

## 90. ТОРИЙ

В библиотеке РОСФОНД представлены данные для природного тория и для 6 его долгоживущих изотопов.

### 90.1. Торий-227

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=18.72$  д). Испытывает альфа-распад в радий-223 и далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-207.

В современных библиотеках оцененных данных содержится одна полная оценка нейтронных данных для тория-227 N.Takagi, 1988: в JENDL-3.3, в JEFF-3.1, ENDF/B-VIIb2 и оценка R.A.Forrest, J. Kopecky для некоторых нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 1 показано сравнение сечения деления Th-227, принятого в библиотеках JENDL и EAF.

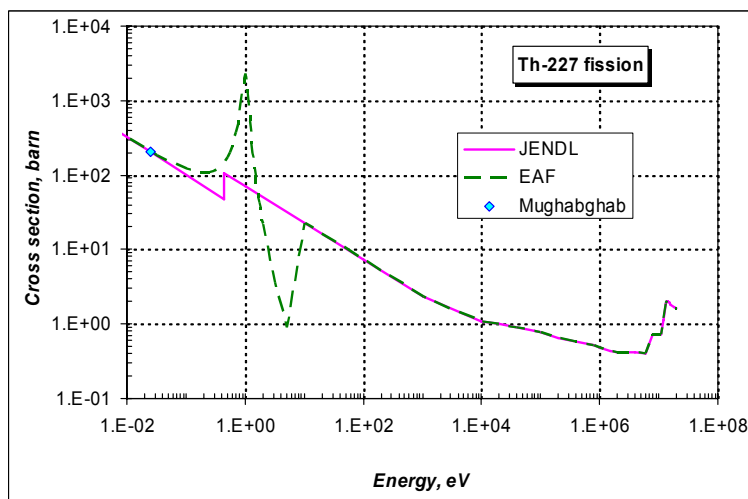


Рисунок 1 – Сравнение оцененных сечений деления Th-227.

На рисунке 2 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов для Th-227.

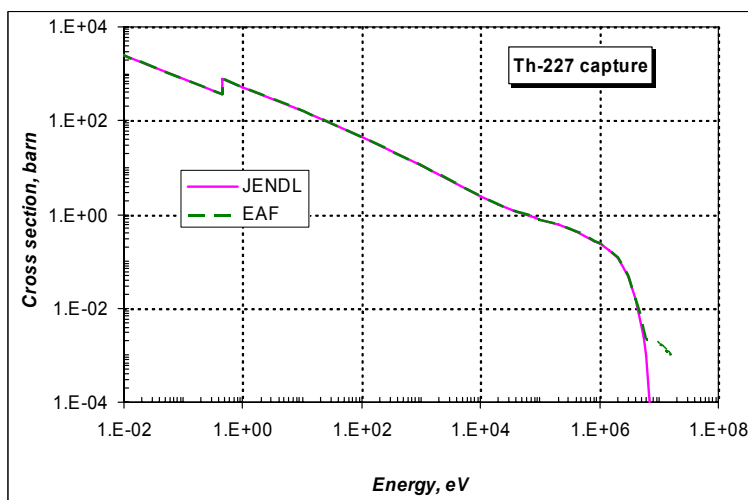


Рисунок 2 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-227.

Из приведенного на рисунке 1 сравнения видно, что в оценке Forrestb и Koresky (EAF) имеется фиктивный резонанс, в то время, как в оценке Takagi сечение деления представляет собой гладкую функцию. Правомерность резонанса - сомнительна, особенно его “интерференционный минимум”, однако оценка Корецку выполнялась в более позднее время вкупе со всеми младшими актинидами и на основе единой систематики сечений. Именно поэтому замена сечения деления в JENDL оценкой Forrestb и Koresky, видимо, была бы целесообразной. Имеются всего две экспериментальные работы, в которых приводятся результаты измерения сечения деления в тепловой точке и на основе которых Мухабхаб в своей компиляции BNL-325 (1981 г.) приводит рекомендации для теплового сечения. Видно, что обе оценки согласуются в тепловой точке со значением Мухабхаба.

Согласно рисунку 2 сечения радиационного захвата Th-227 в обеих оценках практически совпадают, за исключением практически маловажной области энергий выше  $\sim 10$  МэВ, где оценка Forrestb и Koresky представляется более закономерной. В оценке EAF-2003 приводятся также данные о сечениях реакций (n,p) и (n,alfa), отсутствующие в других оценках.

### Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3. Сечения деления и захвата откорректировать согласно оценке EAF-2003, включить данные о сечениях реакций с вылетом заряженных частиц и пересчитать полное сечение. Включить данные о выходах продуктов деления (оценка Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI). Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

#### Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

## 90.2. Торий-228

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=1.9131$  г). Испытывает альфа-распад в радий-224 и далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-208. Одним из промежуточных продуктов является таллий-208, испускающий при бета-распаде жесткое гамма-излучение.

В современных библиотеках оцененных данных содержится полная оценка N.Takagi (1988 г.) нейтронных данных в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1. В оценке ENDF/B данные N.Takagi модифицированы R.Wright'ом в резонансной области энергий для версии VIIb2. Имеется еще и оценка R.A.Forrest, J. Koresky для некоторых нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 3 показано сравнение сечения деления Th-228, принятого в библиотеках ENDF/B-VIIb2 и EAF.

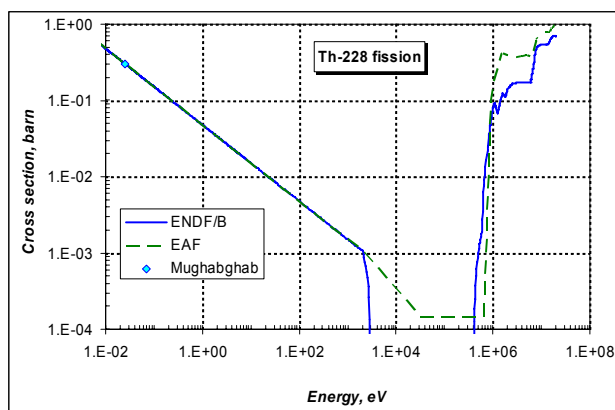


Рисунок 3 – Сравнение оцененных сечений деления Th-228.

Из приведенного на рисунке 3 сравнения видно, что сечение деления носит пороговый характер, и что оценка Forrestb и Корецку (EAF) отличается от оценки Takagi (JENDL) в области энергий выше 500 кэВ. Более подробно сравнение этих оценок представлено на рисунке 4.

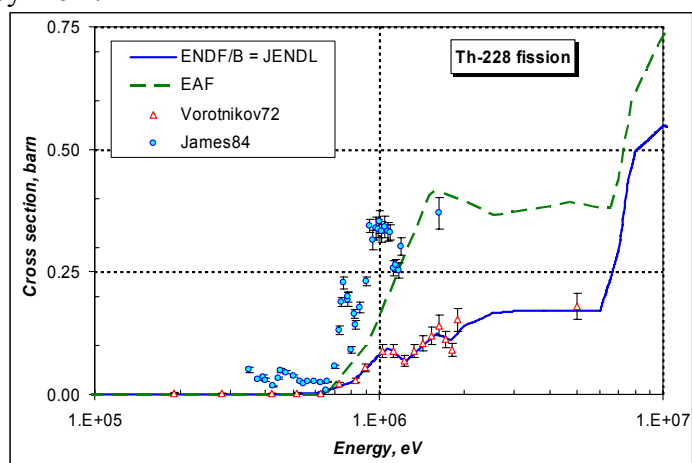


Рисунок 4 – Сравнение оцененных сечений деления Th-228 выше 100 кэВ.

В библиотеке EXFOR имеются две экспериментальные работы, в которых приводятся результаты измерения сечения деления в области энергий выше 500 кэВ. Это результаты группы Воротникова (1972 г.), и группы Джеймса (1984г.). Различия в сечениях вызваны тем обстоятельством, что Такаги проводит оценку сечения деления на основе данных группы Воротникова, а Forrestb и Корецку (EAF) за основу своей оценки взяли результаты измерений группы Джеймса. Исходя из соображений, что с все четно-четные изотопы тория имеют схожий характер сечения деления, а с ростом атомного номера величина первого “плато” понижается, можно предположить, что оценка Forrestb и Корецку (EAF) является более правдоподобной.

На рисунке 5 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов для Th-228.

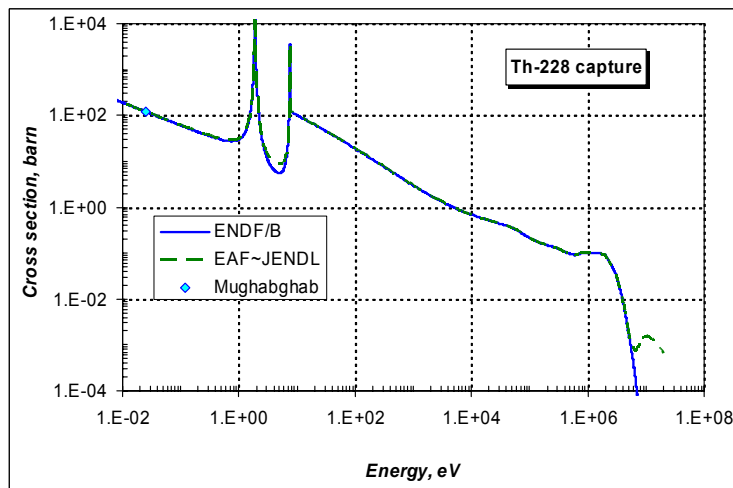


Рисунок 5 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-228.

Согласно рисунку 5 сечения радиационного захвата Th-228 в обеих оценках практически совпадают, за исключением двух областей энергий, а именно: в области резонансных энергий и в области энергий выше ~ 6 МэВ. Никаких экспериментальных данных по измерению сечения радиационного захвата для Th-228 нет. Имеются только рекомендации Мухабхаба (BNL-325, 1981 г.). Поведение сечений в резонансной области энергий показано на рисунке 6.

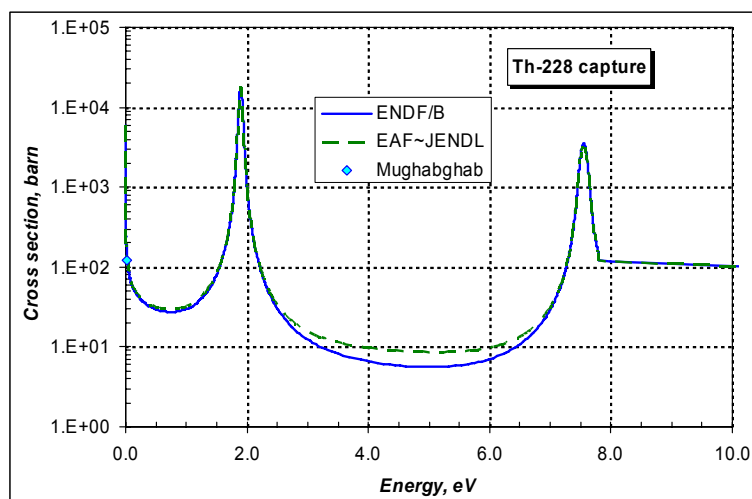


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата Th-228 в области энергий ниже 10 эВ.

Из рисунка 6 видно, что отличия в оценке определяются в межрезонансном диапазоне. Это различие вызвано тем обстоятельством, что для версии VIIb2 Райтом были добавлены 2 резонанса с энергией 9.363 эВ и 14.5 эВ, за границей области разрешенных резонансов, а для уравнивания вклада от этих резонансов в тепловое сечение им добавлен еще один резонанс с отрицательной энергией -10 эВ.

### Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из ENDF/B-VIIb2. Сечения деления и захвата откорректировать согласно оценке EAF-2003 и пересчитать полное сечение. Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

#### Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

## 90.3. Торий-229

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=7880$  лет). Испытывает альфа-распад в радий-225, который, в свою очередь, путем бета-распада превращается в актиний-225 и далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в висмут-208.

В современных библиотеках оцененных данных содержится полная оценка нейтронных данных N.Takagi (1988 г.) - в JENDL-3.3 и в JEFF-3.1. В оценке ENDF/B данные N.Takagi модифицированы R.Wright'ом в резонансной области энергий для версии VIIb2. Имеется еще и оценка R.A.Forrest, J. Kopecky для некоторых нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003.

На рисунке 7 показано сравнение сечения деления Th-229, принятого в библиотеках ENDF/B-VIIb2 и EAF.

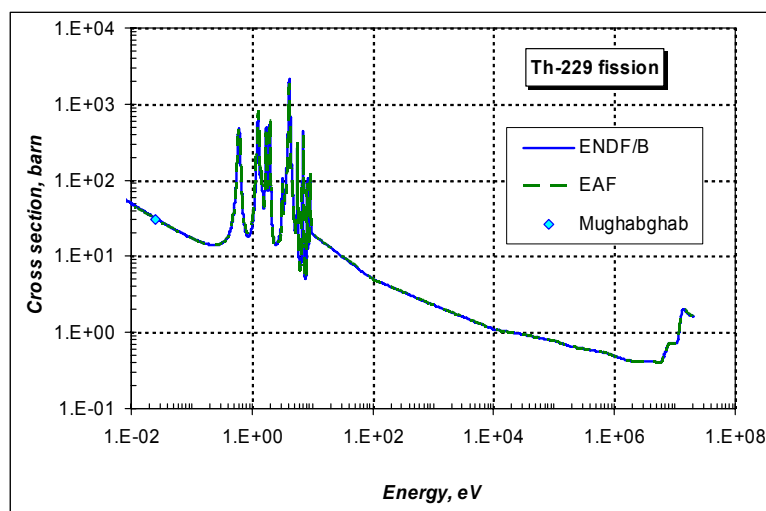


Рисунок 7 – Сравнение оцененных сечений деления Th-229.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что сечения практически совпадают. Резонансная область энергий простирается до 10 эВ. Далее – область гладких сечений.

