

63. ЕВРОПИЙ

63.0 Общие замечания

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 12-ти стабильных и долгоживущих изотопов европия. Данные для всех этих изотопов содержатся в библиотеке ФОНД-2.2. Однако, как будет видно далее, нейтронные данные для ряда изотопов было бы целесообразно заменить на оценки более современные и полные, выполненные в последние годы. Рассмотрим результаты деятельности по переоценке данных для изотопов европия, проведенной в последние годы в сравнении с оценками, содержащимися в ФОНД-2.2. При этом главное внимание будем обращать на результаты оценки сечения захвата.

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Рекомендованные значения Мухабхаба приводятся согласно работе “Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and G-factors”, INDC(NDS)-440, 2003.

Радиоактивные изотопы.

Для 6-ти долгоживущих изотопов диспрозия – ^{145}Eu , ^{146}Eu , ^{147}Eu , ^{148}Eu , ^{149}Eu и ^{150}Eu полных наборов нейтронных данных нет. В библиотеке ФОНД-2.2 нейтронные данные для них были приняты из EAF-3. В версии библиотеки EAF-2003 данные по радиоактивному захвату нейтронов в большинстве своем практически не изменились, однако остальные сечения были пересмотрены с учетом расчетов по программам, реализующих новые теоретические модели.

Отдельно следует отметить долгоживущие изотопы ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{156}Eu , для которых имелись полные наборы нейтронных данных. Для этих изотопов характерны большие сечения радиационного захвата и большое время жизни. Они являются продуктами деления, которые дают заметный суммарный вклад в полное сечение поглощения всех продуктов деления.

Стабильные изотопы.

Данные для стабильных изотопов европия в библиотеке ФОНД-2.2 были взяты из библиотеки JENDL-3.3 с небольшой корректировкой данных (март 1990). Изменения коснулись пересмотра сечений для пороговых реакций.

В библиотеке JEF-3.1 для Eu-151 используется оценка, выполненная для JEF-2.2 (~ENDF/B-V). Для Eu-153 - оценка, выполненная для японской библиотеки нейтронных данных JENDL-3.2.

В библиотеке JENDL-3.3 нейтронные данные не пересматривались по сравнению с версией JENDL-3.2 (март 1990).

В ENDF.B-VII (beta 1.2 версия, ноябрь 2005) принята оценка, выполненная в рамках проекта по созданию международной библиотеки продуктов деления. Авторы оценки: Мухабхаб (S.Mughabghab, BNL) - (резонансная область); Обложинский (P. Oblozinsky, BNL), Рохман (D.Rochman, BNL) и Херман (M.Herman, BNL) - (область более высоких энергий).

При анализе нейтронных данных для отдельных изотопов мы будем исходить из той общей информации, которая изложена выше.

63.1. Европий-145

Испытывает позитронный распад в ^{145}Nd (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{145}Eu ($T_{1/2}=5.93$ дн) \rightarrow ^{145}Sm ($T_{1/2}=340$ дн) \rightarrow ^{145}Pm ($T_{1/2}=17.7$ г) \rightarrow ^{145}Nd (стабильный).

В ФОНД-2.2 – оценка J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 1 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

