10% понижения среднего значения изомерного отношения, определяющего образование изотопа  $^{242m}\text{Am}$ . Уточненная оценка изомерного отношения, представленная на рисунке 16, оптимально согласуется с имеющимися прямыми экспериментальными данными, так и с интегральными данными по накоплению  $^{242m}\text{Am}$  в быстрых реакторах. Уточнены также погрешности рекомендуемых сечений радиационного захвата нейтронов и соответствующие им ковариационные матрицы.

Уточнены оценки мягкой части спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов.

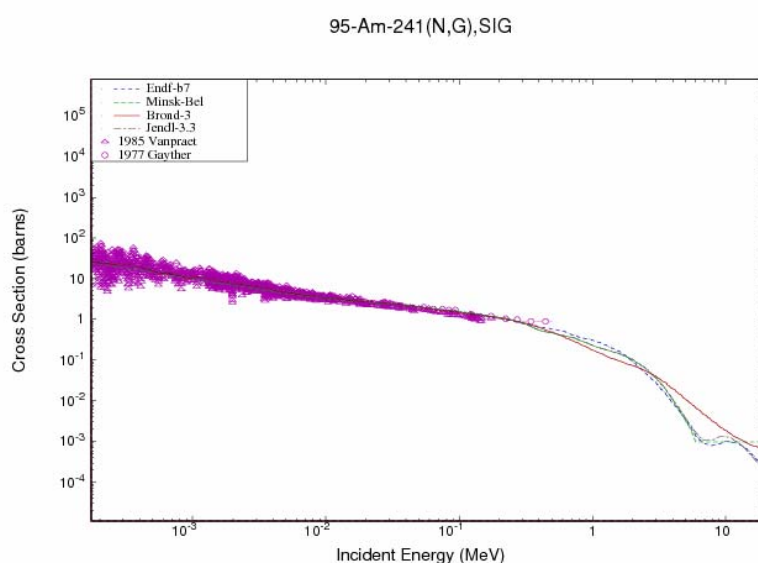


Рисунок 15. Сечение радиационного захвата Am-241 в области энергий нейтронов 1-20 МэВ.

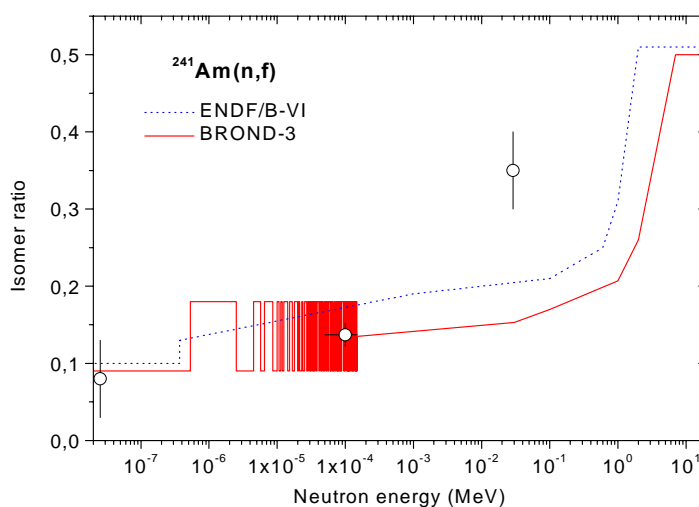


Рисунок 16. Оцененные изомерные отношения для реакции  $^{241}\text{Am}(n,\gamma)^{242m}\text{Am}$  в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

**Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)**

Оценка сечения реакции  $(n,2n)$  в БРОНД-3 была получена расчетом по теоретической модели, но согласована с систематикой функций возбуждения /6/ и с новыми экспериментальными данными работы /9/. В JENDL-3.3 принята оценка Маслова и др. Сравнение оцененных сечений реакции  $(n,2n)$  показано на рисунке 17.

Для реакции  $(n,3n)$  экспериментальных данных нет. Оценка сечения этой реакции в библиотеке ENDF/B-VII завышена. Следует отдать предпочтение любой из трех других оценок (см. рисунок 18).

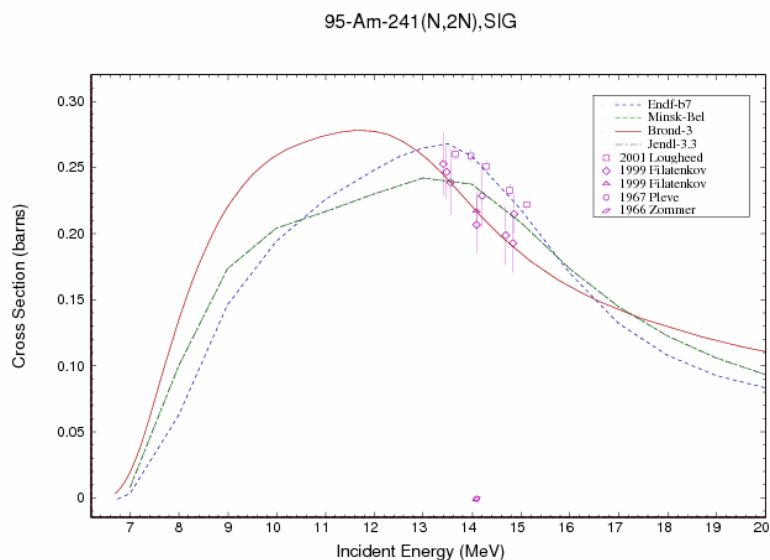


Рисунок 17. Сечение реакции  $(n,2n)$ .

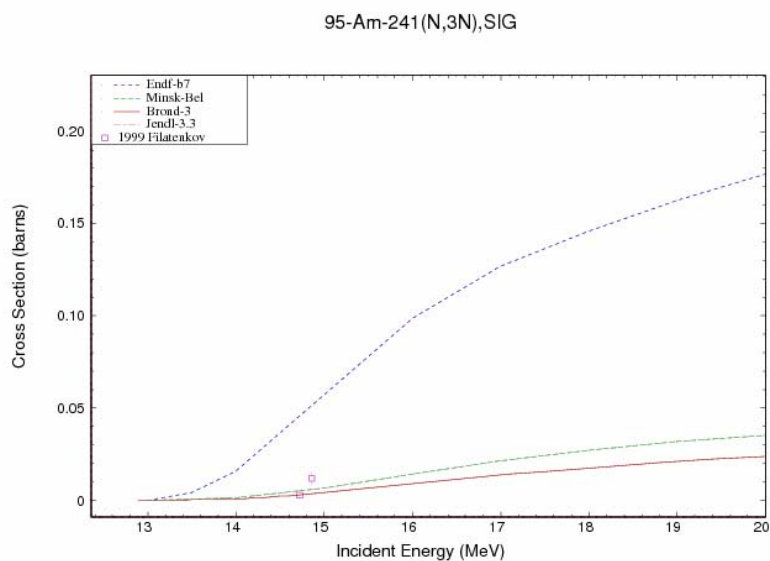


Рисунок 18. Сечение реакции  $(n,3n)$ .

## **Заключение.**

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных, и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений, что свидетельствует о высокой надежности и согласованности данных.

**Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3<sup>1</sup>.**

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этой оценки.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Mughabghab S.F.: Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY, 2006 (5-th edition of BNL-325)  
Mughabghab.B.I.A., Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов. М. Энергоатомиздат, 1986.
5. Бадиков С.А. Препринт ФЭИ-1686, Обнинск, 1985.  
Badikov S.A., Zolotarev K.I. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
6. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.  
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).
7. Блохин А.И., Манохин В.Н., Насырова С.М., Препринт ФЭИ-2620, 1997.
8. Игнатюк А.В., Толстиков В.А., Золотарев К.И. ВАНТ, Ядерные Константы, 1997, 4,
9. A.Filatenkov et al. VANT, Ser. Nuclear Constants, 1996, is. 2, p.8.

## **Автор отбора данных**

Игнатюк А.В.

## **95.3. Америций-242**

Оценки сечений Am –242 имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и в библиотеке Маслова и др. (Минск).

В JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

ENDF/B-VII выпущена в 2004 году. Она представляет собой редакцию оценки Маслова выше 44.3 кэВ. В этой области энергий оценка сечений проводилась с использованием программ ECIS96 и GNASH. Сечение деления взято таким же, как и для изотопа Am-242m, которое получено на основе экспериментальных данных.

---

1. <sup>1</sup> Файл MF=8 удалить. Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить файл MF=8 с сечениями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI.– М.Николаев.

Оценка Маслова и др. выполнена в 1997 году в рамках проекта МНТЦ (CIS-03-95).  
Оценка JENDL-3.3 датирована 1997 годом как оценка Маслова. Однако, в 2000 году она была модифицирована в области энергий выше 44.3 кэВ.

## 1. Общие характеристики

- 1.1.  $Z = 95$  -зарядовое число;
- 1.2.  $A = 242$  (атомный вес);
- 1.3.  $AWR = 239.980$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада  $T_{1/2} = 16.02$  часа, с вероятностью 82.7% испытывает  $\beta_-$ -распад в Cm-242, и с вероятностью 17.3% испытывает  $\epsilon$ -распад в Pu-242.
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ (согласно ENDF/B):

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$ , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	n,n'	-0.0441	0.04428	Am-242, Am-242m
16	n,2n	-5.5376	5.5605	Am-241
17	n,3n	-12.179	12.2293	Am-240
18	деление	200.0	0.0	продукты деления
102	n,g	6.3671	0.0	Am-243

## 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

### Область разрешенных и неразрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов во всех библиотеках ограничена энергией 100 эВ.

Область неразрешенных резонансов – 44.3 кэВ.

Сечения для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными экспериментальными данными Мухабхаба приведены в таблице 3.

Таблица 3. Резонансные свойства Am-242, барн.

	JENDL-3.3	МИНСК	ENDF/B-VII	Мухабхаб
$\sigma_f$	2095.	2095.	2095.	2100±200
$\sigma_\gamma$	219.	219.	219.	-
$I_f$	987.	987.	987.	-
$I_\gamma$	187.	187.	187.	-

Как видно из информации приведенной в таблице 3, резонансные свойства всех оценок одинаковы и согласуются с рекомендацией Мухабхаба.

## 3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

### Полное сечение (MT=1)

В быстрой области энергий нейтронов экспериментальные данные отсутствуют. Оценки ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и Маслова, получены расчетом по разным теоретическим моделям, различаются между собой, причем в разных диапазонах по-разному (см. рисунок 19). Может быть использована любая из представленных кривых.



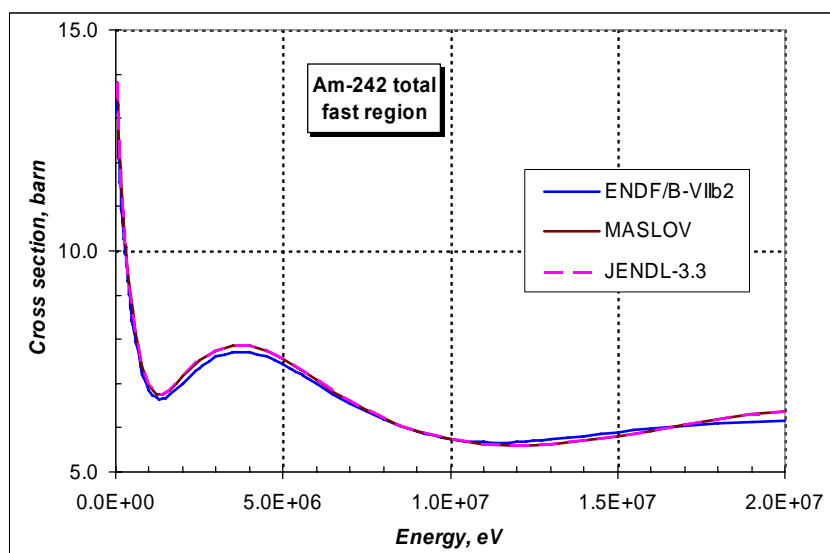


Рисунок 19. Полное сечение Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

### Сечение деления (MT=18)

На рисунке 20 показаны оценки сечений деления.

Из приведенного на рисунке 20 сравнения видно, что оценки ENDF/B-VII и Маслова согласуются между собой примерно с 30% погрешностью. Однако в оценке Маслова сечение рассчитывалось по статистической модели, где параметры барьеров деления подгонялись под результаты расчета для Am-242m. В оценке ENDF/B-VII, как указано информационной секции, сечение деления взято таким же, как и для изотопа Am-242m, которое получено на основе экспериментальных данных.