Имеется несколько наборов экспериментальных данных по измерению сечения деления Th-229. На рисунке 8 показано сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными в области энергий до 1 кэВ, а на рисунке 9 – аналогичное сравнение в области энергий выше 1 кэВ.

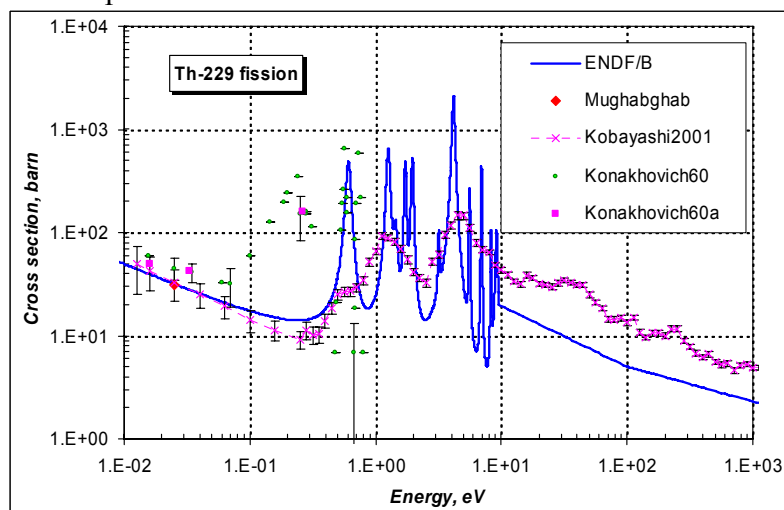


Рисунок 8 – Сравнение оцененных сечений деления Th-229 с экспериментальными данными в области энергий до 1 кэВ.

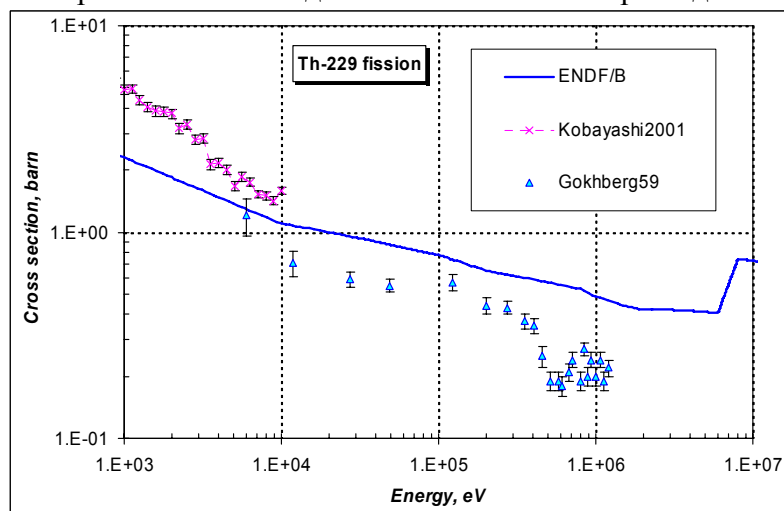


Рисунок 9 – Сравнение оцененных сечений деления Th-229 с экспериментальными данными в области энергий выше 1 кэВ.

Из приведенного на рисунке сравнения видно, что оцененное сечение не описывает экспериментальные данные в области энергий выше 10 эВ, т.е. в области гладких сечений.

О соответствии сечений и экспериментальных данных в области резонансных энергий из рисунка 8 и 9 сказать трудно. Здесь следует сравнивать интегральные характеристики, в частности, резонансный интеграл деления. В таблице 1 приводится сравнение резонансных характеристик с рекомендациями Мухабхаба.

Таблица 1 – Тепловые сечения и резонансные интегралы Th-229 (барн).

Нуклид	Оценка	Тепловое сечение ( $E=0.0253$ эВ)			Резонансный интеграл	
		Полное	Деление	Захват	Деление	Захват
Th-229	ENDF/B	105.1	31.6	63.4	443	1236
	BNL-325		$30.8 \pm 1.5$	$61 \pm 6$	$466 \pm 75$	$1000 \pm 175$

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что оцененное сечение деления хорошо согласуется с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной погрешности. Что касается сечения захвата, то оцененный резонансный интеграл захвата отклоняется от рекомендуемого Мухабхабом не намного более заявленной погрешности. Это является вполне приемлемым, поскольку никаких измерений сечения радиационного захвата на Th-229 нет.

В заключение, на рисунке 10 приведем сравнение оцененного сечения полного взаимодействия с единственным экспериментом Котэ, выполненным в 1961 году. Результаты эксперимента были использованы для определения резонансных параметров. Кроме эксперимента Котэ, для определения резонансных параметров были использованы результаты измерений групп Хохловича (1960 г.), Боллинджера (1963 г.) и Фелвинчи (1970 г.).

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что оцененное сечение из оценки ENDF/B хорошо согласуется и имеющимися экспериментальными данными.

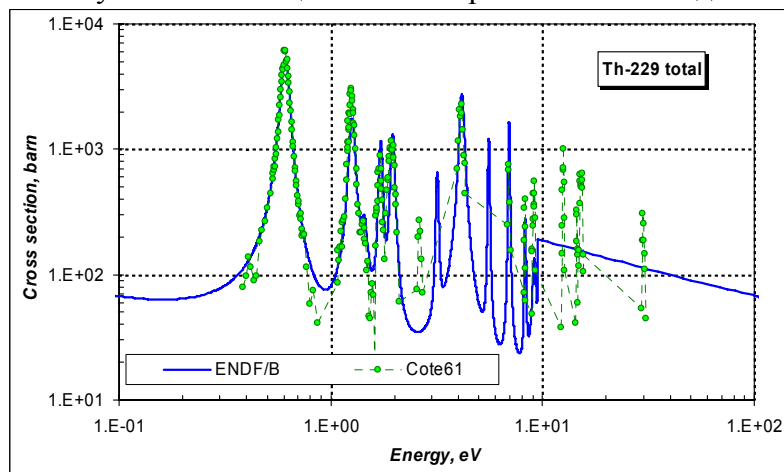


Рисунок 10 – Сравнение полного сечения Th-229 с экспериментальными данными.

### Заключение

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из ENDF/B-VIIb2, в котором сечение захвата выше 6 МэВ принято в соответствии с EAF-2003, где использовалась более совершенная модель расчета сечения, сечение деления выше 10 эВ откорректировано согласно экспериментальным данным Кобаяши. Полное

сечение получено как сумма парциальных. Включить данные о выходах продуктов деления (оценка Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI). Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

#### Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

## 90.4. Торий-230

### 90.4.1. Общие замечания

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=7.54 \cdot 10^4$  лет). Испытывает альфа-распад в радий-226, который далее в результате цепочки альфа-распадов, а в конце и бета-распадов, превращается в свинец-206.

В современных библиотеках оцененных данных, по существу, содержатся две полные оценки нейтронных данных для тория-230:

в JENDL-3.3 – оценка Ошава (T.Ohsawa), 1987,

в ENDF/B-VII – оценка Манна, 1977.

в JEFF-3.1 - оценка группы авторов (1982 г.) в основе, которой лежит оценка Манна (1977 г.).

Есть также оценка нейтронных сечений в EAF-2003, которая совпадает или близка к оценке Манна (1977 г.).

### 90.4.2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность  $J^\pi = 0^+$ .

2.2. Радиус рассеяния:

$R=8.3225$ (ENDF/B7);  $R=10.925$  ферми(JENDL3.3)

2.3. Резонансные параметры

В ENDF/B – область разрешенных резонансов от  $1.E-5$  эВ – 251 эВ; в JENDL – область разрешенных резонансов от  $1.E-5$  эВ – 564 эВ. На рисунке 11 приводится сравнение суммы резонансов в зависимости от энергии.

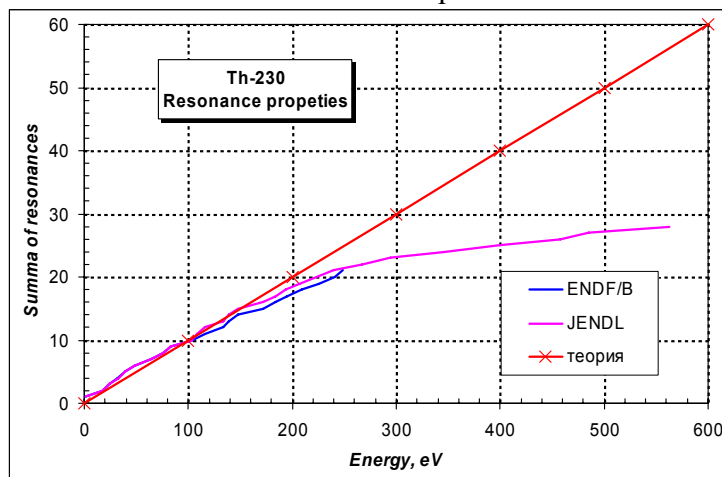


Рисунок 11 – Сравнение нарастающих сумм резонансов для Th-230.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что до энергии 200 эВ в обеих оценках находится число резонансов близкое к теоретическому предсказанию. Далее начинается пропуск слабых резонансов, который увеличивается с ростом энергии. Так, в оценке JENDL в области энергий 500 эВ пропущено порядка двадцати резонансов. Их вклад в сечение радиационного захвата учитывается подложкой в файле гладких сечений, который составляет порядка нескольких десятков миллибарн.

В таблице 2 приводятся характеристики взаимодействия в тепловой и в резонансной областях энергии.

Таблица 2 – Тепловое сечение и резонансный интеграл для Th-230 (барн).

Оценка	Взаимодействие	Тепловое сечение	Резонансный интеграл
ENDF/B-VII	полное	29.0	1224.
	деление	0.0	4.8 мбарн
	захват	23.1	851.
JENDL-3.3	полное	32.3	1369
	деление	0.0	0.0
	захват	22.6	1039.
Мухабхаб	деление	<1.2 мбарн	-
	захват	23.0±0.3	1007±35

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что в тепловой области оценки ENDF/B-VII и JENDL-3.3 согласуются друг с другом и с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной точности. В области резонансных энергий между оценками наблюдается расхождение в резонансном интеграле ~ 20%. С рекомендацией Мухабхаба согласуется оценка JENDL и расходится оценка ENDF/B.

#### 2.4. Область неразрешенных резонансов отсутствует

##### **Выводы:**

Оценка резонансных параметров из JENDL является предпочтительнее, поскольку на ее наборе резонансных параметров восстановленные сечения лучше согласуются с рекомендациями Мухабхаба, чем сечения, полученные на основе оценки ENDF/B. В будущем целесообразно пополнить область разрешенных резонансов случайно расположенными фиктивными резонансами для учета пропущенных уровней.

#### **90.4.3. Область гладких сечений: (MF=3)**

В этой области энергий сечение деления носит пороговый характер. Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными приводится на рисунке 12.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что среди экспериментальных наборов данных имеются две совокупности, различающиеся между собой по величине сечения в области пика первого резонанса (~ 720 кэВ), и по величине сечения первого плато сечения в области энергий выше 1.0 МэВ. В комментариях для наиболее детальных экспериментальных данных Блонса (1980 г.) указывается, что измерение сечения проведено, главным образом, для определения формы кривой. В исследуемом образце содержание тория-230 было мало по сравнению с содержанием тория-232. Данные Muir'a



и Vesser'a (1973 г.) отличают то, что помимо измерения сечения деления в эксперименте измерялись и угловые распределения. В 1983 году группой Медоуза в EXFOR'e опубликованы результаты измерения сечения деления тория-230 относительно сечения деления урана-235, методика которых к тому времени считалась наиболее надежной. Учитывая эти факты, можно предположить, что оценка JENDL наиболее оптимально согласуется с экспериментальными данными в области энергий до 2 МэВ, а далее ее следовало бы поднять на уровень оценки ENDF/B. В этом случае улучшилось бы ее согласие с экспериментальными данными Медоуза.

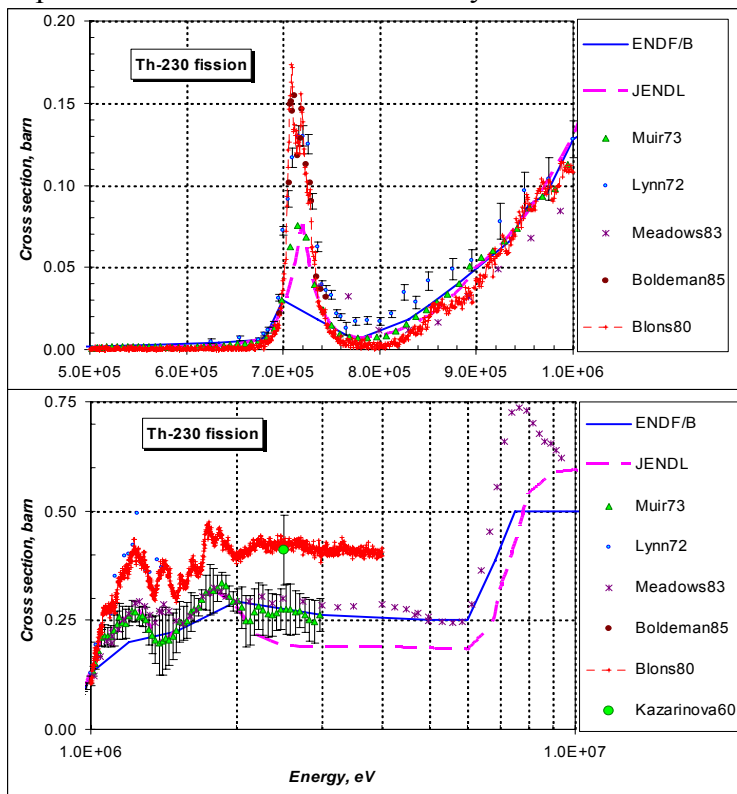


Рисунок 12 – Сравнение оцененных сечений деления Th-230 с экспериментальными данными в области энергий до 10 МэВ.