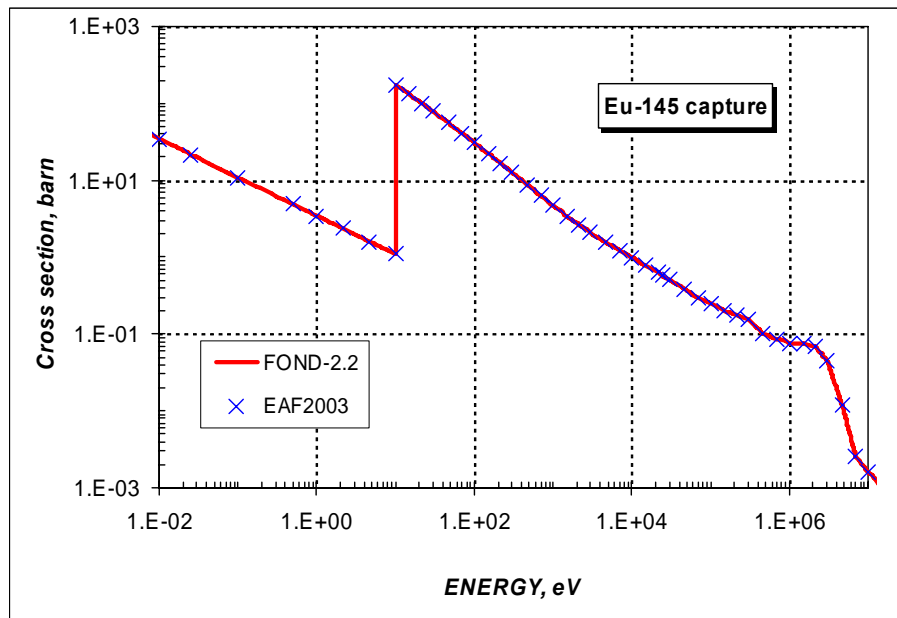


Рисунок 1 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-145.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 21.70 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

63.2. Европий-146

Испытывает распад в ^{142}Nd (стабильный изотоп) посредством цепочки распада $^{146}\text{Eu}(T_{1/2}=4.51 \text{ дн.}, \epsilon\text{-распад}) \rightarrow ^{146}\text{Sm}(T_{1/2}=1.03\text{E}7 \text{ лет}, \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{142}\text{Nd}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 2 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

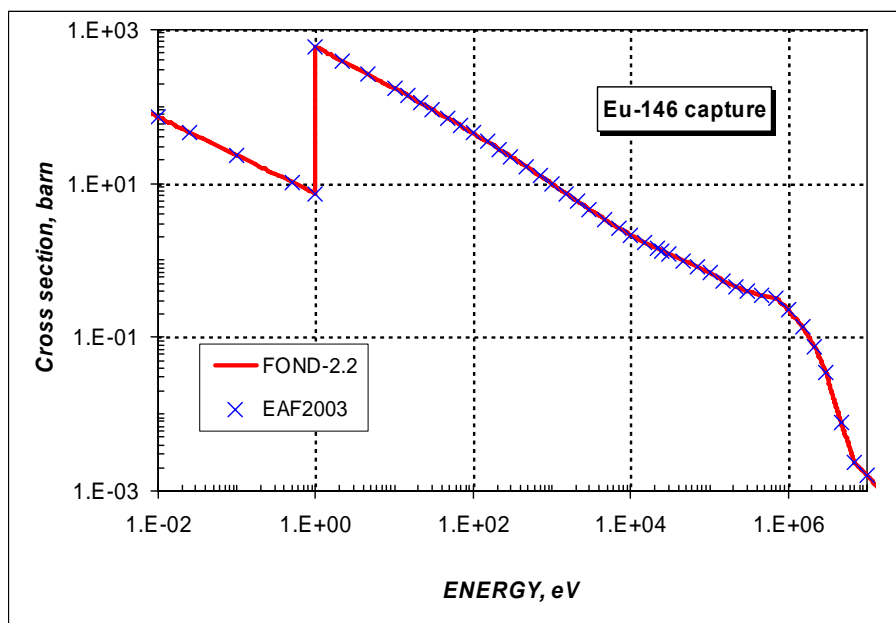


Рисунок 2 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-146.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 46.25 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

63.3. Европий-147

Испытывает распад в ^{143}Nd (стабильный изотоп) посредством цепочки распада $^{147}\text{Eu}(T_{1/2}=24.6 \text{ дн.}, \epsilon\text{-распад}) \rightarrow ^{147}\text{Sm}(T_{1/2}=1.06\text{E}^{11} \text{ лет}, \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{143}\text{Nd}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 3 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