На рисунке 20 дана и энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление. Для всех оценок она одна и та же.

Оценка среднего числа запаздывающих нейтронов во всех оценках так же одна и та же.

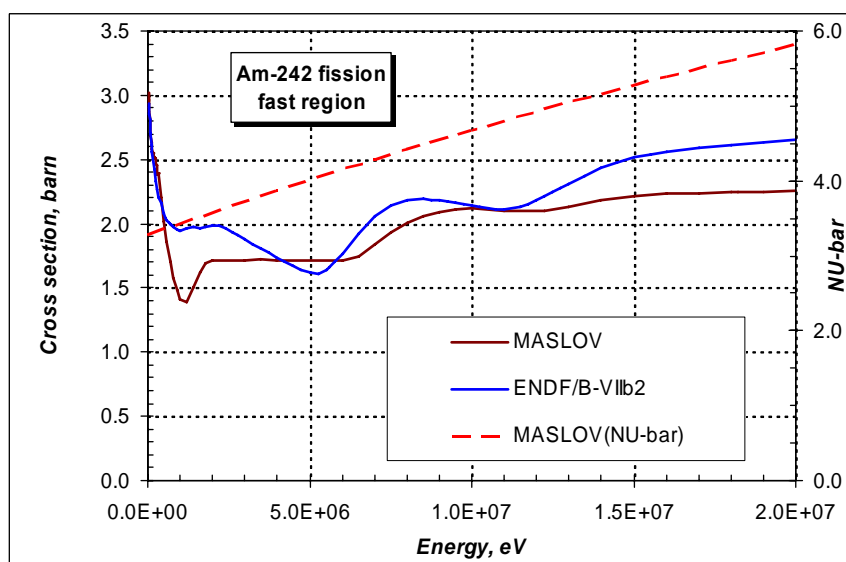


Рисунок 20. Сечение деления Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

На рисунке 21 показано сравнение сечения деления для основного изотопа Am-242 и для его изомерного состояния, которые были оценены для библиотеки ENDF/B-VII. Там же показано оцененное Масловым сечение деления для Am-242. Из рисунка 21 видно, что

оценка Маслова лучше согласуется по поведению сечения с оценкой сечения для долгоживущего изомера, т.е. она является предпочтительнее, чем оценка ENDF/B-VII.

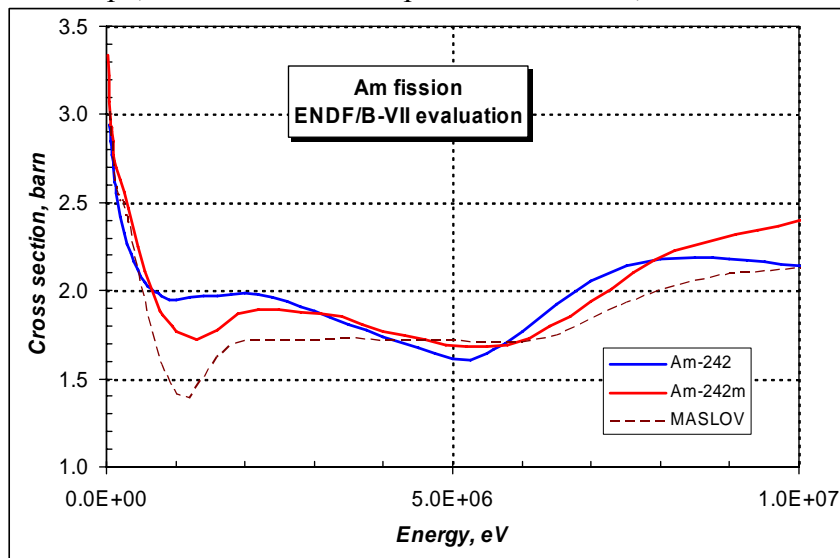


Рисунок 21. Сравнение сечения деления Am-242 и Am-242m.

### Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

На рисунке 22 приведены оценки сечений радиационного захвата из библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и Маслова. В области энергий до 1 МэВ имеется полное согласие всех оценок. Расхождения при более высоких энергиях связаны с использованием различных моделей ядерных реакций и входных параметров к ним.

Экспериментальных данных по сечениям радиационного захвата нейтронов для Am-242 нет.

В области энергий быстрых нейтронов оценки получены на основе оптико-статистических расчетов с учетом прямого и полупрямого механизма захвата.

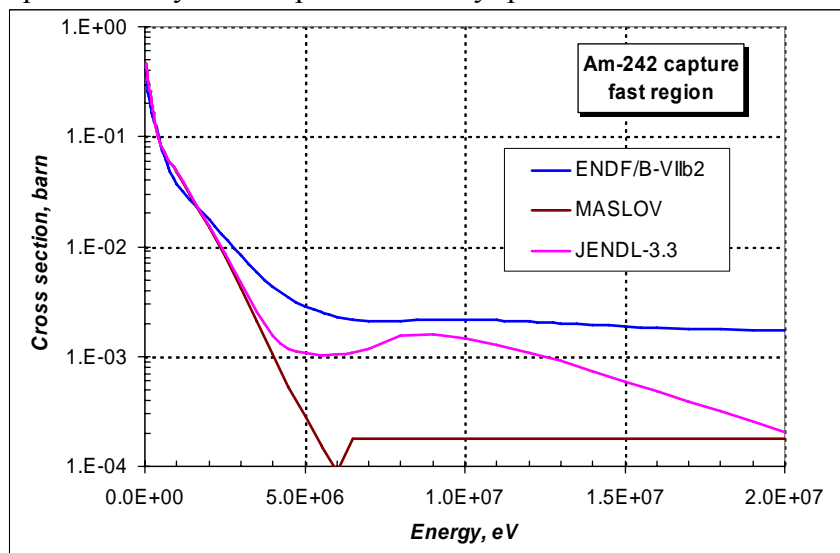


Рисунок 22. Сечение радиационного захвата нейтронов на Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 22 сравнения видно, почему в JENDL провели коррекцию сечения захвата в быстрой области. Ход сечения захвата японской оценки предпочтительнее остальных.

### Сечение реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

Сравнение оцененных сечений реакции (n,2n) и (n,3n) показано на рисунке 23. По форме кривой более привлекательной является оценка Маслова.

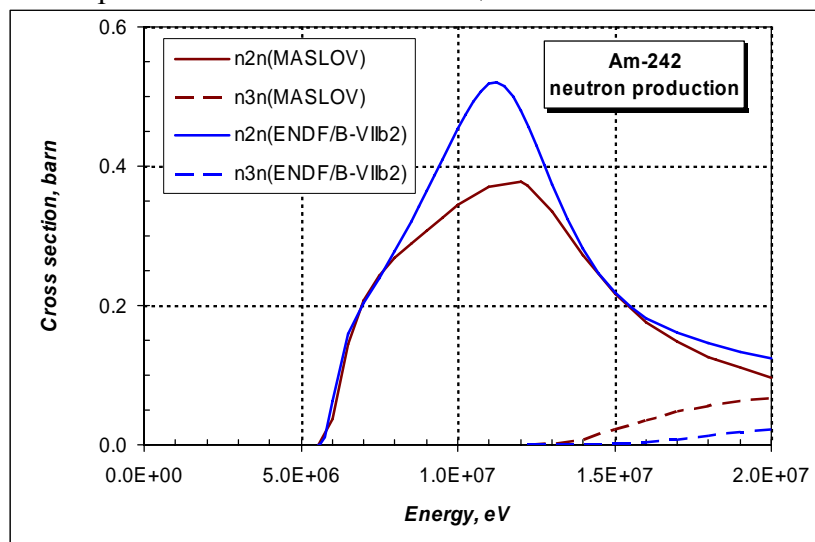


Рисунок 23. Сечение реакции (n,2n) и (n,3n) на Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

### Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет. На рисунке 24 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. Они различаются ~ на 20% в максимуме сечения. Оценке Маслова следует отдать предпочтение, ее форма лучше согласована с формой функции возбуждения реакции (n,2n).

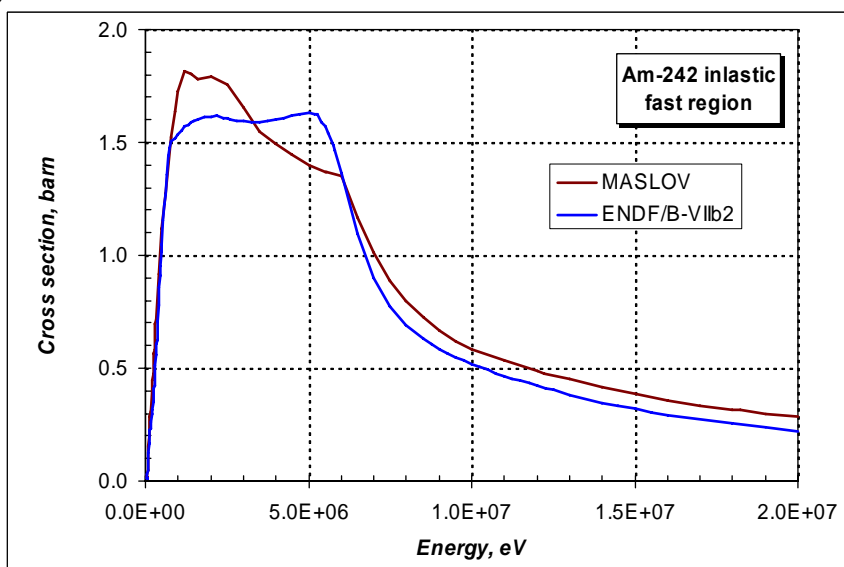


Рисунок 24. Сечение неупругого рассеяния Am-242 в области энергий до 20 МэВ.

Следует отметить, что согласно оценке EAF2003 неупругое рассеяние нейтронов на ядре Am-242 приводит к образованию долгоживущего изомера Am-242m. Следовательно, принятый в РОСФОНД файл оцененных данных необходимо дополнить данными об образовании долгоживущего изомера в разделе MF10, MT4.

#### **Заключение.**

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области резонансных энергий все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных.

В области высоких энергий предпочтительнее оказывается откорректированная версия оценки Маслова, принятая в JENDL-3.3.

**Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3.<sup>2</sup>**

#### **Автор отбора данных**

Кощеев В.Н.

### **95.4. Америций-242m**

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие файлы для америция-242m:

Минск-1997 – оценка В.М.Маслова и др., 1997;

JENDL-3.3 (=JEFF-3.1) – оценка T.Nakagawa, 2002, в которой принята оценка Минск-1997 для большинства сечений, но пересмотрена оценка сечений деления;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатьюка и др., 2001, в которой также принята оценка Минск-1997 для большинства сечений, но пересмотрена оценка сечений и числа нейтронов деления;

ENDF/B-VII – оценка P.Telou и др., 2005.

#### **1. Общие характеристики**

**1.1.**  $Z = 95$  -зарядовое число;

**1.2.**  $A = 242$  (атомный вес);

**1.3.**  $AW = 239.9800$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);

**1.4.** Радиоактивен с периодом полураспада  $T_{1/2} = 141 \pm 2$  года, доминируют гамма-переходы с энергией 48.63 кэВ в основное состояние (99.55%) с вкладом 0.45%  $\alpha$ -распада и  $\sim 4.7 \cdot 10^{-9}$  % спонтанного деления.

#### **2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)**

##### **Область разрешенных резонансов**

В атласе нейтронных резонансов Мугаббаба [84M, 06M] приведены параметры резонансов с энергиями до 19.7 эВ. В оценке Минск-1997 верхняя граница области

---

<sup>2</sup> Файл нейтронных данных следует дополнить информацией об образовании долгоживущего изомера Am-242m. Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235.- М. Николаев.

разрешенных резонансов расширена до 43 эВ, и параметры резонансов выше 19.7 эВ определены на основе анализа данных по сечениям деления [84В]. Для всех резонансов приняты значения радиационных ширин 50 мэВ и радиус потенциального рассеяния  $R_0 = 9.1677$  фм. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованных сечений деления и захвата тепловых нейтронов [06М]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближение MLBW.

Оценка Минск-1997 для разрешенных резонансов была включена без изменений в JENDL-3.3, ENDF/B-VII и БРОНД-3.

Делительные ширины, принятые в Минск-1997, приведены на рисунке 25 в сравнении с данными компиляции Мугабгаба [06М]. Для резонансов с энергиями ниже 20 эВ разногласия оценок делительных ширин весьма незначительны, а выше этой энергии имеются лишь данные, полученные минской группой и принятые во всех последних оценках.