На рисунке 13 показано сравнение оцененных значений числа вторичных нейтронов на одно деление ядра тория-230. В обеих оценках за основу бралась систематика Хавертсона.

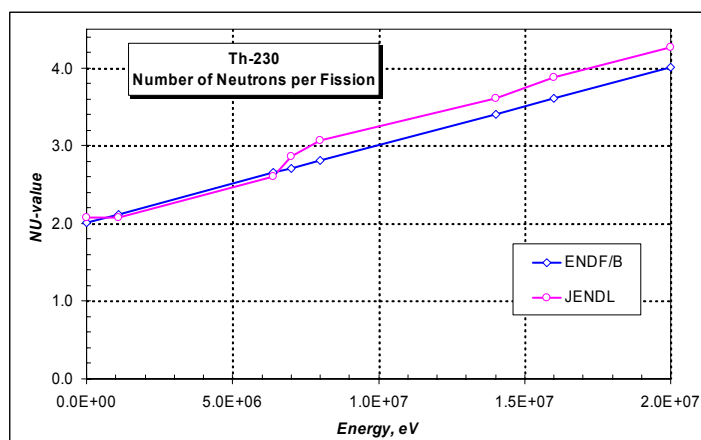


Рисунок 13 – Сравнение числа вторичных нейтронов деления для Th-230.

Отметим, что в оценке ENDF/B систематика Хавертон использовалась для оценки полного числа вторичных нейтронов деления, а в оценке JENDL – для оценки мгновенных нейтронов деления.

Сечение захвата для тория-230 известно намного хуже, чем сечение деления. На рисунке 14 показано сравнение между собой оцененных сечений радиационного захвата.

Экспериментальных измерений сечения радиационного захвата тория-230 в рассматриваемой области энергий нет. Поэтому, оценить степень надежности сечения, полученного в результате расчета по разным теоретическим моделям, представляется затруднительным. Отметим только, что в оценке ENDF/B расчет сечения радиационного захвата проводится Шентером и Манном по статистической модели, а в оценке JENDL наряду со статистической моделью привлекалась и оптическая модель, параметры для которой брались такими же, как и для тория-232. Как уже было видно и для других изотопов тория, в области энергий выше 6 МэВ оценка JENDL неоправданно занижает и без того низкое сечение радиационного захвата.

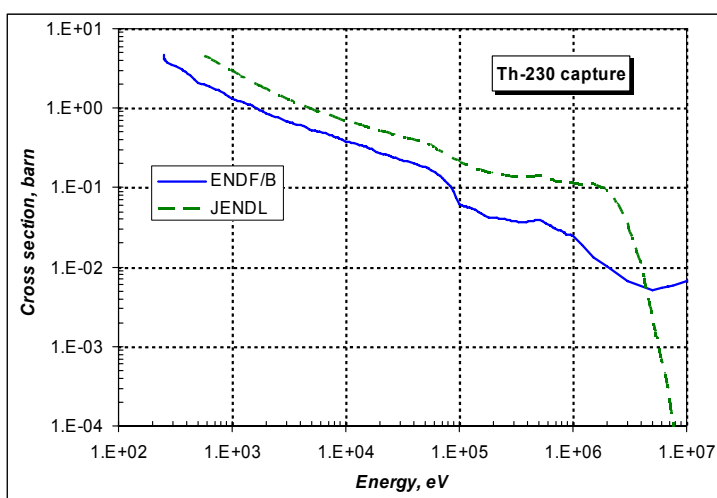


Рисунок 14 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-230.

В конце, на рисунке 15 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов. Для этого процесса взаимодействия, так же, отсутствуют какие либо экспериментальные данные.

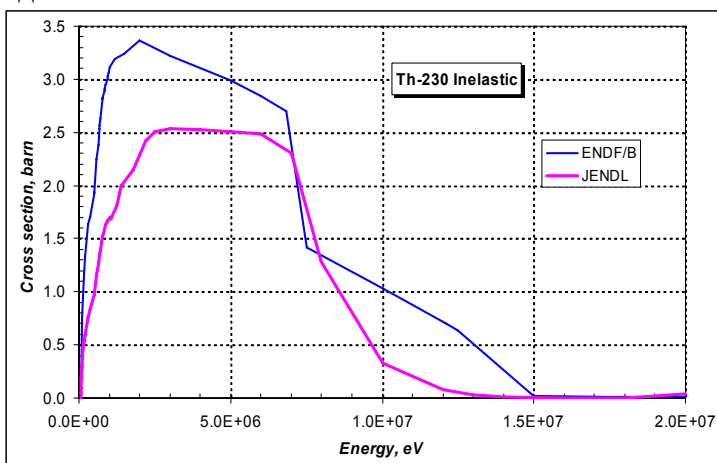


Рисунок 15 – Сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния на Th-230.

Для оценки процесса неупругого рассеяния в ENDF/B использовалась статистическая модель, в то время как в JENDL наряду со статистикой применялась и оптическая модель (как и в случае с радиационным захватом нейтронов).

**Выводы:**

На основе проведенного рассмотрения различных оценок нейтронных сечений и согласованности их с имеющимися экспериментальными данными следует, что для РОСФОНДА предпочтительнее использовать оценку JENDL.

**Заключение**

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3. Сечение деления в области энергий выше 2 МэВ откорректировать согласно экспериментальным данным Медоуса и пересчитать полное сечение. Включить данные о выходах продуктов деления (В связи с отсутствием оцененных выходов продуктов деления для Th-230 принять оценку Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI для Th-232). Включить данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235.

**Автор отбора данных**

Кощеев В.Н.

**90.5. Торий-231**

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=25.5$  ч). Испытывает бета-распад в протактиний-231. Является продуктом альфа-распада урана-235. Источником может служить и реакция  $^{232}\text{Th}(n,2n)$ .

Полных наборов нейтронных данных не имеется. Последняя оценка нейтронных сечений содержится в EAF-2003. Из нее следует:

$\sigma_c(0.0253 \text{ эВ})=10.8$  барн;  $RI_c=16.1$  барн

$\sigma_f(0.0253 \text{ эВ})=100$  барн;  $RI_f=449$  барн

Экспериментальных результатов для проверки оцененных данных не имеется.

**Заключение**

Принять в РОСФОНД оценку EAF-2003. Файл MF=8 удалить.

**Автор рекомендации**

Николаев М.Н.

**90.6. Торий-232**

Содержание в естественной смеси 100%

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных содержатся следующие оцененные данные для тория-232:

JEFF-3.1 – оценка 2005 г., являющаяся компиляцией оценки минской группы и ENDF/B-VI.8 ;

JENDL-3.3 – оценка Ошава (T.Ohsawa) и др., 1987, с существенными модификациями в 1988, 1989, 1993 и 2001 гг.;

Минск 2001 – оценка В.М.Маслова и др., 2001;

БРОНД-3 – оценка А.В.Игнатюка и др., 2002; с существенными модификациями в 2004 и 2005 гг.;

ENDF/B-VII = NDS-2006 – новая оценка Секции ядерных данных МАГАТЭ и Мухабхаба (S.Muhabghab) и др., 2006.

## Общие характеристики

- 1.1.  $Z = 90$  -зарядовое число;
- 1.2.  $A = 232$  (атомный вес);
- 1.3.  $AW = 230.045$  (отношение массы ядра к массе нейтрона);
- 1.4. Радиоактивен с периодом полураспада  $T_{1/2} = (1.405 \pm 0.006) 10^6$  лет, доминирует  $\alpha$ -распад с вкладом  $1.2 \cdot 10^{-8} \%$  спонтанного деления;

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

### 2.1 Область разрешенных резонансов.

В JENDL-3.3 граница области разрешенных резонансов выбрана равной 3.5 кэВ, параметры резонансов взяты из компиляции [84M] и принят радиус потенциального рассеяния  $R_0 = 10.01$  фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения 24.7 мэВ. Параметры отрицательного резонанса определены из условий описания рекомендованного сечения захвата тепловых нейтронов [84M]. Для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении MLBW.

В оценках JEFF-3.1 и Минск-2001 параметры разрешенных резонансов взяты из ENDF/B-VI. Они основаны на оценке резонансных параметров K.Olsen [84M] с верхней границей 4 кэВ и радиусом потенциального рассеяния 9.72 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами были приняты значения 24.4 мэВ, а для вычисления нейтронных сечений - приближение MLBW., Чтобы достичь корректного описания наблюдаемых эпитепловых сечений было использовано 7 отрицательных резонансов

В 2004 г. В Ок-Ридже (ORELA) был выполнен новый анализ резонансных параметров на основе программы SAMMY с учетом всей совокупности экспериментальных данных по пропусканию и сечениям радиационного захвата нейтронов [04L]. Верхняя граница резонансов принята равной 4 кэВ и радиус потенциального рассеяния - 9.72 фм. Для резонансов с неизвестными радиационными ширинами принято значение 24.4 мэВ, и для вычисления нейтронных сечений на основе резонансных параметров рекомендовано приближении Рэйха-Мура. Параметры данного анализа были включены в оценку БРОНД-3 и NDS-2006 (=ENDF/B-VII).

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

Оценка	JENDL-3.3	Минск-2001	ENDF/B-VII(БРОНД-3)	Эксп. [06M]
полное	11.472	20.35	20.35	20.95±0.12
упругое	11.471	12.95	13.02	13.55±0.08
захвата	7.40	7.40	7.34	7.35±0.03
деления	$5.4 \cdot 10^{-5}$	$1.18 \cdot 10^{-5}$	$1.20 \cdot 10^{-5}$	0.052±0.040
резонансный интеграл выше 0.5 эВ:				
захвата	85.0	85.9	84.2	83.3±1.5
деления	0.636	.637	1.520	--

Оценка ORELA, включенная в БРОНД-3 и ENDF/B-VII, наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными, исключая данные по сечению деления тепловыми нейтронами, погрешность определения которого столь велика, что вряд ли здесь можно говорить о расхождении.

Граница области разрешенных резонансов – 4000 эВ.

## 2.2 Статистические параметры разрешенных резонансов.

На рис. 1 представлена энергетическая зависимость числа s- и p-резонансов, включенных в оценки ENDF/B-VI (=JEFF-3.1= Минск-2001) и ORELA (=ENDF/B-VII=БРОНД-3). Число s- резонансов примерно одинаково в обеих оценках, и линейному наклону числа резонансов соответствует среднее расстояние между резонансами  $D_0=16.6 \pm 0.2$  эВ. В то же время, отчетливо виден значительный пропуск в данных ORELA пропуск p-резонансов достаточно мал во всем диапазоне энергий до 4 кэВ, и линейному наклону нарастающей суммы резонансов соответствует значение  $D_1=5.9 \pm 0.2$  эВ. Отношение  $D_0/D_1=2.81 \pm 0.15$  в пределах погрешности согласуется со статистической оценкой отношения числа s- и p-резонансов, равной 3, и это свидетельствует о хорошей согласованности результатов анализа полного числа резонансов.

На рис. 1 представлены также энергетические зависимости кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин s- и p-резонансов, включенных в рассматриваемые оценки. 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. Так как это распределение уже использовалось в программе SAMMY при восстановлении параметров резонансов, то пропуск полученных резонансов не выходит за пределы статистической ошибки найденного числа резонансов. Наклону кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин соответствуют силовые функции  $S_0=(0.84\pm0.04) \cdot 10^{-4}$  и  $S_0=(1.58\pm0.10) \cdot 10^{-4}$ .

На рис. 2 и 3 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для разрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных нейтронных сечений некоторые разногласия в нейтронных ширинах резонансов не выходят за пределы погрешностей экспериментальных данных.

Для сечений захвата нейтронов основная масса данных получена для сечений захвата, усредненных по многим резонансам (рис. 3). Разногласия оценок радиационных ширин проявляются, в основном, в межрезонансных минимумах, и различия оценок ниже первого резонанса обусловлено их ориентировкой на различные экспериментальные данные.

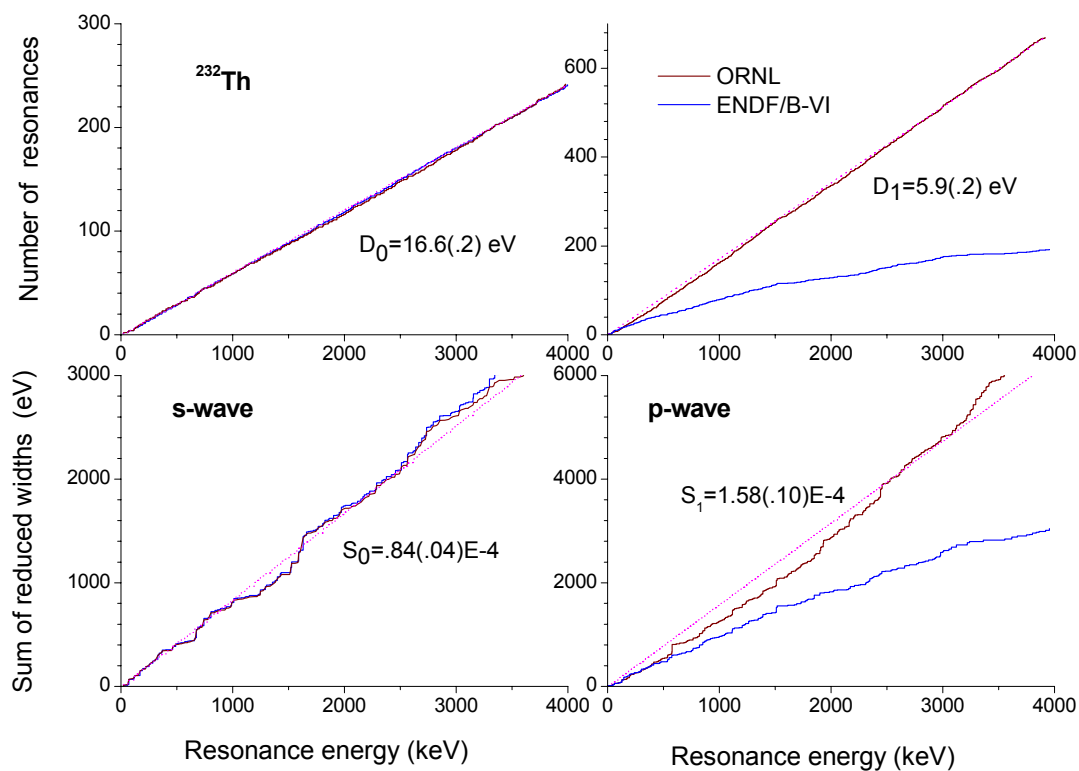


Рис. 1. Энергетическая зависимость числа резонансов и кумулятивных сумм приведенных нейтронных ширин в оценках ENDF/B-VI и ORELA

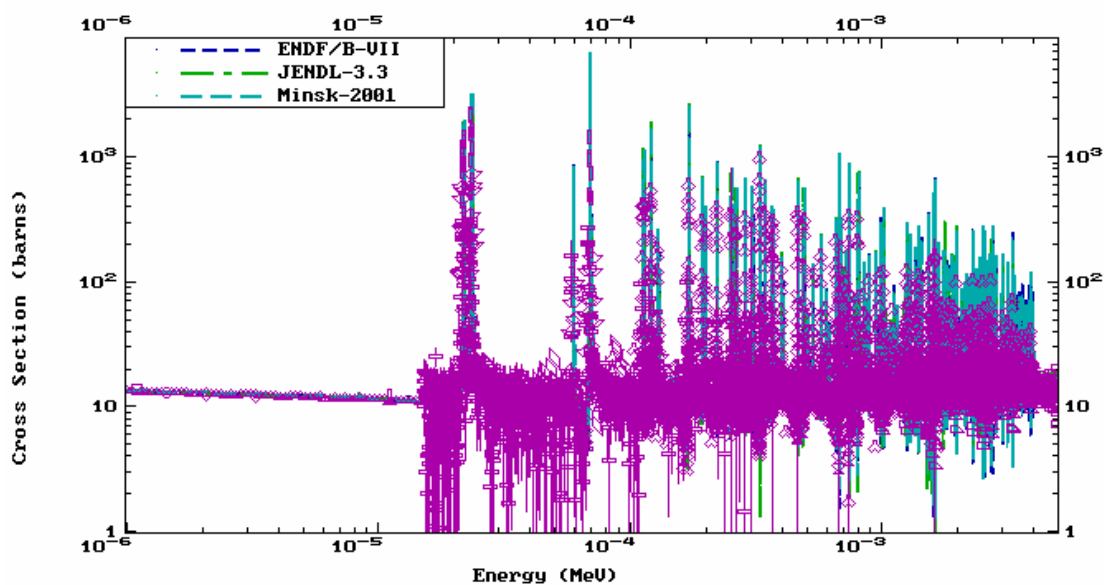


Рис. 2. Оценки полного нейтронного сечения в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

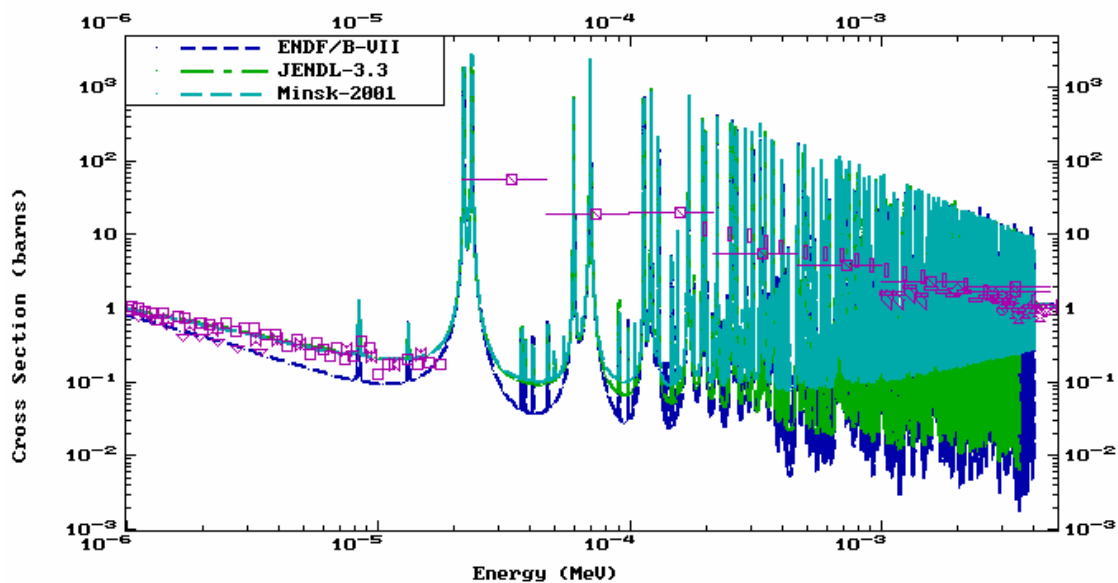


Рис. 3. Оценки сечения радиационного захвата нейтронов в области разрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

### 2.3 Область неразрешенных резонансов:

Область неразрешенных резонансов включена во все оценки, и ее верхняя граница принята равной 50 кэВ в JENDL-3.3, БРОНД-3 и ENDF/B-VII и 150 кэВ в Минск-2001 (=JEFF-3.1). Во всех оценках нейтронные силовые функции  $S_0$ ,  $S_1$  и радиационные ширины определены из анализа разрешенных резонансов,  $S_2$  и эффективный радиус получены на основе расчетов по оптической модели, и среднее расстояние между уровнями  $D_0$  определено таким образом, чтобы оптимально воспроизвести наблюдаемое сечение радиационного захвата нейтронов в рассматриваемом диапазоне энергий. Некоторые различия в выборе силовых функций и радиационных ширин в значительной степени компенсируются при подгонке расчетных сечений к одним и тем же экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов.

На рис. 4 и 5 показаны оценки полных нейтронных сечений и сечений радиационного захвата нейтронов для области неразрешенных резонансов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Для полных сечений трудно отдать предпочтение какой-либо из оценок, так как все они в пределах погрешностей согласуются с экспериментальными данными. Однако, для сечений захвата оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII являются предпочтительными, так как они подогнаны к недавним экспериментальным данным [04A, 04B], измеренным с очень малой погрешностью  $\sim 2-3\%$ .

**На основе проведенного анализа можно сделать вывод, в области разрешенных резонансов небольшие расхождения оценок не выходят за границы погрешностей данных. Однако оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII, в которые включен новый набор резонансных параметров, полученных в 2005 г. в Ок-Ридже, следует признать более полными и согласованными. Эти же оценки являются предпочтительными и для области неразрешенных резонансов, так как их параметры подогнаны к прецизионным экспериментальным данным по сечениям радиационного захвата нейтронов, полученным в 2004 г. на нейтронных спектрометрах Гиля и ЦЕРН. Впрочем, оценка минской группы в области неразрешенных резонансов соответствует экспериментальным данным не хуже предыдущих оценок, хотя полное сечение и лежит менее, чем на 0.5 барна ниже ENDF/B-VII.**

- 81O D.K. Olsen and R.W. Ingle, ORNL/TM-7661(ENDF-307),1981.  
 81M S.Mughabghab et al., Neutron Cross Sections, Academic Press, NY,1984, part B.  
 04A A.Aerts et al., Report DAPHIA-04-125 (2004).  
 04B K.Volev et al., Nuclear Data for Science and Techology (Santa Fe, 2004), 2005, p. 87.  
 04L L.C. Leal, H. Derrien, Proc. RCM on Data for Th-U Fuel Cycle (Vienna, December 2004), INDC(NDS)-0494, IAEA, Vienna  
 06M S.Mughabghab, Atlas of Neutron Resonance Parameters, Academic Press, NY,2006.

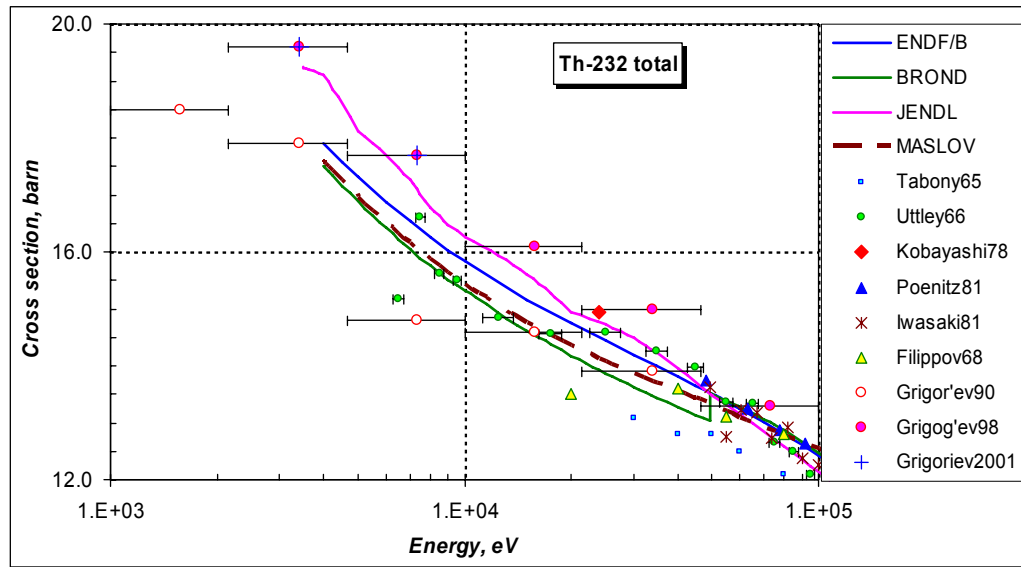


Рис. 4. Оценки полного нейтронного сечения в области неразрешенных резонансов в сравнении с экспериментальными данными

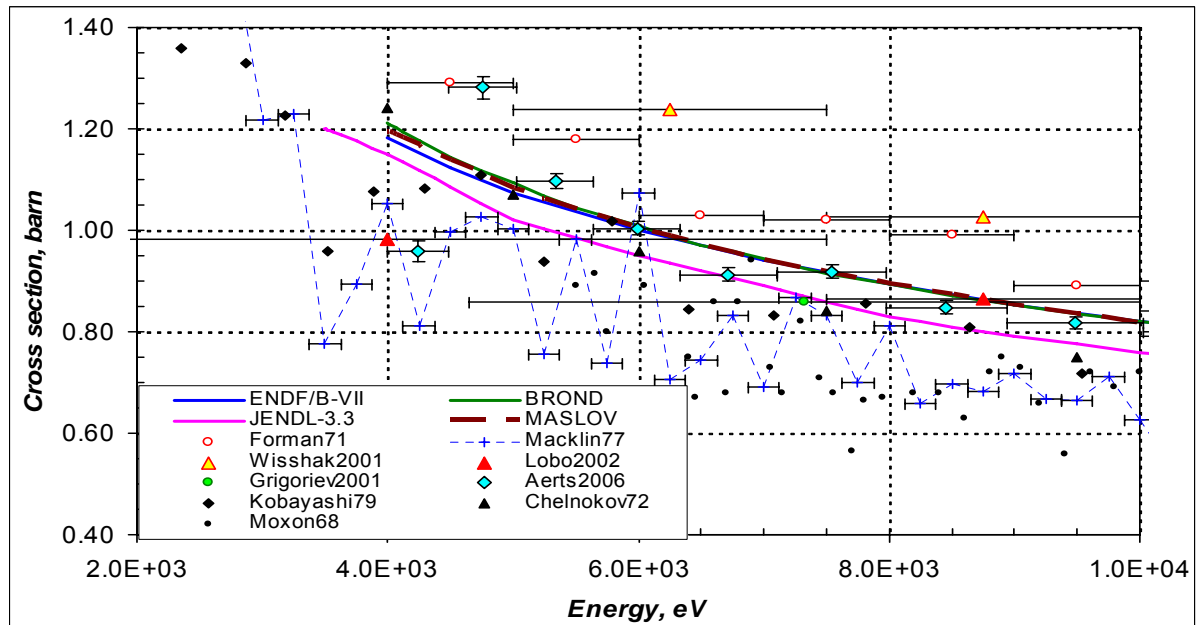


Рис.5а. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов. Результаты интервальных измерений снабжены горизонтальными «усами»