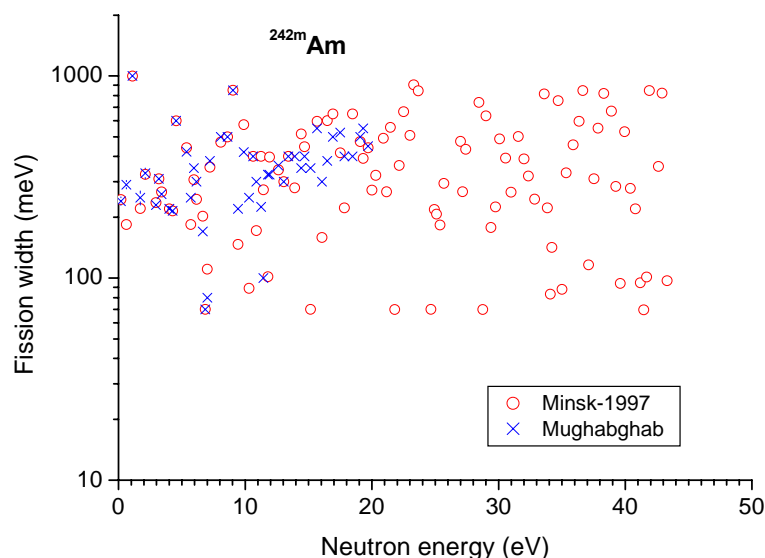


Рисунок 25. Делительные ширины разрешенных резонансов в оценке Минск-1997 в сравнении с данными компиляции ширин в атласе нейтронных резонансов [06М]

Рассчитанные сечения (в барнах) для тепловых нейтронов (2200 м/с) приведены в следующей таблице 4.

Таблица 4. Резонансные свойства Am-242m, барн.

Оценка	Минск-1997	ENDF/B-VII	Эксперим. [84М], [06М]	
полное	7624.7	7624.7	--	
упругое	5.25	5.25	--	
захвата	1229.2	1229.2	2000±600	1290±300
деления	6390.2	6390.2	6950±280	6200±200
резонансный интеграл выше 0.5 эВ:				
захвата	237.8	239.0	--	211 выч.
деления	1527.0	1541.8	1800±65	1570±80

В новом издании атласа нейтронных резонансов [06М] экспериментальные значения сечений и резонансных интегралов деления и захвата нейтронов были уточнены по отношению к предыдущему изданию [84М], и в пределах погрешности оценки согласуются с уточненными данными. Небольшие различия резонансных интегралов в оценках Минск-1997 и ENDF/B-VII обусловлены влиянием вне резонансной области.

На рисунке 26 представлена энергетическая зависимость числа s-резонансов, содержащихся в компиляции [06М] и оценке Минск-1997, а также кумулятивных сумм

приведенных нейтронных ширин. Чтобы получить оптимальную оценку пропуска резонансов, наряду с анализом энергетической зависимости кумулятивной суммы резонансов обычно привлекают анализ соответствия параметров резонансов Портер-Томасову распределению нейтронных ширин. Результаты такого анализа для набора резонансных параметров Минск-1997 представлены на рисунке 27. Данный анализ показывает, что в наборе s-резонансов пропущено более 50% слабых резонансов, и средние расстояния между резонансами, исправленное с учетом пропуска, равно  $D_0=0.23\pm0.05$  эВ и нейтронная силовая функция s-резонансов равна  $S_0=(1.32 \pm 0.18) 10^{-4}$ . В аналогичном анализе Мухабхаба [06] для резонансов до 20 эВ получены значения  $D_0=0.29\pm0.02$  эВ и  $S_0=(1.47\pm 0.25) 10^{-4}$ , тогда как в анализе Маслова и др. [2] для набора резонансов до 37 эВ получены  $D_0=0.27\pm0.03$  эВ и  $S_0=(1.22\pm 0.25) 10^{-4}$ . С учетом погрешностей значения  $S_0$  можно считать совпадающими во всех оценках, тогда как значения  $D_0$  в анализе Мухабхаба [06] кажется несколько завышенным, по-видимому, вследствие недооценки пропуска резонансов.

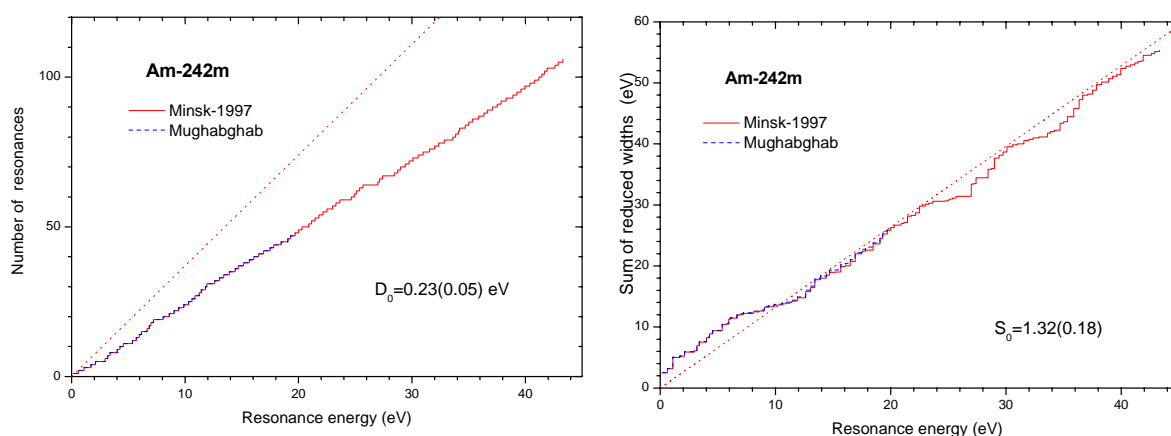


Рисунок 26. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в различных оценках. Штрих-пунктиром показаны оценки, полученные с учетом пропуска резонансов

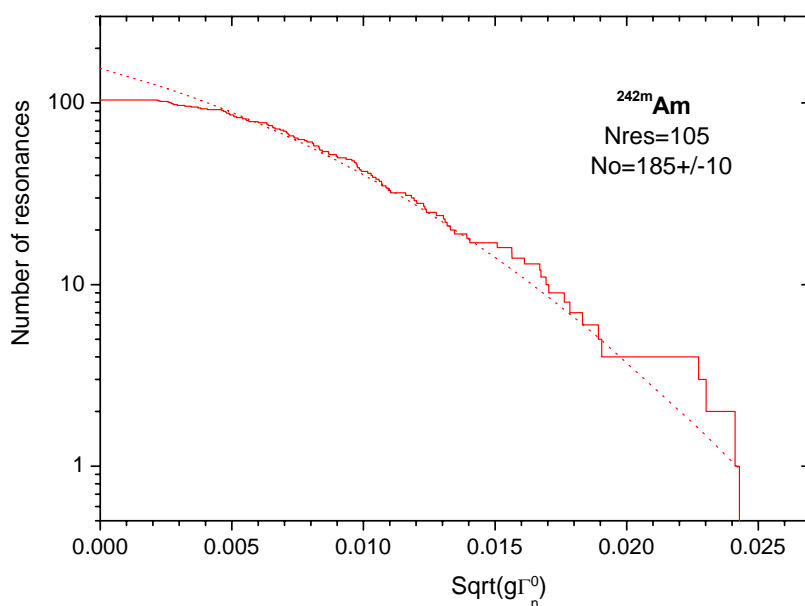


Рисунок 27. Анализ пропуска резонансов на Am-242m.

На рисунке 28 показана оценка сечений деления Минск-1997 для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Описание экспериментальных данных является достаточно хорошим во всем диапазоне энергий до

43 эВ, и это послужило основной причиной включения оценки Минск-1997 в файлы всех современных национальных библиотек ядерных данных.

Для полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов резонансная структура имеет вид, аналогичный сечениям деления, но экспериментальных данных для этих сечений нет.

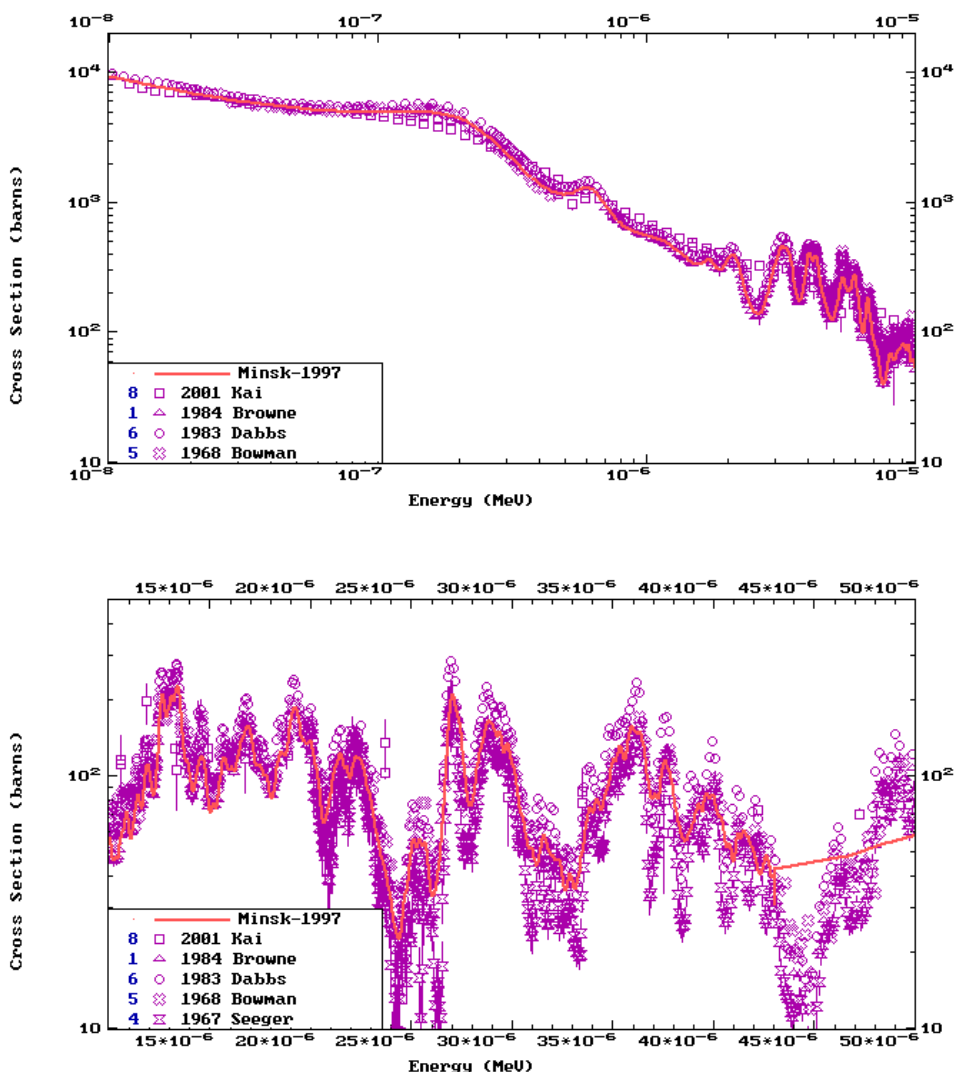


Рисунок 28. Оценки сечений деления Am-242m в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

### Область неразрешенных резонансов

Верхняя граница области неразрешенных резонансов в оценке Минск-1997 принята равной 27.283 кэВ, и эта оценка включена без изменений в файлы всех указанных выше библиотек. В рассмотрение включены орбитальные моменты для s-, p- и d-волн, и в соответствии с правилами формата ENDF/B для вычисления нейтронных сечений принято приближение SLBW.

Радиус потенциального рассеяния и нейтронные силовые функции p- и d-волн были взяты из расчетов по оптической модели, тогда как силовая функция s-волны, среднее расстояние между резонансами и средние радиационные и делительные ширины были приняты в соответствии с результатами анализа разрешенных резонансов. Энергетическая

и спиновая зависимость делительных ширин учитывалась в рамках стандартной статистической модели двугорбого барьера деления [97M]. Для нижней границы использованные параметры имели следующие значения:

$R_0 = 9.1677$  фм,  $S_0 = 1.215E-4$ ,  $S_1 = 2.020E-4$ ,  $S_2 = 1.54E-4$ ,  $D_0 = 0.271$  эВ,  $\Gamma_g = 0.050$  эВ и  $\Gamma_f = 395$  эВ.