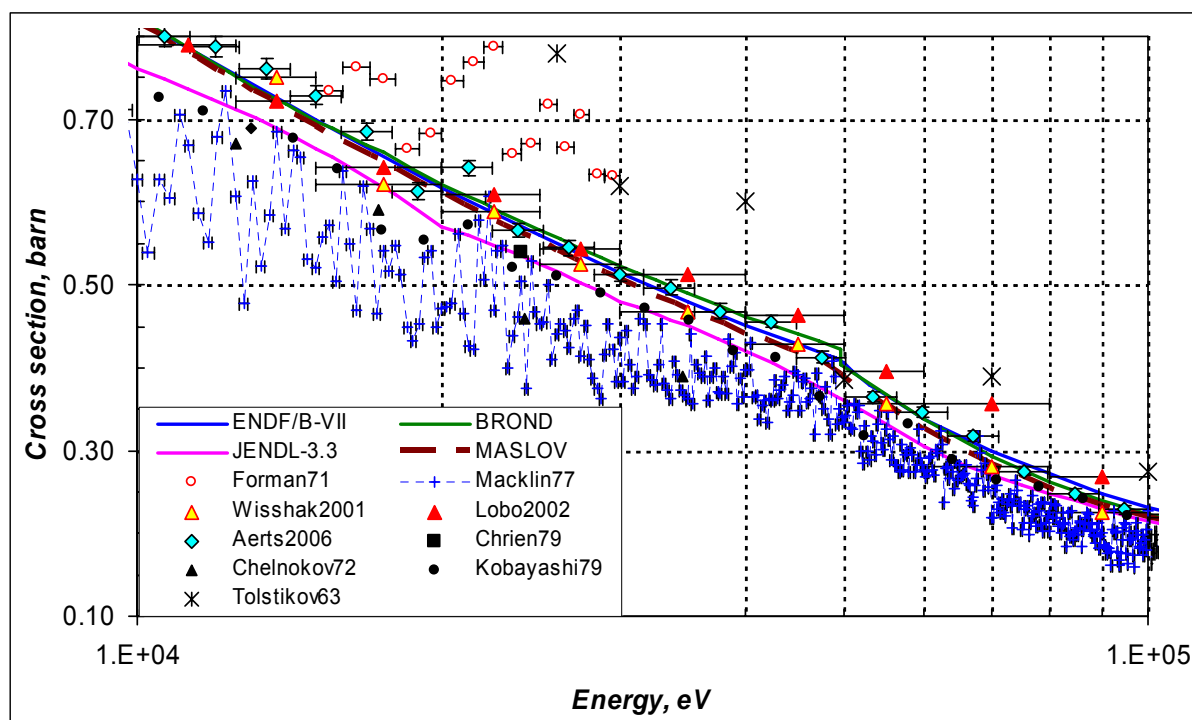


Рис.56. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов. Результаты интервальных измерений снабжены горизонтальными «усами»

### 3. Нейтронные сечения вне резонансной области

#### 3.1. Полное сечение

Имеется достаточно много экспериментальных данных по полным нейтронным сечениям вне резонансной области. В последние годы были выполнены прецизионные измерения полных сечений  $^{238}\text{Th}$  [01Ab], в которых достигнута погрешность данных менее 1%. Эти данные позволяют надежно определить параметры обобщенного оптического потенциала, который затем широко используется для расчетов сечений неупругих процессов, а также угловых распределений рассеянных нейтронов. Соответствующие расчеты были проведены для оценки БРОНД-3, и их результаты показаны на рис. 6 в сравнении с имеющимися экспериментальными данными и другими оценками сечений. Разногласия между различными оценками столь малы, что их трудно заметить на рисунке, но на основе статистических критериев описания данных можно показать, что оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII (=NDS-2001) обеспечивают наилучшую аппроксимацию экспериментальных данных с малыми погрешностями.

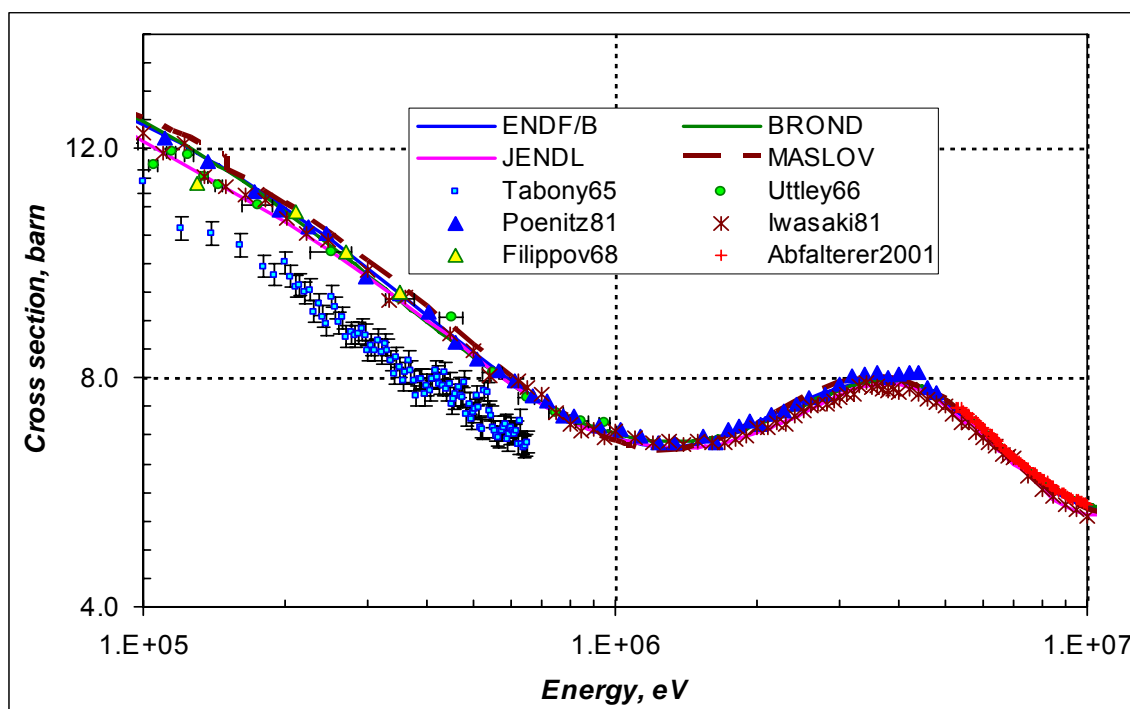


Рис. 6. Оценки полных нейтронных сечений вне резонансной области резонансов в сравнении с экспериментальными данными

### 3.2. Упругое рассеяние и угловые распределения нейтронов

Во всех оценках сечение упругого рассеяния, обычно определяется как разность полного сечения и суммы всех остальных оцененных сечений. На рис. 7 показано сравнение оценок интегральных сечений упругого рассеяния нейтронов с имеющимися экспериментальными данными. Все оценки согласуются с данными, но надо признать, что точность экспериментальных данных сравнительно не велика. В этих условиях можно ожидать, что более корректной для сечений упругого рассеяния будут оценка, в которой достигнуто лучшее описание данных по угловым распределениям упруго рассеянных нейтронов.

На рис. 8 для шести энергий нейтронов показано сравнение оценок угловых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Аналогичные результаты имеются также для ряда промежуточных и более высоких энергий. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, как правило, осуществляются на основе расчетов по оптической модели, и можно видеть, что все рассматриваемые оценки хорошо описывают имеющиеся экспериментальные данные.

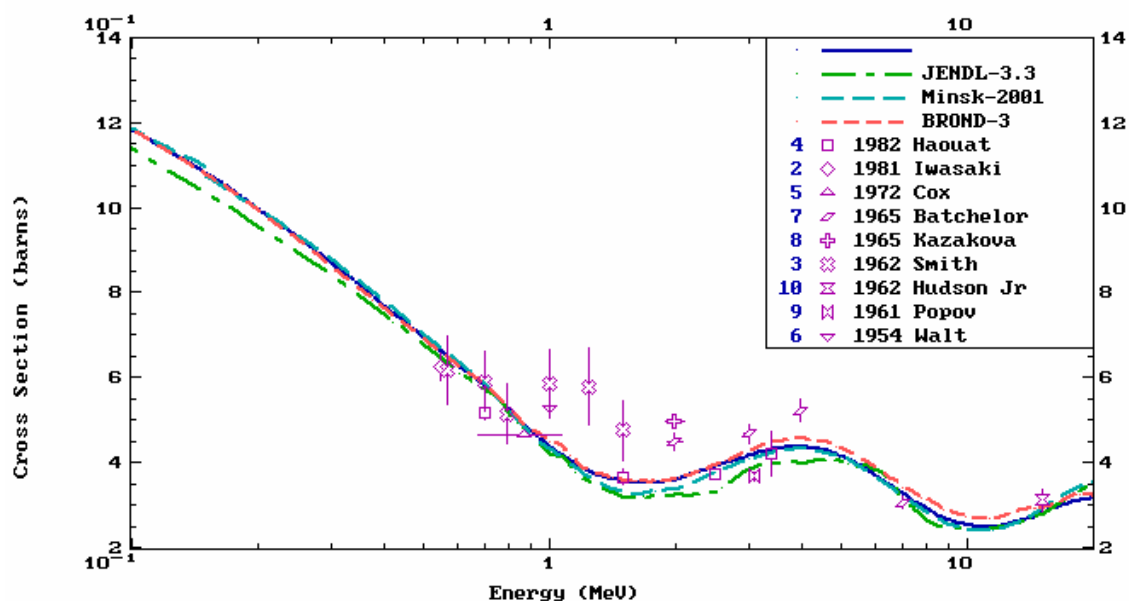


Рис. 7. Оценки сечений упругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

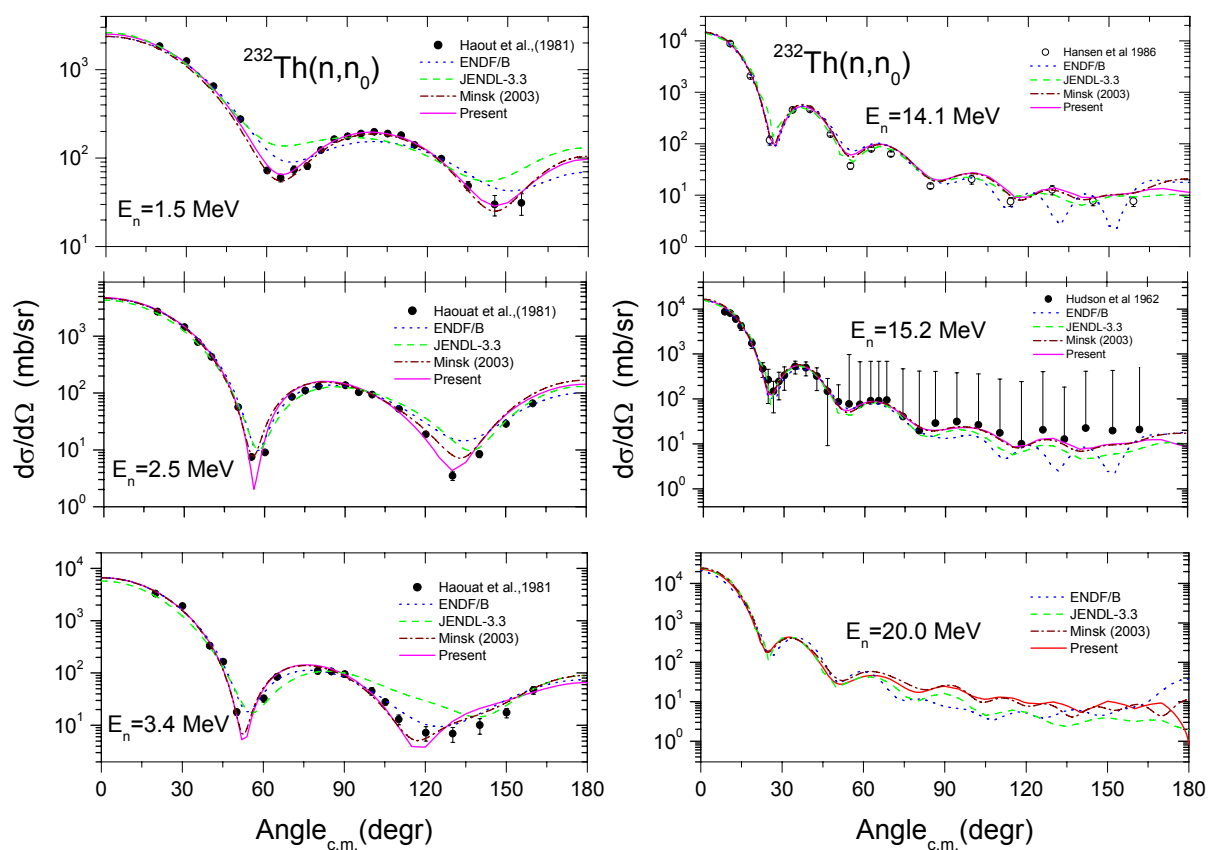


Рис. 8. Оценки угловых распределений упруго рассеянных нейтронов при различных энергиях в сравнении с экспериментальными данными (Present = БРОНД-3)

### 3.3 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 JENDL-3.3 рассматривался спектр 20 нижайших уровней ядра-мишени, тогда как в файле Минск-2001 учитывался 31 уровень, в БРОНД-3 - 40 уровней и в ENDF/B-VII – 39 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.

Сравнение оценок интегрального сечения неупругого рассеяния показано на рис. 9. Основные разногласия оценок обусловлены, главным образом, различиями сечений поглощения, вычисленных в рамках используемой оптической модели, а также различием моделей расчета вкладов прямых и предравновесных процессов, существенных для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Оценки JENDL-3.3 и Минск-2001 представляются несколько завышенными как в области максимума, так и для энергий нейтронов выше 7 МэВ. Оценки в БРОНД-3 и ENDF/B-VII дают очень близкие значения сечений во всем диапазоне энергий.

Экспериментальные данные по неупругому рассеянию нейтронов имеются также для рассеяния на нескольких низколежащих уровнях, но точность таких данных не очень велика. На рис. 10 и 11 показано сравнение оценок с экспериментальными данными по рассеянию нейтронов на первых двух уровнях. Для первого уровня все оценки удовлетворительно согласуются с данными, но разброс данных весьма значителен. Для энергий нейтронов выше 2 МэВ наиболее надежными являются данные [82Н], и БРОНД-3 лучше других оценок согласуется с этими данными.

Для второго уровня разброс экспериментальных данных еще более значителен, и в этих условиях трудно обосновать предпочтение какой-либо из оценок.

Для угловых распределений неупруго 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. На рис. 12 показаны оценки угловых распределений нейтронов, рассеянных на первом возбужденном уровне, в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Погрешности данных достаточно велики, и вряд ли можно обосновать на их основе какой либо выбор предпочтительной оценки.