На рисунке 29 оценка сечения деления Минск-1997 для области неразрешенных резонансов приведена в сравнении с экспериментальными данными. Описание данных следует признать вполне удовлетворительным, и без дополнительных экспериментальных данных не видно каких либо возможностей улучшения рассматриваемой оценки.

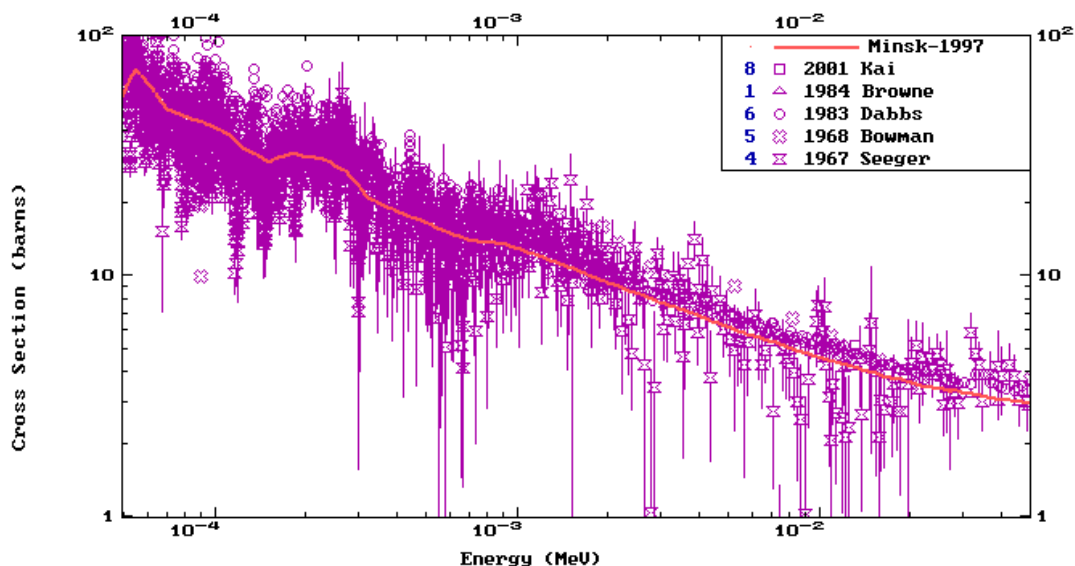


Рисунок 29. Сечение деления Am-242m (Минск-1997) в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными.

### 3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

#### 3.1. Полные сечения (MT=1)

Экспериментальных данных о полных нейтронных сечениях вне резонансной области для  $^{242m}\text{Am}$  нет. Поэтому все оценки полных сечений проводятся на основе расчетов в рамках оптической модели. Соответствующие оценки для энергий нейтронов выше 100 кэВ представлены на рисунке 30. Отличие оценок ENDF/B-VII и Минск-1997 обусловлено различием использованных оптических потенциалов, но разногласия оценок весьма незначительны. В JENDL-3.3 и БРОНД-3 была принята оценка полных сечений минской группы во всем диапазоне энергий нейтронов.

#### 3.2. Сечение упругого рассеяния и угловые распределения нейтронов (MT=2).

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно, определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рисунке 31 показано сравнение оценок интегральных сечений упругого рассеяния нейтронов.



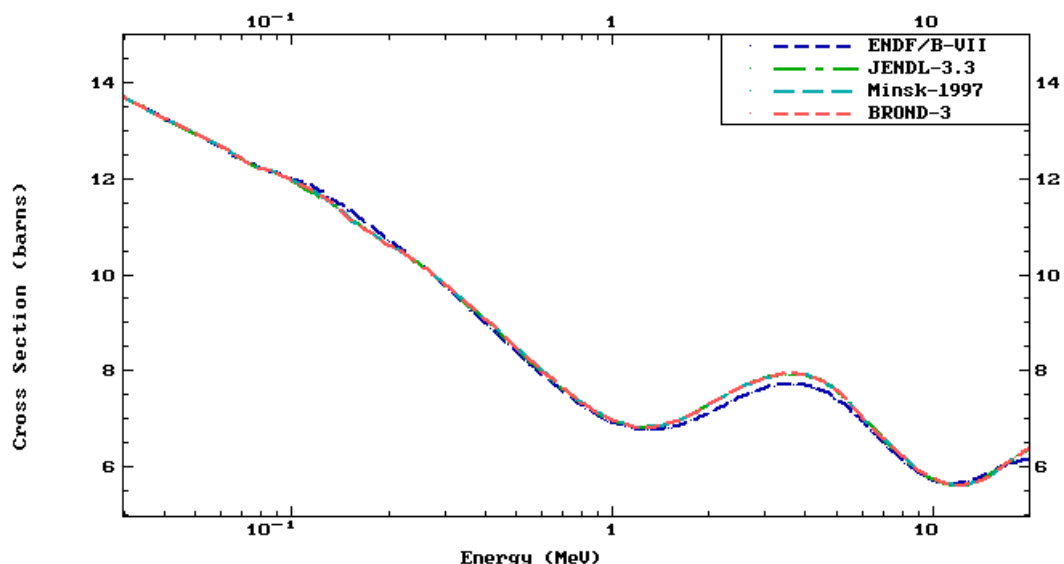


Рисунок 30. Сравнение полных нейтронных сечений Am-242m вне резонансной области

Несмотря на совпадение оценок полных нейтронных сечений, оценки JENDL-3.3, Минск-1997 и БРОНД-3 для сечений упругого рассеяния заметно различаются в области быстрых нейтронов, и эти различия обусловлены соответствующими разногласиями оценок сечений деления. Следует ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будет оценка, в которой достигнуто лучшее описание сечений деления рассматриваемого изотопа.

Оптическая модель используется также для расчетов угловых распределений упруго и неупруго рассеянных нейтронов. Различия полученных угловых распределений для упругого рассеяния весьма незначительны в оценках Минск-1997 и ENDF/B-VII. В JENDL-3.3 и БРОНД-3 были приняты оценки угловых распределений минской группы.

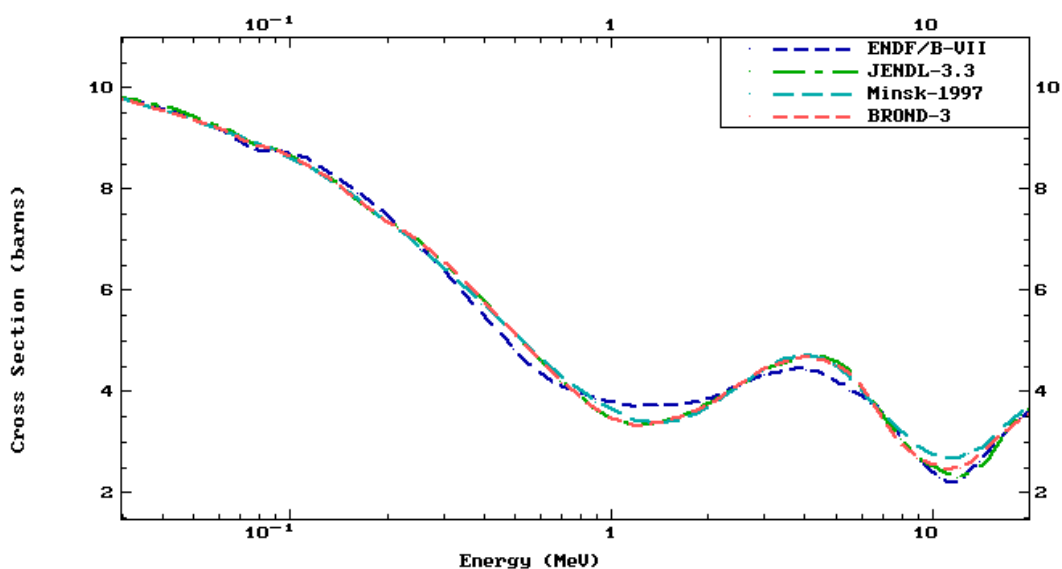


Рисунок 31. Сравнение сечений упругого рассеяния Am-242m вне резонансной области

### 3.3. Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102).

Экспериментальных данных по сечению радиационного захвата нейтронов для  $^{242m}\text{Am}$  нет, и оценки, обычно, проводятся на основе расчетов по оптико-статистической модели с привязкой радиационных силовых функций к значениям, полученным из анализа нейтронных резонансов. Сравнение оценок Минск-1997 и ENDF/B-VII для сечений радиационного захвата быстрых нейтронов показано на рисунке 32. Различие между оценками сравнительно невелико в области энергий нейтронов до 2 МэВ, и только выше этой энергии разногласия оценок становятся существенными. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколь либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

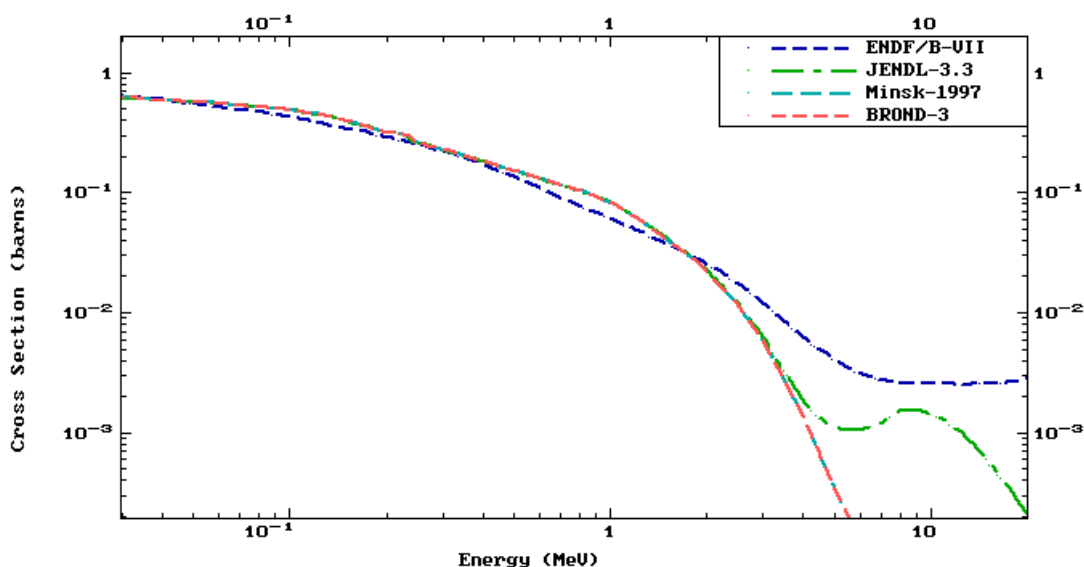


Рисунок 32. Сравнение сечений радиационного захвата Am-242m вне резонансной области

### 3.4. Реакция деления (MT=18)

Для сечений деления имеется большой объем экспериментальных данных, между которыми, однако, имеются существенные разногласия. Новые экспериментальные данные [97F], полученные в конце девяностых годов, лежат несколько ниже основной массы предыдущих данных, и на эти данные ориентируется большинство недавних оценок сечений деления. Полный статистический анализ всей совокупности экспериментальных данных был проведен в работе [01И], и его результаты приняты в качестве оценки БРОНД-3, приведенной на рисунке 33 совместно с экспериментальными данными и другими оценками. На основе метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных были уточнены рекомендуемые погрешности оцененных сечений деления и определена ковариационная матрица погрешностей. Важной особенностью полученной ковариационной матрицы является достаточно большие значения далеких недиагональных элементов, отражающие корреляции рекомендуемых данных в широких энергетических интервалах.

В области энергий нейтронов до 7 МэВ все оценки удовлетворительно согласуются с данными измерений [84В, 97F], которые представляются наиболее надежными. Для

более высоких энергий оценку Минск-1997, несомненно, следует признать заниженной и противоречащей экспериментальным данным. С другой стороны, оценки JENDL-3.3 и ENDF/B-VII, описывающие экспериментальные данные в области энергий выше 10 МэВ, имеют энергетическую зависимость, противоречащую общим закономерностям «ступенеобразного» роста сечений деления при увеличении энергии нейтронов. Поэтому оценка БРОНД-3, оптимально описывающая всю совокупность экспериментальных данных, представляется для сечений деления наиболее надежной.

Наряду с сечениями деления одной из важнейших характеристик делящихся ядер является множественность нейтронов деления. Оценки числа вторичных нейтронов, испускаемых при делении  $^{242m}\text{Am}$ , приведены на рисунке 34 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными [70J, 81H]. Погрешности экспериментальных данных для нейтронов с энергиями выше 2 МэВ весьма значительны, и на их основе нельзя сделать выбор между оценками Минск-1997 и БРОНД-3, различия которых весьма незначительны. В JENDL-3.3 и ENDF/B-VII принята оценка Минск-1997.

Для среднего числа запаздывающих нейтронов в Минск-1997 принята оценка Брэди и Ингланда [89B]:  $\nu_d = 0.0078$  для энергии нейтронов ниже 4 МэВ и  $\nu_d = 0.00427$  выше 7 МэВ. Эта же оценка включена в JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Аналогичная оценка БРОНД-3 основана на рекомендациях работа [00Z]:  $\nu_d = 0.0069$  для энергии нейтронов ниже 4 МэВ и  $\nu_d = 0.00414$  выше 7 МэВ. Без дополнительной экспериментальной информации вряд ли можно обосновать выбор между этими оценками.

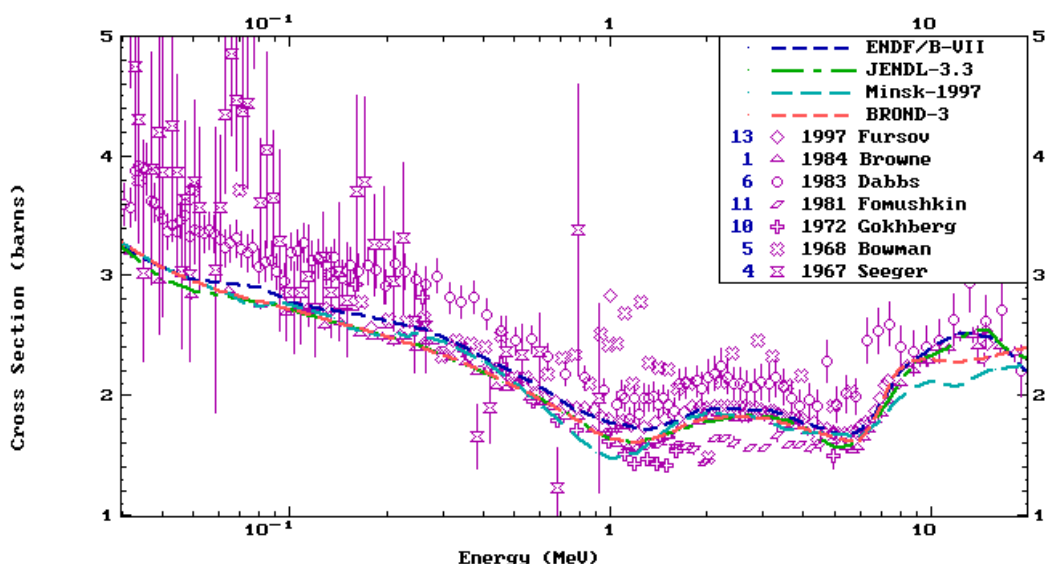


Рисунок 33. Оценки сечений деления Am-242m вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

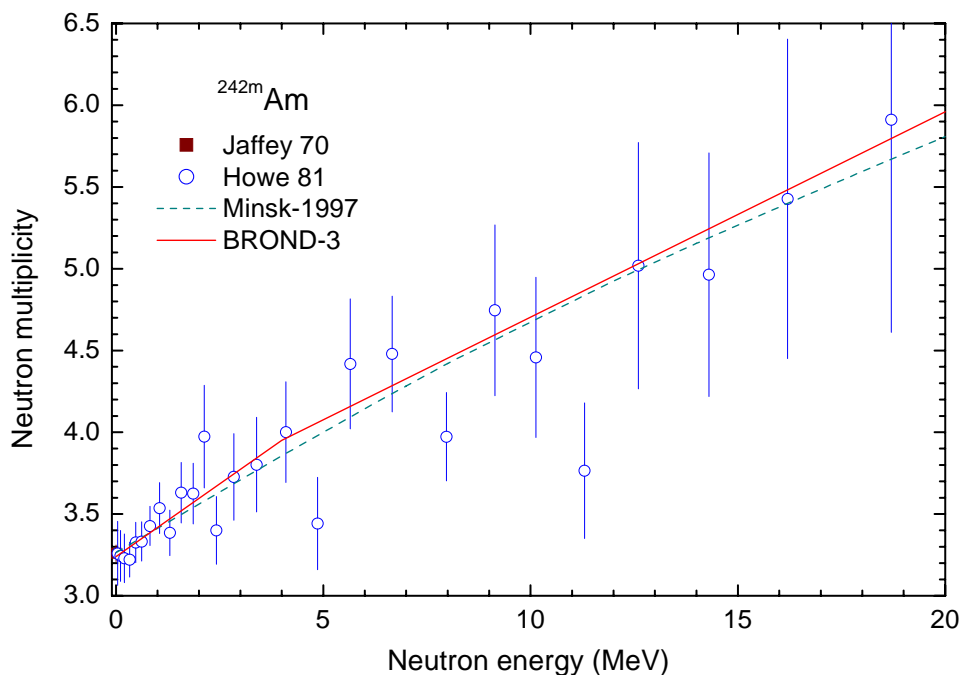


Рисунок 34. Оценки множественности нейтронов деления  $^{242m}\text{Am}$  в сравнении с экспериментальными данными

### 3.5. Неупругое рассеяние нейтронов

Все оценки сечений неупругого рассеяния нейтронов опираются на стандартные оптико-статистические расчеты и разногласия оценок обусловлено, главным образом, различиями параметров оптического потенциала, используемого в расчетах. В Минск-1997 рассматривался спектр 25 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в ENDF/B-VII – 33 уровней. Так как при увеличении числа уровней соответствующим образом изменяется порог статистического описания уровней, так называемый континуум уровней, то различия в числе рассматриваемых уровней не должно заметно отражаться на оценках полного (интегрального) сечения неупругого рассеяния.

Экспериментальных данных по неупругому рассеянию нейтронов для  $^{242m}\text{Am}$  нет. Сравнение оценок сечений неупругого рассеяния показано на рисунке 35. Отличие оценок ENDF/B-VII и Минск-1997 обусловлено различием использованных оптических потенциалов, но разногласия оценок не очень большие. Без дополнительной экспериментальной информации вряд ли можно обосновать предпочтение какой-либо из оценок. Как уже отмечалось выше в JENDL-3.3 и БРОНД-3 была принята оценка Минск-1997.

Для угловых распределений рассеянных нейтронов все оценки учитывают вклад прямых процессов для уровней ротационной полосы, который приводит к повышенному выходу нейтронов для передних углов, и асимметрия угловых распределений увеличивается с ростом энергии налетающих нейтронов. Для рассеяния на более высоких неколлективных уровнях учтена небольшая анизотропия угловых распределений нейтронов, обусловленная предравновесными процессами.

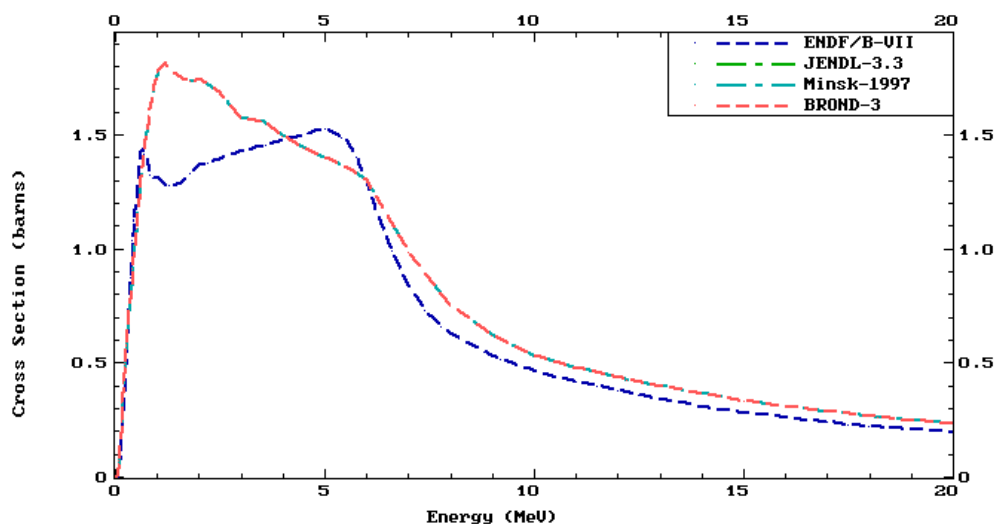


Рисунок 35. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов Am-242m.

### 3.6. Реакции (n,2n) и (n,3n) (MT=16 и MT= 17)

Имеющиеся оценки интегральных сечений реакции (n,2n) показаны на рисунке 36. Экспериментальных данных по реакции (n, 2n) на  $^{242m}\text{Am}$  нет. Различия оценок не очень значительны, но, тем не менее, оценка Минск-1997 кажется предпочтительной ввиду общего подобия энергетической зависимости сечения с аналогичными зависимостями для близлежащих делящихся ядер, имеющих соответствующие экспериментальные данные. Ход оценки ENDF/B-VII в окрестностях максимума кажется не естественным.

Экспериментальных данных о сечении реакций (n,3n) также нет. Сечение этой реакции существенно только выше 14 МэВ. При энергиях 18 - 20 МэВ сечение не превышает значений 50-70 мбарн.

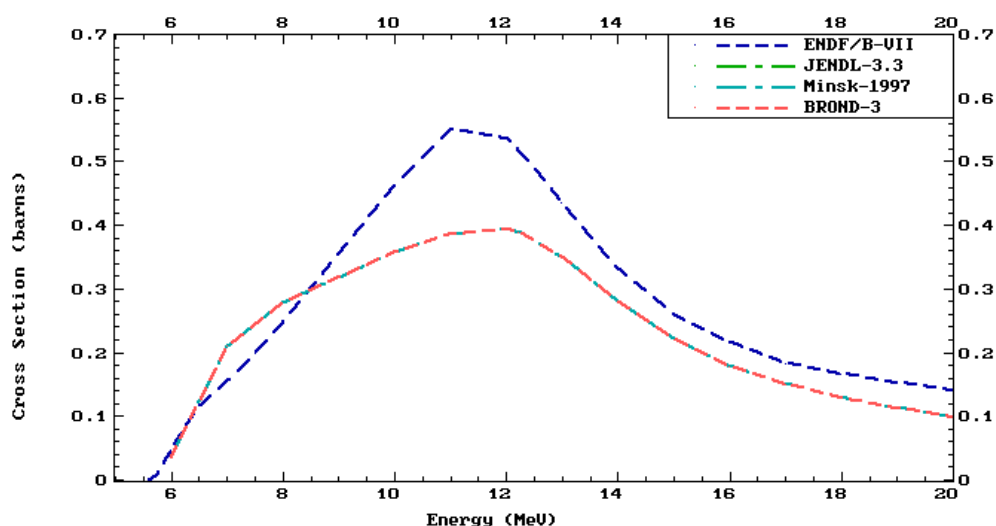


Рисунок 36. Оценки сечений реакций (n,2n) Am-242m.

#### **4. Сечения образования и спектры гамма-лучей (MF=12, 13, 14, 15)**

В файлах Минск-1997 и ENDF/B-VII нет оценок выходов гамма-лучей. Оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата, неупругого рассеяния нейтронов и деления  $^{242m}\text{Am}$  содержатся только в БРОНД-3. Они получены на основе оптико-статистических расчетов по программе GNASH с параметрами, тестированными на аналогичных расчетах для изотопов урана и плутония.

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными.

#### **Заключение**

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что оценка Минск-1997 обеспечивает оптимальное описание имеющейся совокупности экспериментальных данных для  $^{242m}\text{Am}$  в области разрешенных и неразрешенных резонансов, и эта оценка включена во все более поздние оценки: БРОНД-3, JENDL-3.3 (=JEFF-3.1) и ENDF/B-VII. Однако, описание сечений деления для быстрых нейтронов в оценке Минск-1997 нельзя признать удовлетворительным, и такое описание было уточнено в оценках БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII. Оценку БРОНД-3, опирающуюся на совокупность теоретических расчетов и статистических методов описание критически выбранных экспериментальных данных, по-видимому, можно признать оптимальной. БРОНД-3 является также единственной оценкой, включающей выходы гамма-лучей.

Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку БРОНД-3<sup>3</sup>. Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Ввести файл MF=10 с сечением перехода в основное состояние на основе EAF2003.

#### **Автор отбора данных**

Игнатюк А.В.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 70J A.H.Jaffey, J.L.Lerner, Nucl. Phys., **A145** (1970) 1;  
81H R.E.Howe et al., Nucl. Sci. Eng., **77** (1981) 454.  
84B J.C.Browne et al., Phys. Rev., **29** (1984) 2188.  
89B M.C.Brady, T.R.England, Nucl. Sci. Eng., **103** (1989) 129.  
97F B.I.Fursov et al., Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, 1997), Eds. G.Reffo, A.Ventura, C.Grandi, IPS, Bologna, 1997, v. 1, p. 488.  
00Z Yu.S.Zamyatnin, V.Yu.Konovalov, In: Low Energy Neutron Physics, Ed. H.Schopper, Landolt-Boernstein, Berlin, 2000, v. 16A, ch. 9.  
02И А.В.Игнатюк и др. Выработка и аттестация файлов ядерных данных для библиотеки БРОНД-3. Отчет ФЭИ-11197, 2002.

---

2. <sup>3</sup> Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Ввести файл MF=10 с сечением перехода в основное состояние на основе EAF2003. Включить файл MF=8 с сечениями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI. – М.Николаев.

## 95.5. Америций-243

Оценки сечений  $\text{Am-243}$  имеются в библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3, JEFF-3.1 и в библиотеке Маслова и др. (Минск).

В JEFF-3.1 приняты данные библиотеки JENDL-3.3.

Оценка БРОНД-3 выполнена в 1996 году, в 2001 выполнена ревизия файла, оценка минской группы выполнена в 1996 году.

Оценка ENDF/B-VII выпущена в 2006 году. По сравнению с версией файла ENDF/B-VI содержит существенное повышение сечения деления в области 150 эВ-1 МэВ, что привело к устранению расхождений данных файла ENDF/B-VI с данными JENDL-3.3 и БРОНД-3.

Оценка JENDL-3.3 выпущена в 2002 году, но ряд основных сечений в ней принят из БРОНД-3. Оценка Маслова и др. выполнена в 1996 году.

### 1. Общие характеристики

1.1.  $Z = 95$  -зарядовое число;

1.2.  $A = 243$  (атомный вес);

1.3.  $AW = 240.973$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);

1.4. Радиоактивен с периодом полураспада  $T_{1/2} = 7370$  лет, доминирует  $\alpha$ -распад с вкладом  $3.7\text{E-}9\%$  спонтанного деления;

1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог-}}, \text{ МэВ}$	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	n,n'	-.0422	.0424	Am-243
16	n,2n	-6.638	6.666	Am-242g Am-242m
17	n,3n	-12.567	12.619	Am-240
18	деление		0	продукты деления
102	n,g	5.363	0	Am-244g Am-244m

### 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

#### Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов во всех оценках ограничена энергией 250 эВ. На рисунках 37-39 представлены экспериментальные и оцененные данные в этой области энергий.

Значения сечений для тепловых нейтронов и резонансные интегралы в сравнении рекомендованными данными [1] приведены в таблице 5.

Таблица 5. Резонансные свойства Am-243, барн.

	JENDL-3.3	МИНСК	БРОНД-3	ENDF/B-VII	Мухабхаб, барн
$\sigma_{\text{tot}}$	84.25	84.23	84.23	83.69	$84.0 \pm 1.9$
$\sigma_f$	0.0813	0.064	0.064	0.074	$0.074 \pm 0.007$
$\sigma_\gamma$	76.71	76.71	76.70	75.08	$75.1 \pm 1.8$
$I_f$	7.54	7.44	7.53	8.64	$8.5 \pm 0.5$
$I_\gamma$	1790	1788.2	1783.9	1815.8	$1820 \pm 70$

По сечению деления во всех библиотеках наблюдается значительное расхождение с экспериментальными данными, однако по остальным сечениям и резонансным интегралам есть хорошее согласие.

95-Am-243(N,TOT),SIG

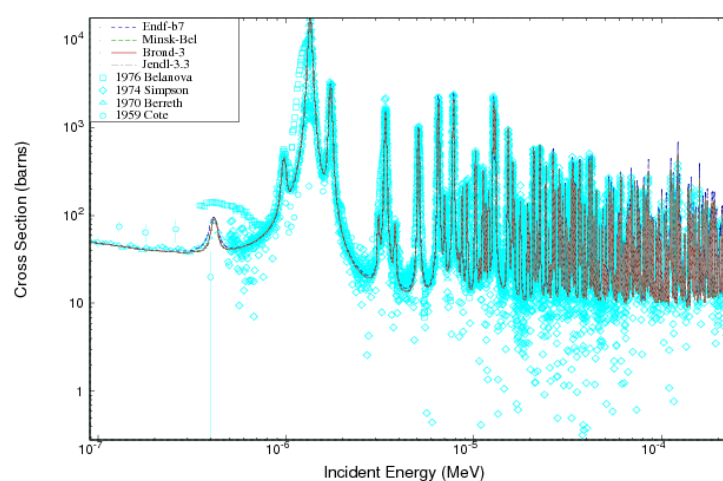


Рисунок 37. Полное сечение Am-243 в области энергий разрешенных резонансов.

95-Am-243(N,F),SIG

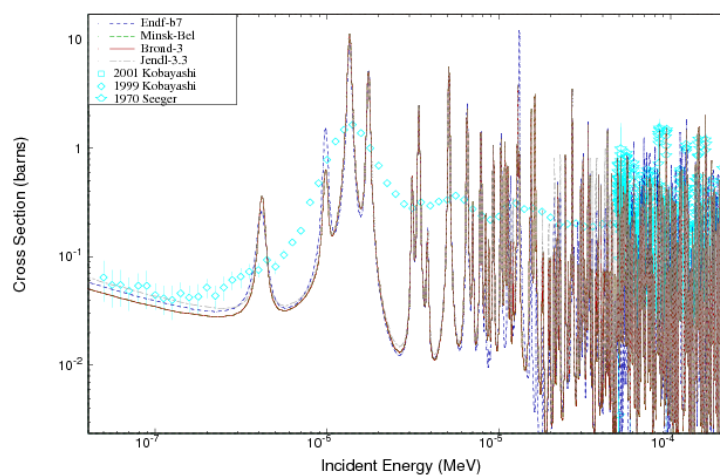


Рисунок 38. Сечение деления Am-243 в области энергий разрешенных резонансов.



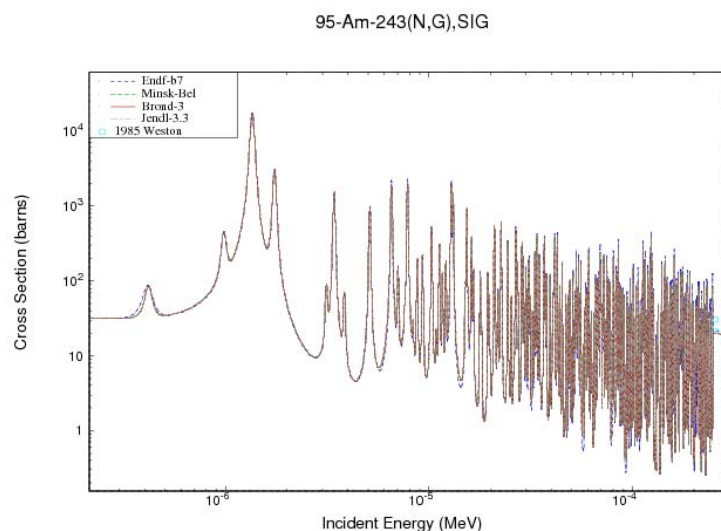


Рисунок 39. Сечение радиационного захвата в области энергий разрешенных резонансов.

### Область неразрешенных резонансов

Для области неразрешенных резонансов в представленных библиотеках приняты следующие границы:

БРОНД-3	250 эВ – 20 кэВ
ENDF/B-VII	250 эВ – 30 кэВ
JENDL-3.3	250 эВ – 40 кэВ
МИНСК	250 эВ – 40 кэВ

На рисунках 40-43 представлены экспериментальные и оцененные данные в области энергий неразрешенных резонансов. Все оценки описывают сравнительно хорошо имеющиеся данные в области энергий неразрешенных резонансов, и нет очевидных оснований отдать предпочтение какой-либо из них.

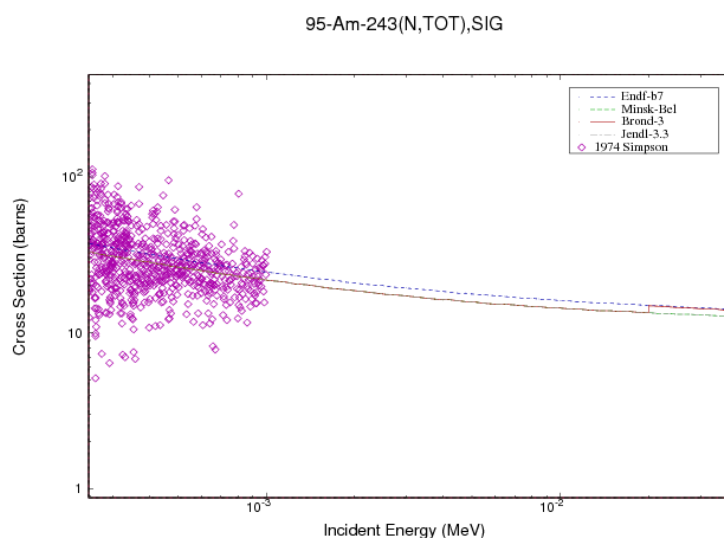


Рисунок 40. Полное сечение Am-243 в области энергий неразрешенных резонансов.

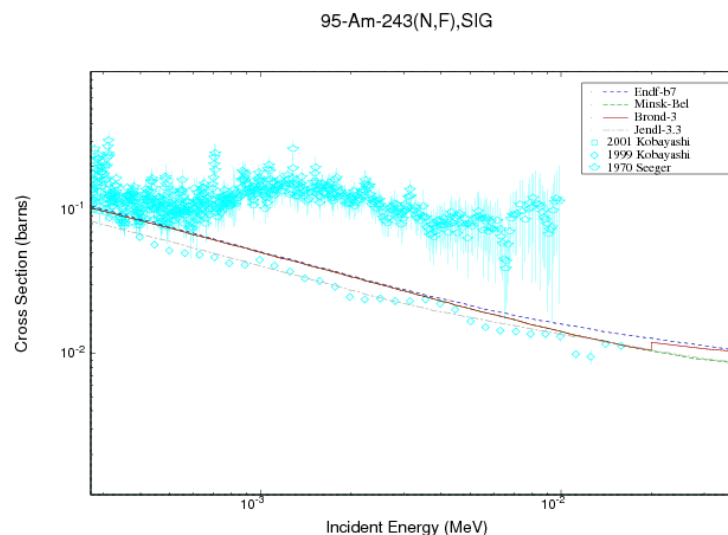


Рисунок 41. Сечение деления Am-243 в области энергий неразрешенных резонансов.

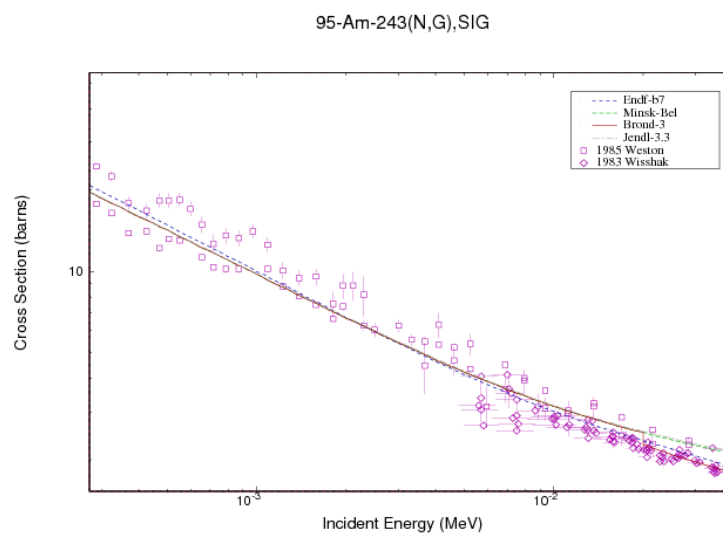


Рисунок 41. Сечение радиационного захвата Am-243 в области энергий неразрешенных резонансов.