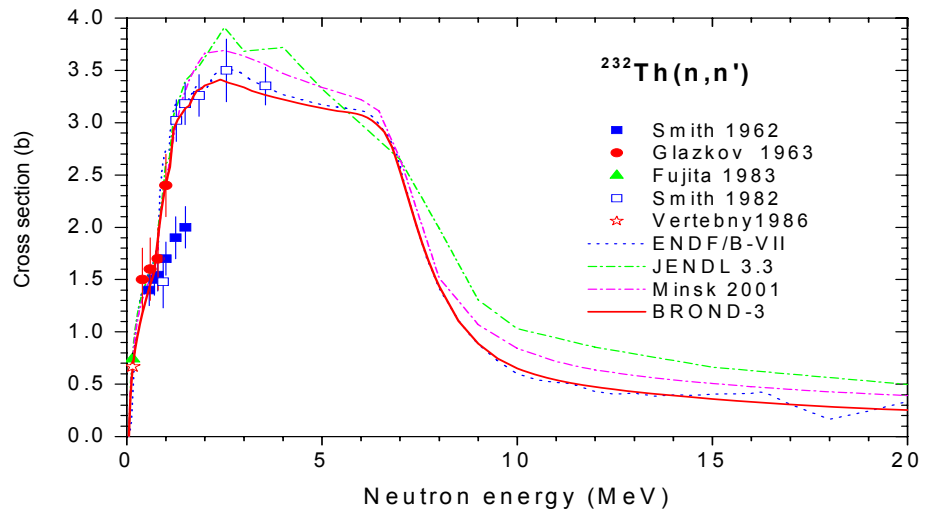


Рис. 9. Оценки интегрального сечения неупругого рассеяния нейтронов в сравнении с экспериментальными данными

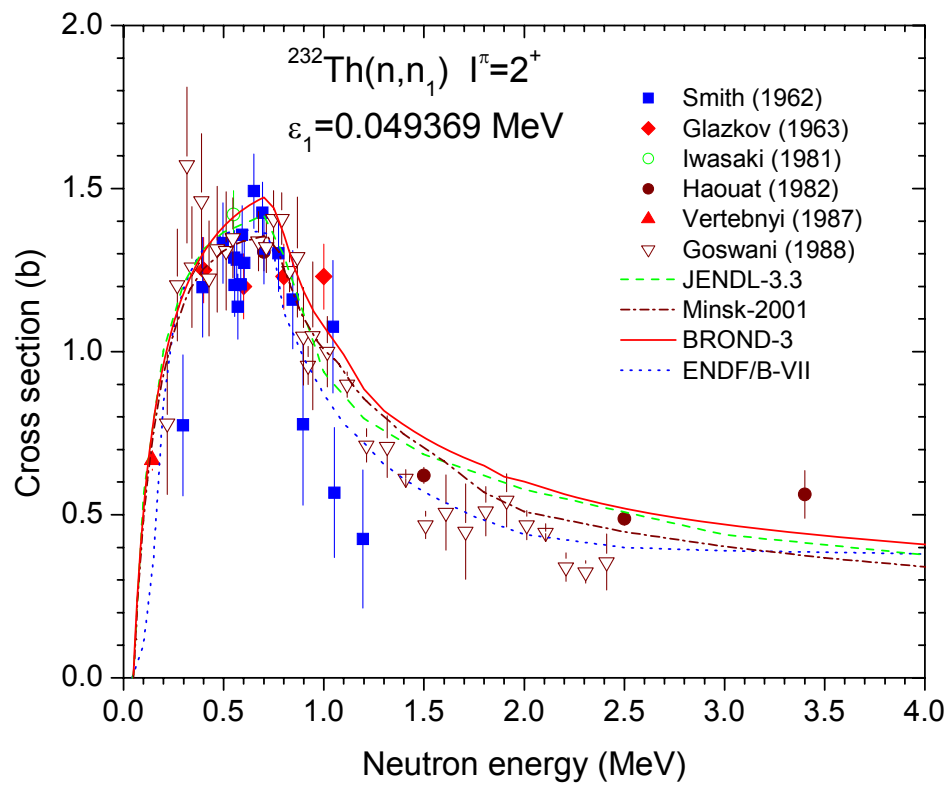


Рис. 10. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом возбужденном уровне  $^{232}\text{Th}$

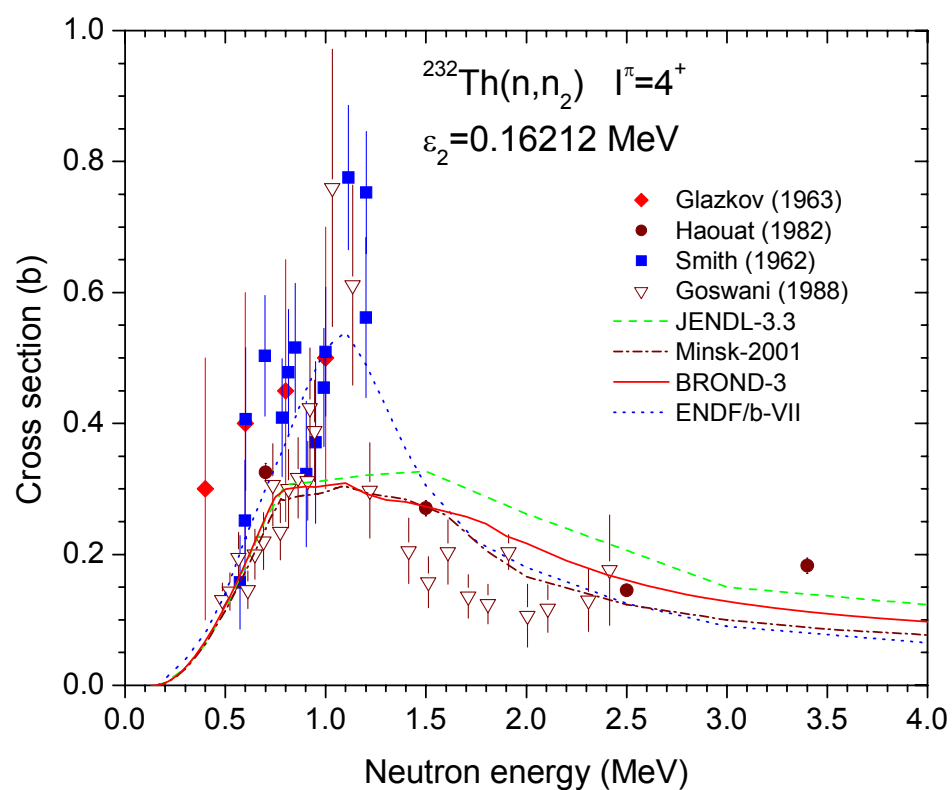


Рис. 11. Оценки сечения неупругого рассеяния нейтронов на втором уровне  $^{232}\text{Th}$

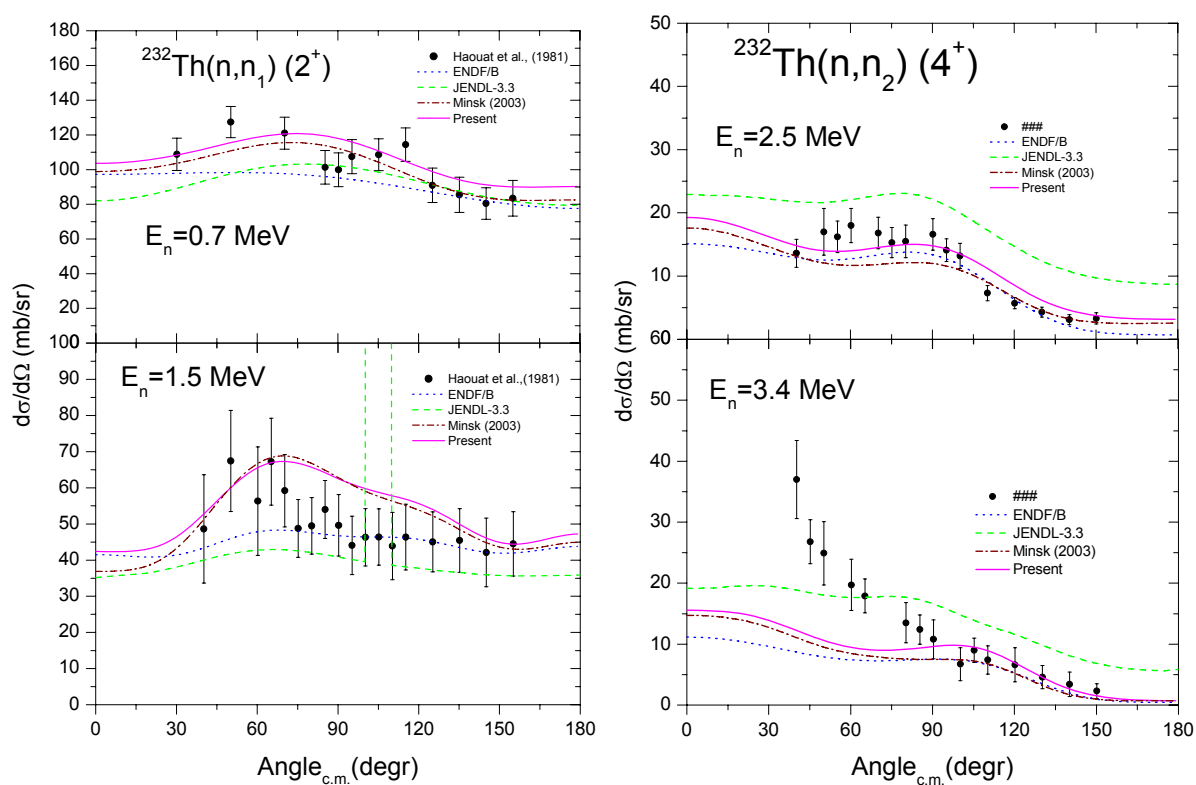


Рис. 12. Оценки угловых распределений рассеяния нейтронов на первом возбужденном уровне  $^{232}\text{Th}$  при различных энергиях налетающего нейтрона (Present = БРОНД-3)

### 3.3. Сечение радиационного захвата нейтронов

Экспериментальные данные по сечению радиационного захвата нейтронов вне резонансной области весьма многочисленны, но разногласия между ними превышают требуемые точности оценки сечений захвата. На рис. 13 данные, имеющиеся в EXFORe, показаны в сравнении с оценками. Все оценки получены на основе стандартных оптико-статистических расчетов, и их разногласия в области энергий выше 400 кэВ обусловлено различными приближениями в описании конкуренции радиационных и нейтронных ширин на начальных этапах каскада гамма-переходов. В области энергий выше 8-10 МэВ во всех оценках рассматривается механизм прямого-коллективного захвата нейтронов, но приближения, привлекаемые для его описания, различаются весьма значительно. Следует, однако, отметить, что ввиду малой величины сечения захвата нейтронов с энергиями выше 1 МэВ, разногласия оценок в области высоких энергий не оказывает сколько-либо заметного влияния на расчеты характеристик ядерных реакторов.

Разногласия оценок в области энергий ниже 1 МэВ обусловлены выбором экспериментальных данных, которым отдано предпочтение при подборе модельных параметров в соответствующих расчетах. В увеличенном масштабе сравнение оценок с экспериментальными данными в диапазоне энергий от 100 кэВ до 1 МэВ показано на рис. 13, где приведены данные недавних измерений [04А, 04В], заявленные погрешности которых составляют всего 2-3 %, которые заметно расходятся с оценкой Минск-2001, но достаточно хорошо согласуются с БРОНД-3 и ENDF/B-VII. Однако если принять весьма высокую точность результатов Аэрста, то следовало бы описывать в оценке и проявившуюся в этих измерениях gross-структуру. Альтернативой является предположение, что эта структура является следствием не учтенных экспериментаторами погрешностей.