### 3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

#### 3.1. Полное сечение (MT=1)

В области энергий нейтронов выше 1 кэВ экспериментальных данных по полному сечению нет. На рисунке 42 показаны оцененные данные по полному сечению библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и Маслова (Минск). Как видно из рисунка 42, данные ENDF/B-VII и БРОНД-3 совпадают, однако данные JENDL-3.3, основанные на оценке Маслова заметно отличаются, что связано с использованием других параметров модели. При отсутствии экспериментальных данных трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок.

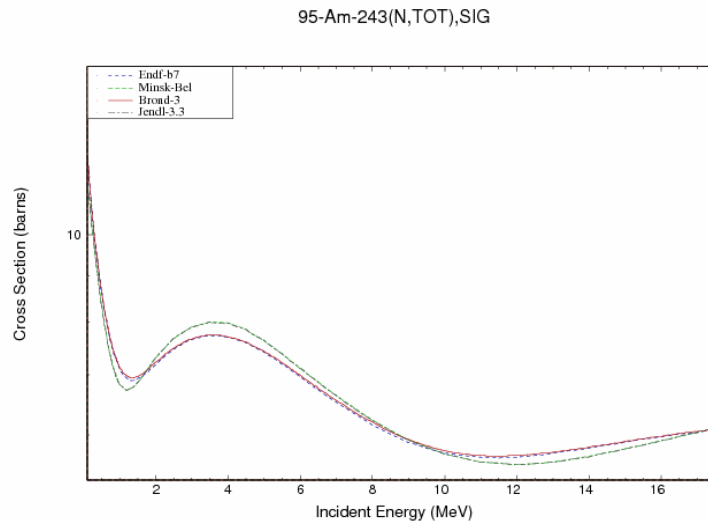


Рисунок 42. Полное сечение Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

### 3.2. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

На рисунке 43 представлены оценки упругого рассеяния библиотек ENDF/B-VII, JENDL-3.3, БРОНД-3 и Маслова (Минск). Оценки ENDF/B-VII и БРОНД-3 практически совпадают, тогда как кривая JENDL-3.3, основанная на оценке Маслова, в области 1-7 МэВ заметно отличается, что связано с аналогичным различием в полном сечении (рис. 7).

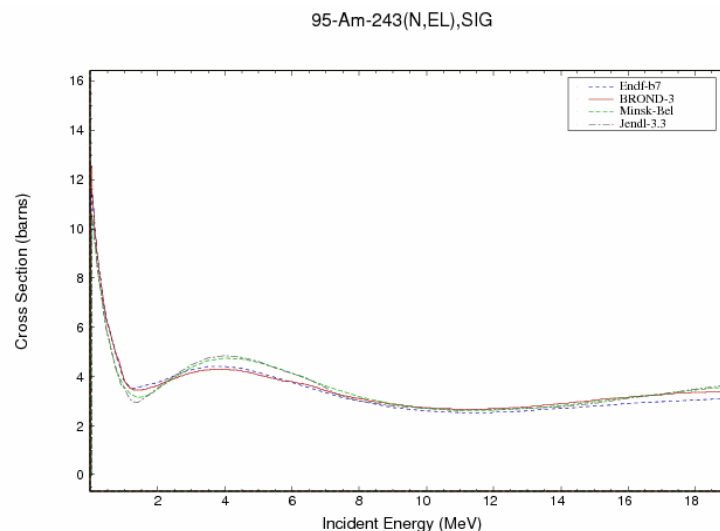


Рисунок 43. Сечение упругого рассеяния Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, обычно, опираются на расчеты по оптической модели, и разногласия в форме дифференциальных сечений рассеяния оказываются подобными расхождениям в полных нейтронных сечениях. Без соответствующих экспериментальных данных предпочтительными являются оценки, в которых достигнуто лучшее описание полных сечений.

### 3.3. Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

По сечениям неупругого рассеяния экспериментальных данных нет, кроме одной точки на первом уровне. На рисунках 44 и 45 показаны оцененные интегральные сечения неупругого рассеяния из всех указанных библиотек. В области энергий выше 6 МэВ оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII совпадают, однако при энергиях ниже имеются заметные различия энергетической зависимости сечений. Зависимость оценки JENDL-3.3, совпадающая с оценкой Маслова, не находит какого-либо физического объяснения. Оценкам БРОНД-3 и ENDF/B-VII следует отдать предпочтение.

95-Am-243(N,INL),SIG

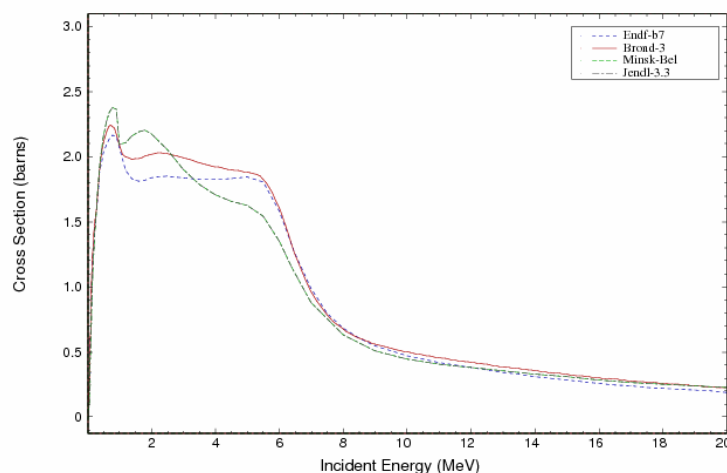


Рисунок 44. Интегральное сечение неупругого рассеяния Am-243.

95-Am-243(n,n'),SIG

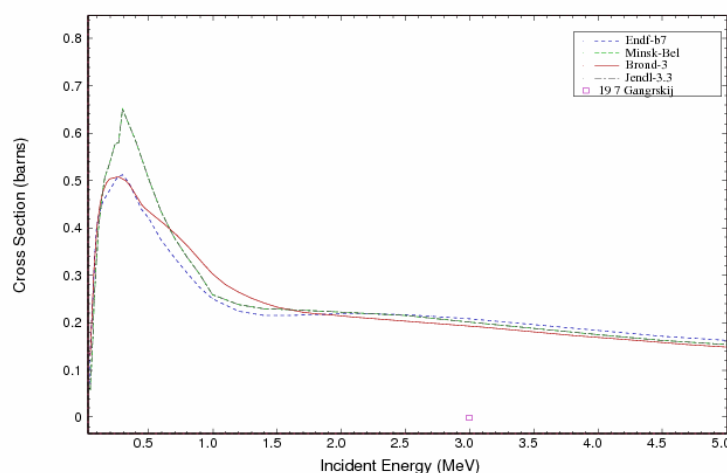


Рисунок 45. Сечение неупругого рассеяния на первом уровне (MT=51).

### 3.4. Сечение деления (MT=18)

На рисунке 46 показаны оценки сечений деления в сравнении с экспериментальными данными. Оценка Маслова в области энергий 7-10 МэВ неоправданно занижена и противоречит экспериментальным данным. В этой области оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII лучше соответствуют экспериментальным данным. При оценке сечений деления в БРОНД-3 был использован новый метод статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных (Паде-

аппроксимация) [5] и на его основе уточнены рекомендуемые погрешности оцененных данных и определены ковариационные матрицы погрешностей.

Экспериментальных данных при энергиях нейтронов больше 10.5 МэВ явно недостаточно для оценки функции возбуждения реакции  $\text{Am-243}(n,f)$ . Поэтому, в статистическую оценку сечений в качестве дополнительной информации в интервале энергий нейтронов выше 10 МэВ при оценке в библиотеку БРОНД-3 была использована энергетическая зависимость сечений деления, полученная из оптико-статистических расчетов. Имеющиеся различия в данных в области энергий выше 10 МэВ не дают серьезных оснований предпочесть какую-либо из оценок.

На рисунке 47 представлена энергетическая зависимость среднего числа мгновенных нейтронов на деление. В 2001 году Кузьминовым Б.Д. была проведена коррекция оценки на основе экспериментальных данных Хохлова /2/. Оценка среднего числа запаздывающих нейтронов во всех оценках основана на систематике работы /3/.

Энергетические спектры нейтронов деления были взяты без изменений из оценок ENDF/B-VI.

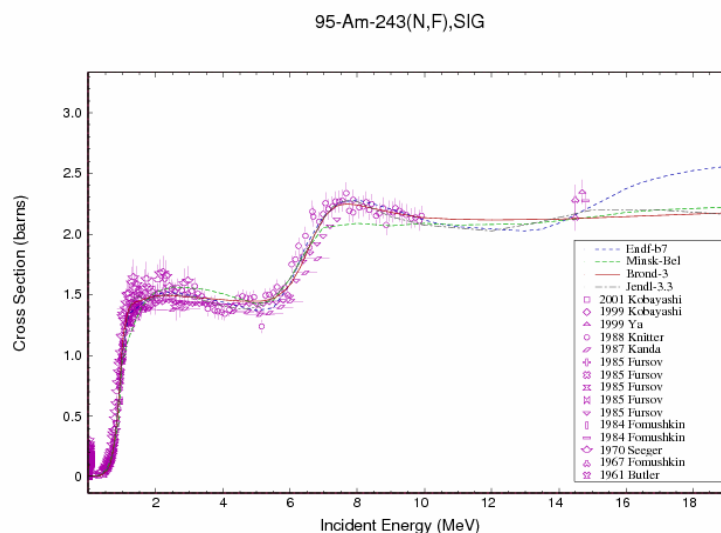


Рисунок 46. Сечение деления Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

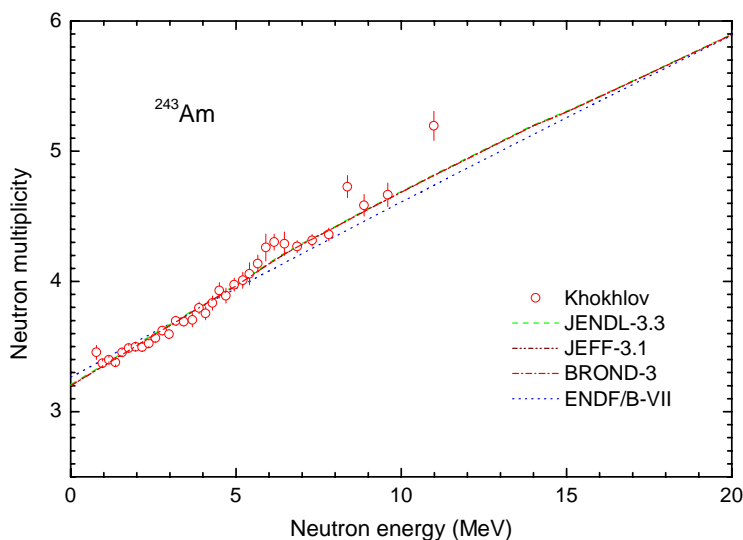


Рисунок 47. Энергетическая зависимость среднего числа нейтронов на деление.

### 3.5. Сечение радиационного захвата нейтронов (MT=102)

Экспериментальные данные по сечениям радиационного захвата нейтронов для Am-243 имеются лишь в диапазоне энергий до 250 эВ. При оценке в БРОНД-3 эти данные были перенормированы к принятым в настоящее время стандартам, были уточнены их систематические и статистические погрешности, а также оценены коэффициенты корреляции для каждого набора данных.

Для энергий нейтронов выше верхней границы экспериментальных точек в оценке использовалась энергетическая зависимость сечений захвата нейтронов, полученная из оптико-статистических расчетов, и эмпирической систематики сечений захвата для энергий нейтронов выше 14 МэВ [4].

Аппроксимирующая кривая для сечений захвата была получена тем же методом [5], что и для сечений деления. Оцененные таким способом сечения захвата нейтронов приведены на рисунке 48 в сравнении с рассмотренными экспериментальными данными и другими оценками. В области энергий до 250 МэВ данные всех оценок практически совпадают, различия в области энергий выше 700 кэВ связаны с различием теоретических подходов. Более плавные зависимости БРОНД-3 и ENDF/B-VII и выглядят предпочтительней.