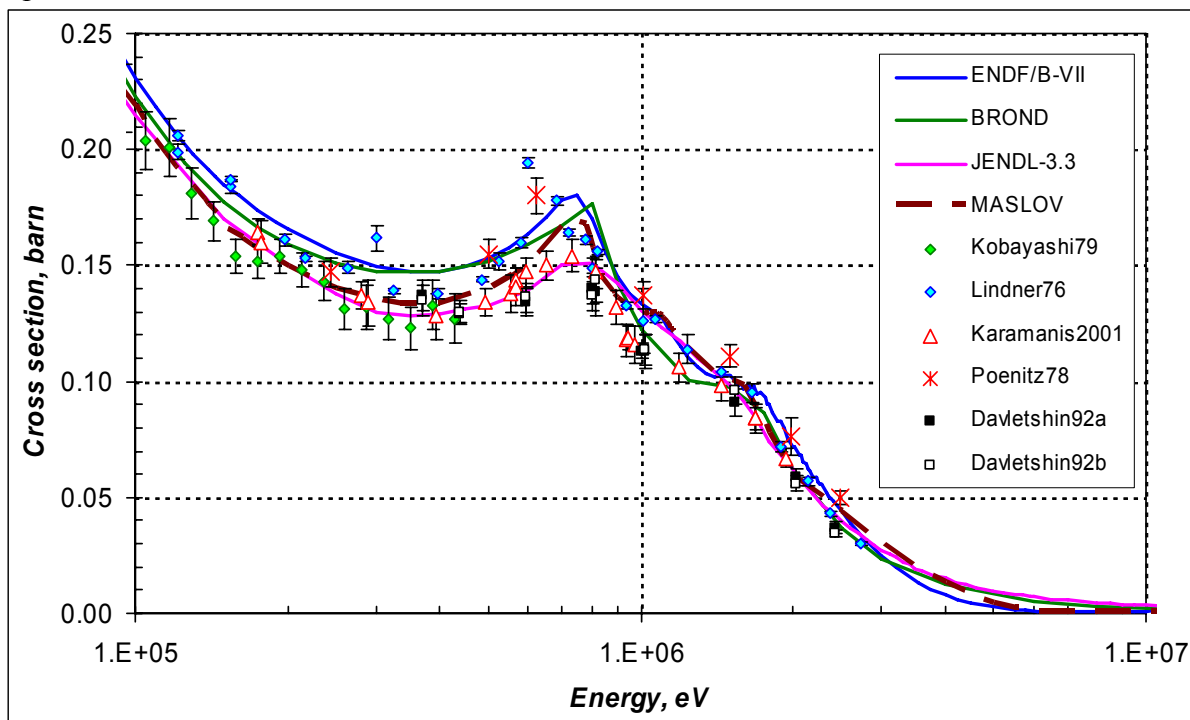


Рис. 13. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными

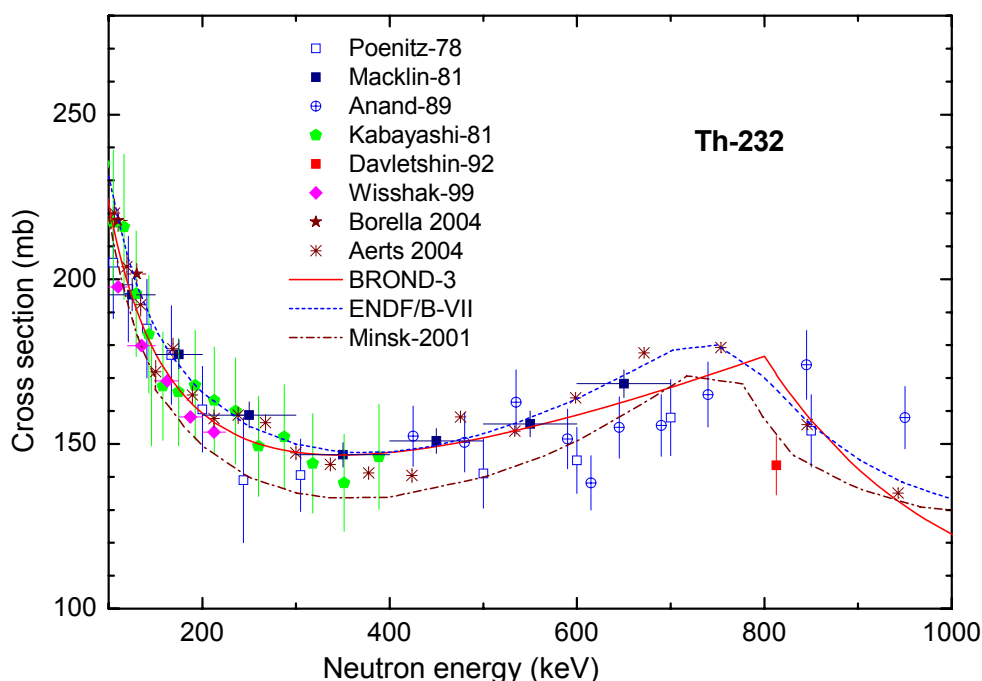


Рис. 14. Оценки сечений радиационного захвата нейтронов в сравнении с экспериментальными данными для диапазона энергий от 100 до 1000 кэВ

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

Оценки сечений реакций (n,2n) показаны на рис. 15. Имеется достаточно много экспериментальных данных для этого сечения, и результаты измерений последних лет находятся в удовлетворительном согласии. Оценку JENDL-3.3 несомненно, следует признать заниженной во всем диапазоне энергий, но остальные оценки хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными.

Оценки сечений реакций (n,3n) показаны на рис. 16 в сравнении с единственной экспериментальной точкой. Все оценки находятся в удовлетворительном согласии, но без дополнительной информации вряд ли оправдано предпочтение любой из них.

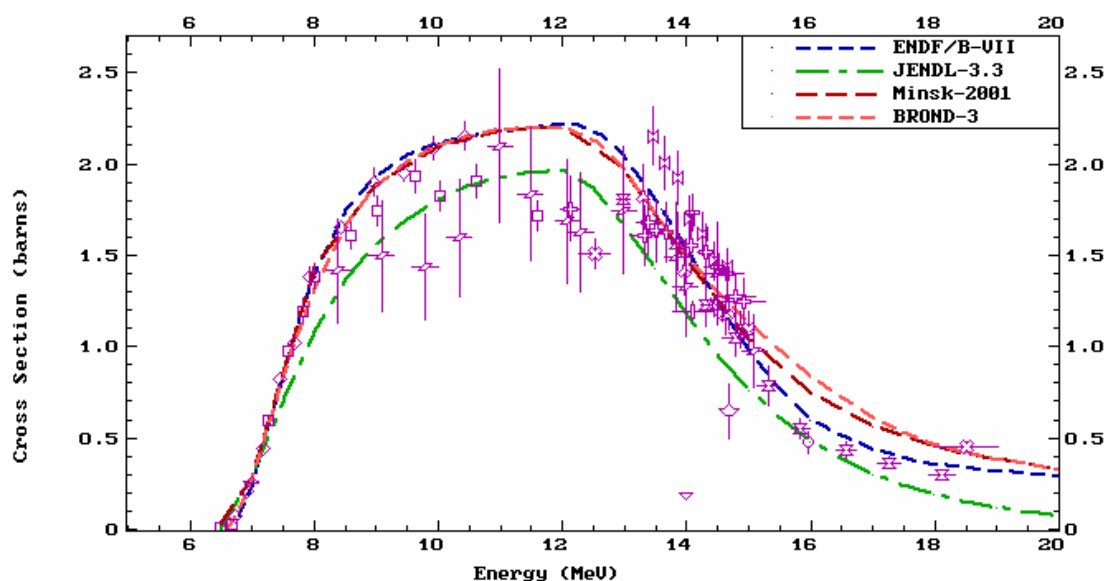


Рис. 15. Оценки сечений реакции (n,2n) в сравнении с экспериментальными данными



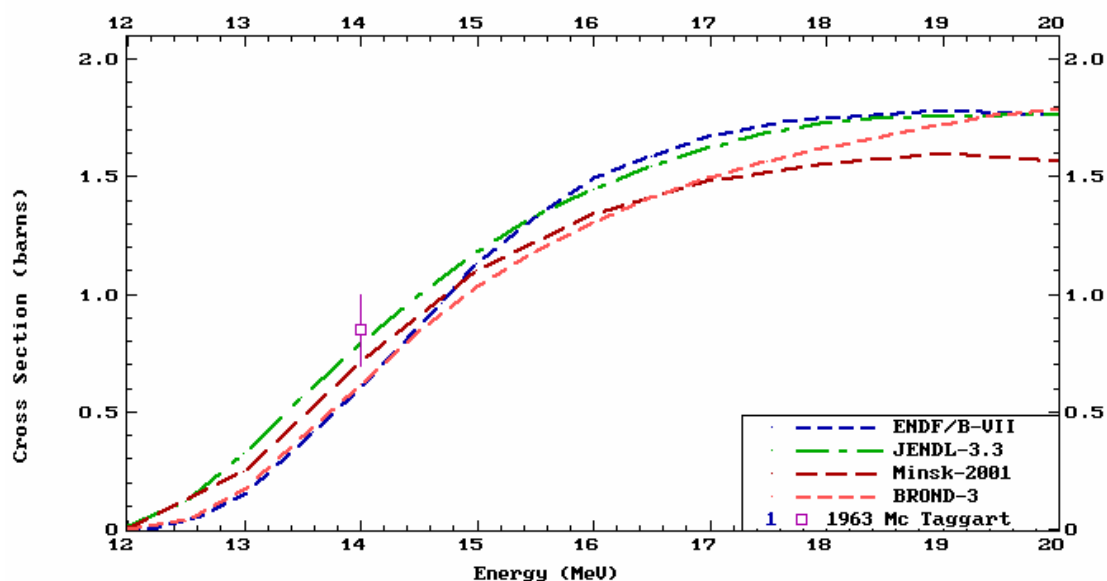


Рис. 16. Оценки сечений реакции  $(n,3n)$  в сравнении с экспериментальными данными

### 3.7. Реакция деления

Для сечений деления имеется большой объем экспериментальных данных, и все оценки сечений деления оказываются достаточно близкими. Имеющиеся данные показаны на рис. 17 в сравнении с оценками. Для БРОНД-3, наряду с теоретическими расчетами в рамках оптико-статистической модели, был проведен полный статистический анализ всей совокупности экспериментальных данных, результаты которого приняты в качестве оценки БРОНД-3. На основе нового метода статистического учета систематических погрешностей экспериментальных данных были определены 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.

На основе экспериментальных данных предпочесть какую-либо из оценок весьма трудно. ENDF/B-VII, вероятно, лучше описывает околопороговые структуры сечений деления, анализу которых было уделено специальное внимание. Оценка Минск-2001 кажется несколько завышенной в области первого плато сечения деления, что обусловлено выбором экспериментальных данных, на которые в первую очередь ориентировалась оценка. Оценка БРОНД-3 обеспечивает наилучшее статистическое описание всей совокупности данных с учетом их скорректированных погрешностей.

Наряду с сечениями деления одной из важнейших характеристик делящихся ядер является множественность нейтронов деления. Оценки числа вторичных нейтронов, испускаемых при делении  $^{232}\text{Th}$ , приведены на рис. 18 совместно с имеющимися экспериментальными данными. Значительных расхождений в оценках нет, но ввиду достаточно высоких требований к точности оценки множественности нейтронов деления, для БРОНД-3 оценка была выполнена на основе статистического анализа всей совокупности экспериментальных данных.

01A W.P.Abfalterer et al. Phys. Rev. **C63** (2001) 044608.

04A A.Aerts et al., Report DAPHIA-04-125 (2004).

04B A.Borella et al., Nucl. Data for Science and Techology (Santa Fe, 2004), 2005, p. 87.

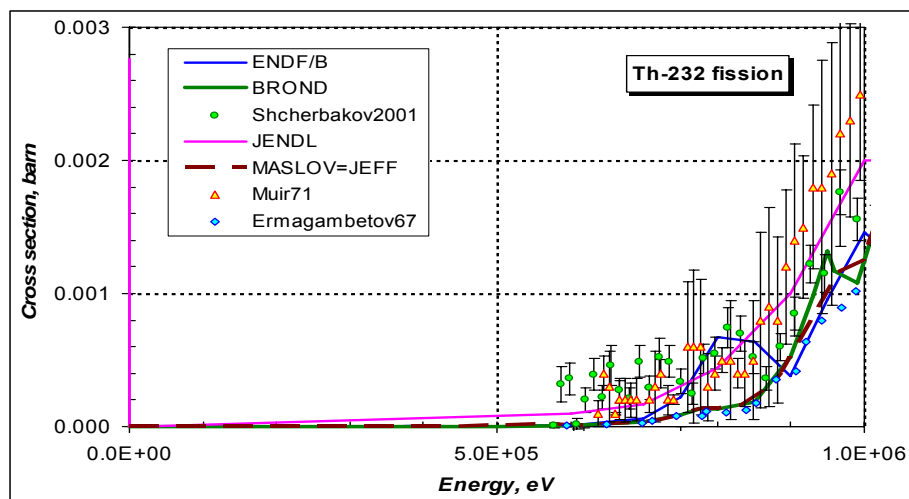


Рис. 17а Сечение деления  $^{232}\text{Th}$

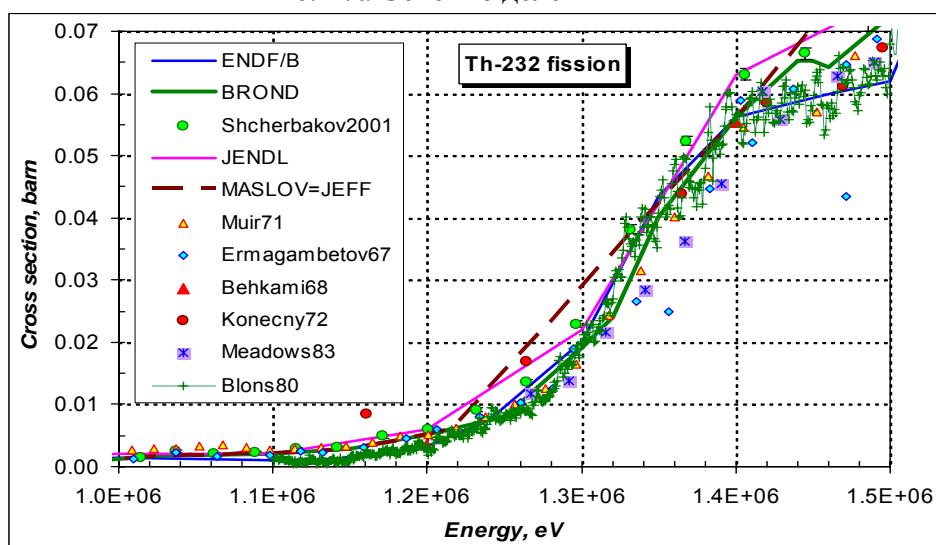


Рис. 17б Сечение деления  $^{232}\text{Th}$

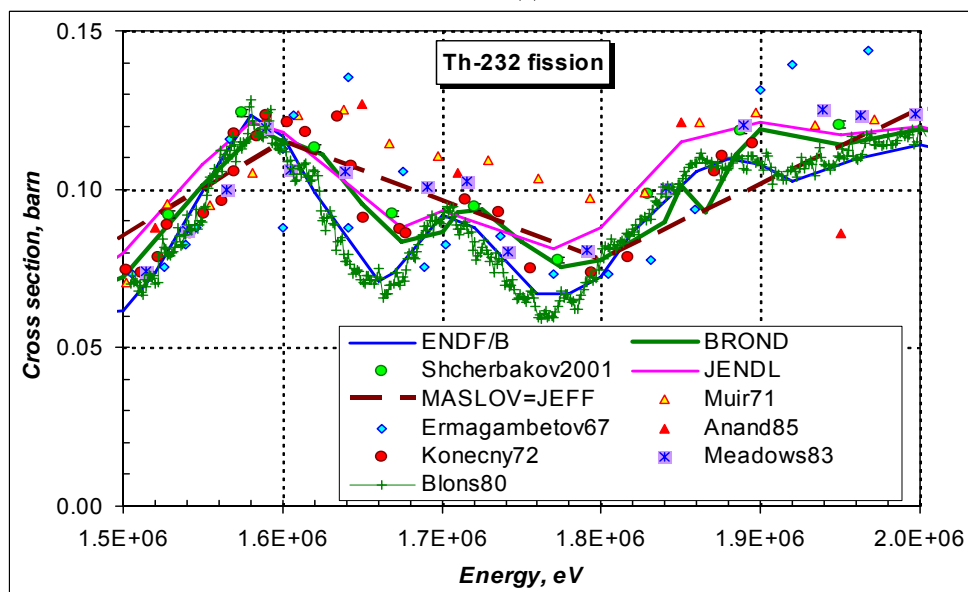


Рис. 17в Сечение деления  $^{232}\text{Th}$

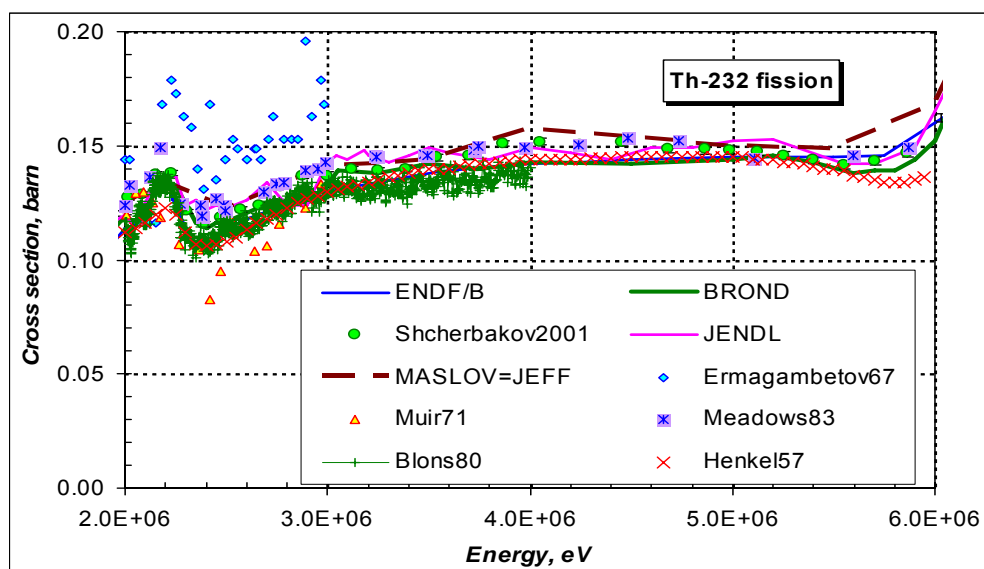


Рис. 17г Сечение деления  $^{232}\text{Th}$

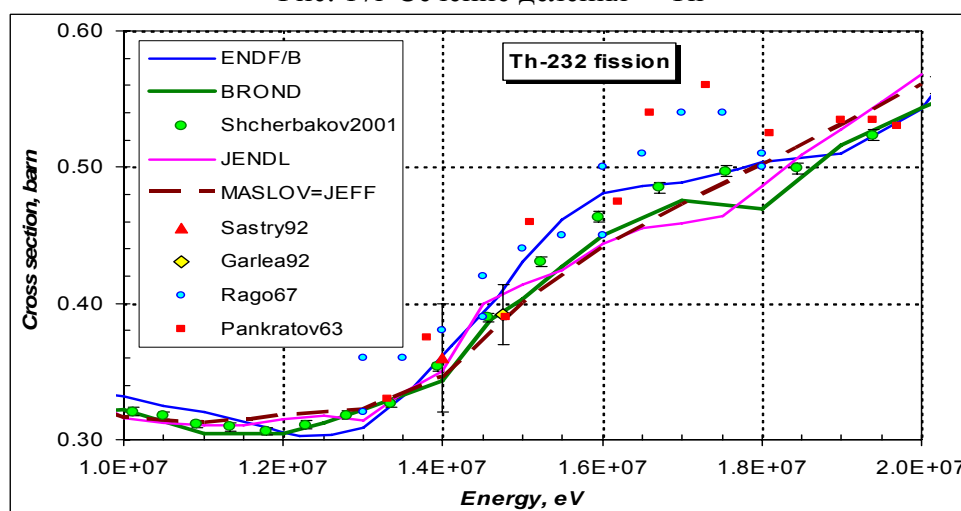


Рис. 17д. Сечение деления  $^{232}\text{Th}$

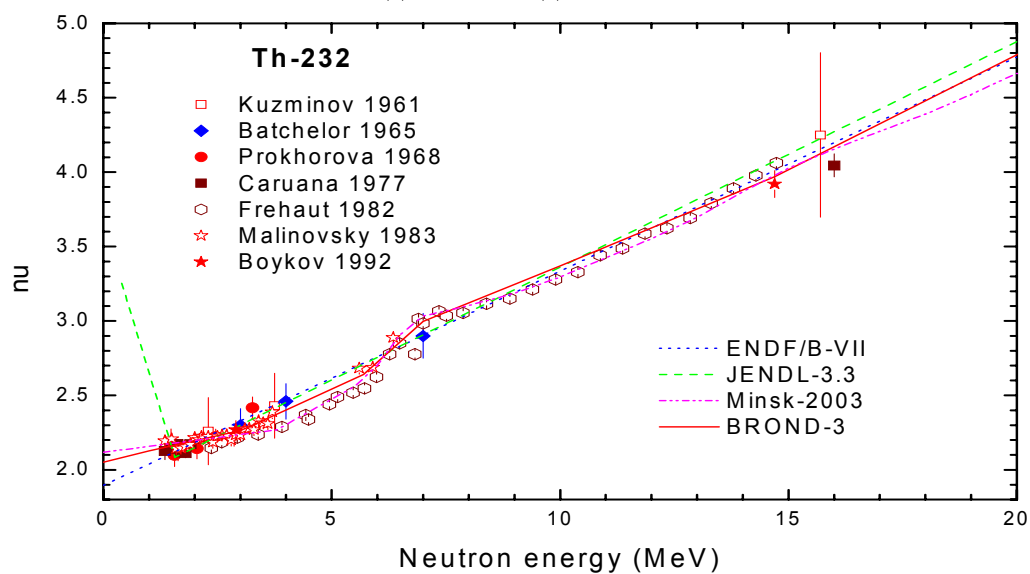


Рис. 18 Оценки среднего числа нейтронов деления в реакции  $^{232}\text{Th}(n,f)$  в сравнении с экспериментальными данными

#### **4. Образование фотонов (MF=12, 13, 14, 15)**

В файлах JENDL-3.3 и Минск-2001 нет оценок выходов гамма-лучей. В БРОНД-3 содержатся оценки интегральных выходов и спектров гамма-лучей, сопутствующих процессам радиационного захвата, неупругого рассеяния нейтронов и деления материнского ядра, а также деления изотопов тория, образующихся после испускания нейтронов. В ENDF/B-VII содержится более детальная информация как о спектрах дискретных гамма-лучей, так и непрерывных спектрах гамма-излучения для всех каналов неупругого взаимодействия нейтронов с рассматриваемым изотопом..

Угловые распределения всех типов гамма-излучения приняты изотропными в БРОНД-3 и в ENDF/B-VII.

#### **5. Заключение**

Из проведенного анализа следует, что оценки БРОНД-3 и ENDF/B-VII, в которые включен новый набор резонансных параметров, полученных в 2005 г. в Ок-Ридже, следует признать наиболее полными и согласованными. Эти же оценки являются предпочтительными для сечений радиационного захвата нейтронов в диапазоне энергий до 1 МэВ, так как они хорошо описывают прецизионные экспериментальные данные, полученные в 2004 г. на нейтронных спектрометрах Гиля и ЦЕРНа.

Для остальных сечений вне резонансной области оценки Минск-2001, БРОНД-3 и ENDF/B-VII хорошо согласуются как между собой, так и с экспериментальными данными. **Для библиотеки РОСФОНД в настоящее время целесообразно принять оценку БРОНД-3, которая** обеспечивает наилучшее статистическое описание всей совокупности данных о сечениях деления ядер и содержит погрешности оценок основных нейтронных сечений вместе с соответствующими ковариационными матрицами.

#### **Автор рекомендации**

**А.В.Игнатюк.**

Дополнение М.Н.Николаева

В файле, включаемом в РОСФОНД, данные о запаздывающих нейтронах должны быть представлены в 8-групповом представлении, принятом в JEFF-3.1 и в РОСФОНДе для всех делящихся ядер. Соответственно спектры групп запаздывающих нейтронов должны быть приняты такими же, как для урана-235 (с относительными выходами групп запаздывающих нейтронов, принятыми в JEFF-3.1).

Поскольку РОСФОНД ориентирован на расчеты не только нейтронных полей, но и на расчет образования радионуклидов в нейтронных реакциях, файл следует пополнить данными о выходах продуктов деления. Для последних, целесообразно принять оценку Миллса из JEFF-3.1.

## 90.7. Торий-234

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=24.10$  д). Испытывает бета-распад в протактиний-234m, который, в свою очередь распадается ( $T_{1/2}=1.17$ мин) в уран-234. Является продуктом распада урана-238.

В современных библиотеках оцененных данных содержится одна полная оценка нейтронных данных для тория-227: в JENDL-3.3 – оценка T.Ohsawa, 1987, принятая также в JEFF-3.1 и в ENDF/B-VIIb2. Имеется еще оценка R.A.Forrest, J. Корецку для нейтронных сечений в активационной библиотеке EAF-2003, которая сделана на основе сечений из библиотеки JENDL-3.1.

На рисунке 16 показано сравнение сечения деления Th-234, принятого в библиотеках JENDL и EAF.

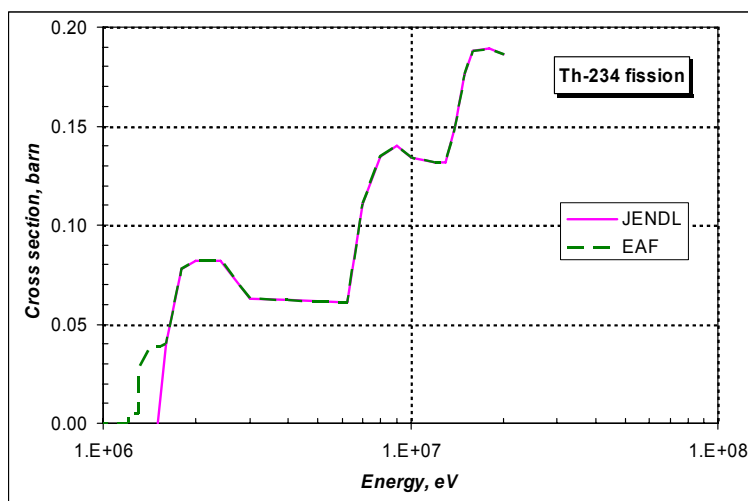


Рисунок 16 – Сравнение оцененных сечений деления Th-234.

Из приведенного на рисунке 16 сравнения видно, что в оценке Forrest и Корецку (EAF) порог реакции деления не такой как в оценке Takagi. Более того, в оценке EAF имеется подпороговое сечение деления, значение которого в тепловой точке совпадает с рекомендацией Мухабхаба. Выше энергии 1.6 МэВ обе оценки совпадают между собой.

На рисунке 17 показано сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов для Th-234.

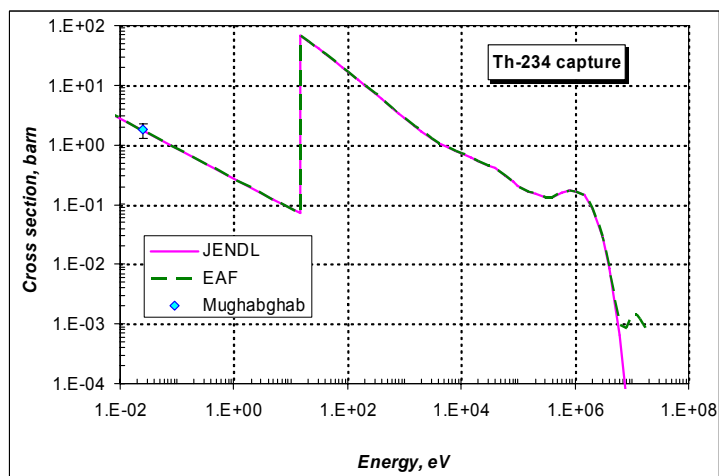


Рисунок 17 – Сравнение оцененных сечений радиационного захвата Th-234.

Согласно рисунку 17 сечения радиационного захвата Th-234 в обеих оценках практически совпадают, за исключением области энергий выше  $\sim 10$  МэВ, где оценка JENDL, как обычно, резко занижает сечение.

### **Заключение**

В РОСФОНД включается файл оцененных данных о нейтронных сечениях из JENDL-3.3. Сечение деления в области энергий ниже 1.6 МэВ и сечение захвата выше 6 МэВ откорректированы согласно оценке EAF-2003. Соответственно пересчитано полное сечение. Включены данные о запаздывающих нейтронах (8 групп) на основе данных JEFF-3.1, но с теми же спектрами, что и для урана-235. Включены данные о выходах продуктов деления (оценка Ингланда (T.England) из ENDF/B-VI).

### **Автор отбора данных**

Кощеев В.Н.