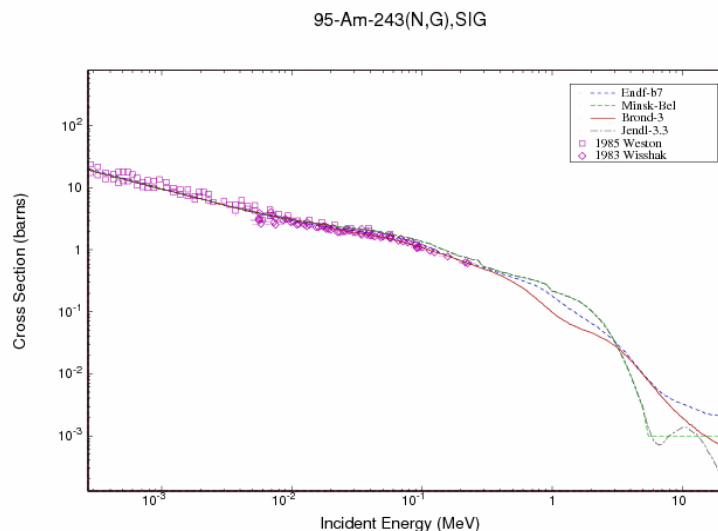


Рисунок 48. Сечение радиационного захвата Am-243 в области энергий быстрых нейтронов.

### 3.6. Сечения реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

На рисунке 49 представлены оцененные сечения реакции (n,2n) из разных библиотек. Следует отдать предпочтение оценке БРОНД-3, поскольку она лучше согласуется с систематикой сечений этой реакции [6].

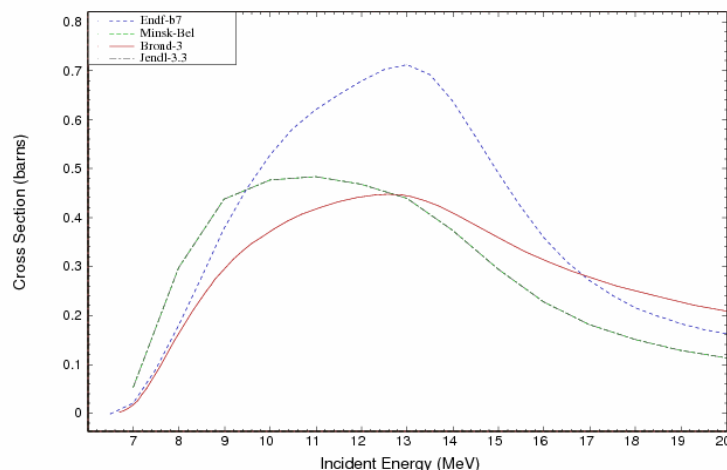


Рисунок 49. Сечение реакции (n,2n) для Am-243.

### Заключение.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в области разрешенных резонансов все оценки опираются на единый набор экспериментальных данных, и небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Оценки БРОНД-3, JENDL-3.3 и ENDF/B-VII для основных нейтронных реакций дают очень близкие значения сечений. Это свидетельствует об их достаточно высокой надежности и согласованности.

**Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку БРОНД-3<sup>4</sup>.**

В настоящее время нет каких-либо экспериментальных данных, указывающих на необходимость уточнения этой оценки.

### Автор отбора данных

Игнатюк А.В., Манохин В.Н.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances, Academic Press, NY, 2006 (5-th edition of BNL-325)  
Mughabghab S.F, Neutron Cross Sections. N.Y.-London, Academic Press, 1984, v.1, part B.
2. Khokhlov Yu.A. et al., Proc. Int. Conf. On Nuclear Data for Sci. and Techn., Gatlinburg, May 9-14, 1994, p.273.
3. Tuttle R.J., Nucl. Sci. Eng., 56(1975)37.
4. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Радиационный захват нейтронов. М. Энергоатомиздат, 1986.
5. Бадиков С.А. Препринт ФЭИ-1686, Обнинск, 1985.  
Badikov S.A., Zolotarev K.I. In: Proc. Spec. Meeting on Evaluation and Processing of Covariance Data (Oak Ridge, 1992). Paris, OECD, 1993, p. 105.
6. Manokhin, V.N. Report INDC(CCP)-397, Vienna, 1997.  
Manokhin, V.N., Blokhin, A.I. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, P.871(1997).

3. <sup>4</sup> Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. Включить файл MF=8 с секциями MT=454 и MT=459 из ENDF/B-VI.- М.Николаев.

## 95.6. Америций-244

В библиотеках ENDF/B-VII, JENDL-3.3 и JEFF-3.1 для Am-244 содержится одна и та же оценка нейтронных данных.

### 1. Общие характеристики

- 1.1.  $Z = 95$  -зарядовое число;
- 1.2.  $A = 244$  (атомный вес);
- 1.3.  $AWR = 241.968$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен ( $T_{1/2} = 10.1$  часов), испытывает  $\beta_-$ -распад в Cm-244;
- 1.5. Перечень нейтронных реакций, имеющих пороги до 20 МэВ:

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$ , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	n,n'	-.0422	.0424	Am-244
16	n,2n	-6.638	6.666	Am-243
17	n,3n	-12.567	12.619	Am-242, Am-242m
18	деление		0	продукты деления
102	n,g	5.363	0	Am-245

### 2. Нейтронные данные в резонансной области (MF=2)

#### Область разрешенных резонансов

Область резонансных параметров отсутствует. Приводится только радиус потенциального рассеяния  $R=7.98866$  ферми.

Значения сечений в тепловой точке и резонансные интегралы приводятся в таблице 6.

Таблица 6. Резонансные свойства Am-244.

Оценка	$\sigma_{\text{tot}}$	$\sigma_f$	$\sigma_\gamma$	$I_f$	$I_\gamma$
JENDL-3.3	2 911.6	2 300.	600.	1 258.	315.6

### 3. Нейтронные данные вне резонансной области (MF=3)

#### 3.1. Полное сечение (MT=1)

На рисунке 50 показано полное сечение взаимодействия Am-244. Экспериментальные данные отсутствуют.

#### 3.2. Сечение деления (MT=18)

На рисунке 50 показано оцененное сечение деления Am-244 в области энергий до 10 МэВ. Экспериментальные данные отсутствуют.

#### 3.3 Сечение деления (MT=102)

На рисунке 50 показано оцененное сечение радиационного захвата Am-244 в области энергий до 10 МэВ. Экспериментальные данные отсутствуют.



Отметим, что в области быстрых нейтронов в поведении сечения захвата наблюдается “горб”, наличие которого не подтверждается систематикой сечения радиационного захвата на четных изотопах америция (см. рис.51).

#### 3.4. Сечение неупругого рассеяния (MT=4).

На рисунке 52 показано сечение неупругого рассеяния нейтронов Am-244. Экспериментальные данные отсутствуют.

#### 3.5. Сечения реакций (n,2n), (n,3n) (MT=16,17)

На рисунке 52 показано сечение неупругого рассеяния нейтронов Am-244. Экспериментальные данные отсутствуют.

Поведение сечения (n,3n) вызывает большое сомнение. Скорее всего, оно ошибочно увеличено на порядок.

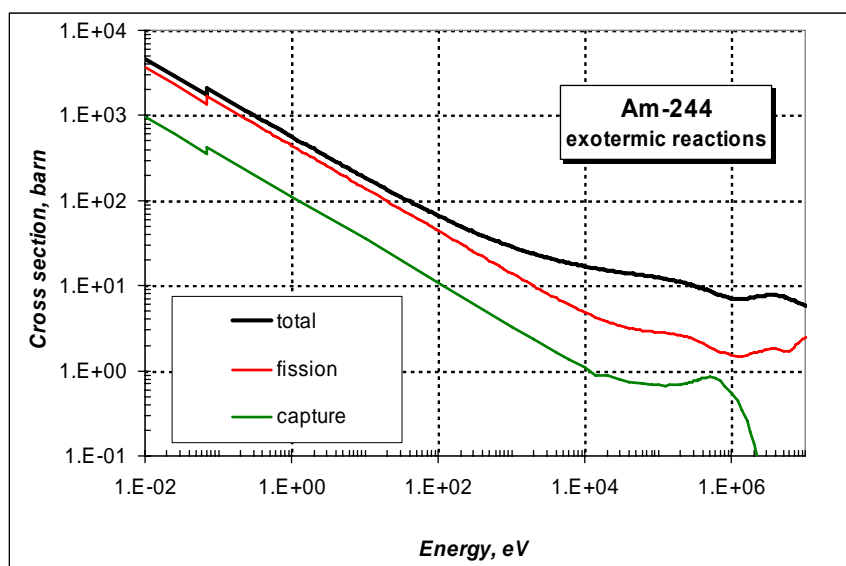


Рисунок 50. Сечения экзотермических реакций на Am-244.

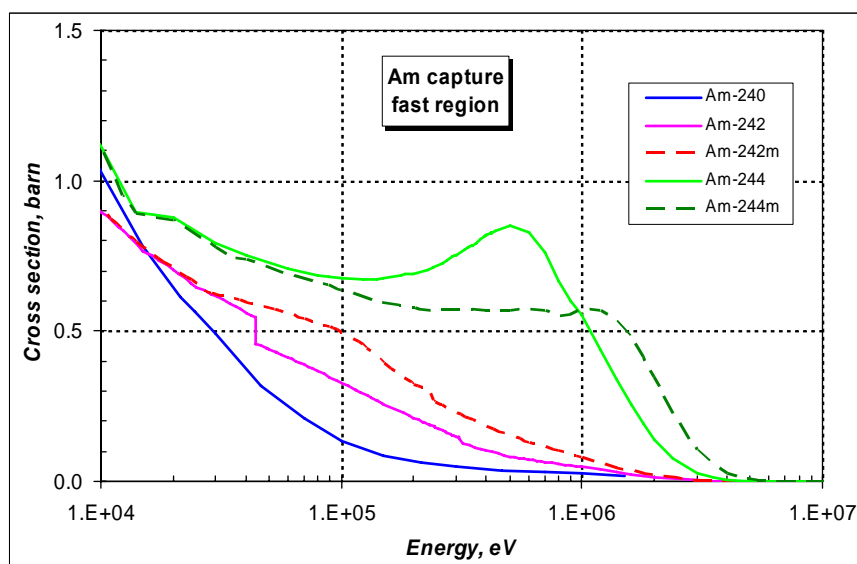


Рисунок 51. Систематика сечения радиационного захвата на четных изотопах америция.

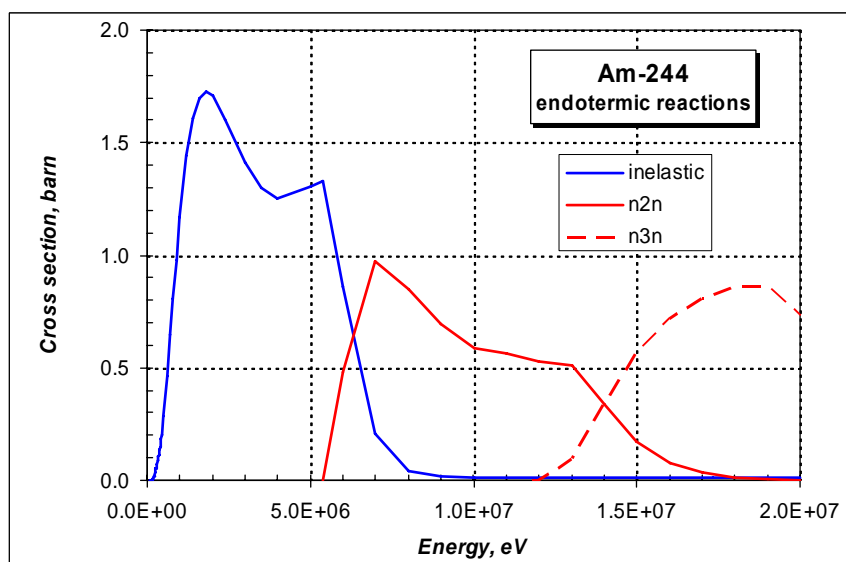


Рисунок 52. Сечения пороговых реакций на Am-244.

### Заключение.

Для библиотеки РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3<sup>5</sup>.

Рекомендуется в дальнейшем уточнить сечение радиационного захвата в области быстрых нейтронов (выше 100 кэВ) и сечение реакции (n,3n).

**Автор отбора данных**  
Кощеев В.Н.

<sup>5</sup> Данные о запаздывающих нейтронах принять в соответствии с оценкой JEFF-3.1 (8 групп), а их спектры принять такими же, как для урана-235. -М.Николаев.