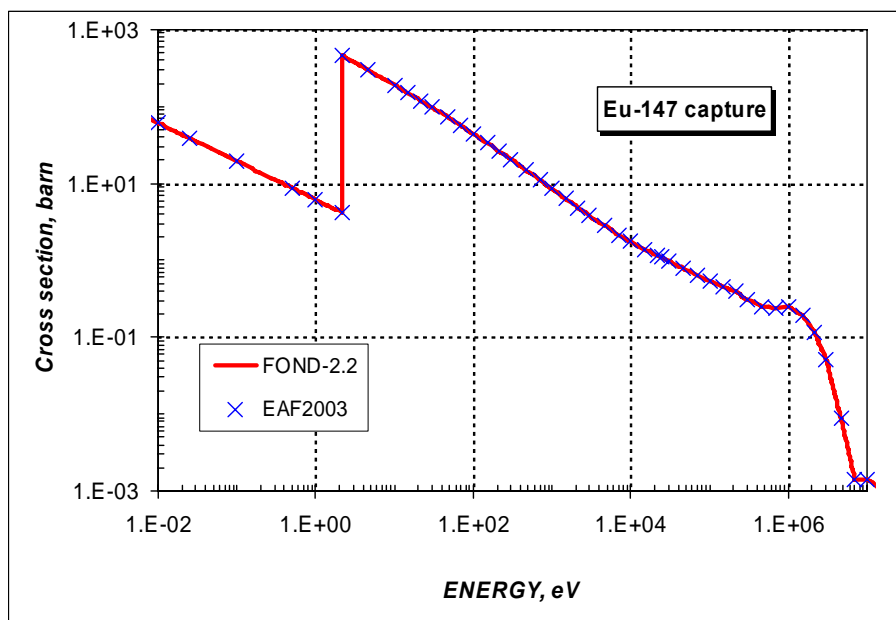


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-147.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 38.72 барна.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

63.4. Европий-148

Испытывает распад в ^{141}Pr (стабильный изотоп) посредством цепочки распада ^{148}Eu ($T_{1/2}=55.6$ дн., ε -распад) \rightarrow ^{148}Sm ($T_{1/2}=7.0\text{E}^{15}$ лет, α -распад) \rightarrow ^{144}Nd ($T_{1/2}=2.29\text{E}^{15}$ лет, α -распад) \rightarrow ^{141}Pr (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 4 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

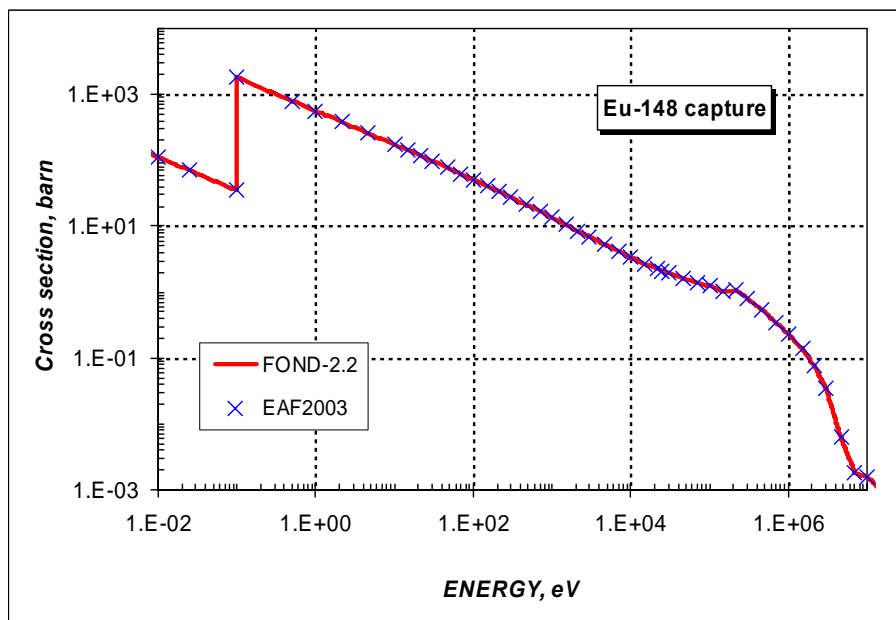


Рисунок 4 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-148.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 69.77 барна.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.Н.

63.5. Европий-149

Испытывает позитронный распад в ^{149}Sm (стабильный изотоп) посредством цепочки распада $^{149}\text{Eu}(T_{1/2}=93.1 \text{ дн}) \rightarrow ^{149}\text{Sm}$ (стабильный).

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 5 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно из рисунка 5, сечение радиационного захвата было переоценено. Сечения остальных реакций также пересчитаны с использованием современных модельных параметров, которые основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

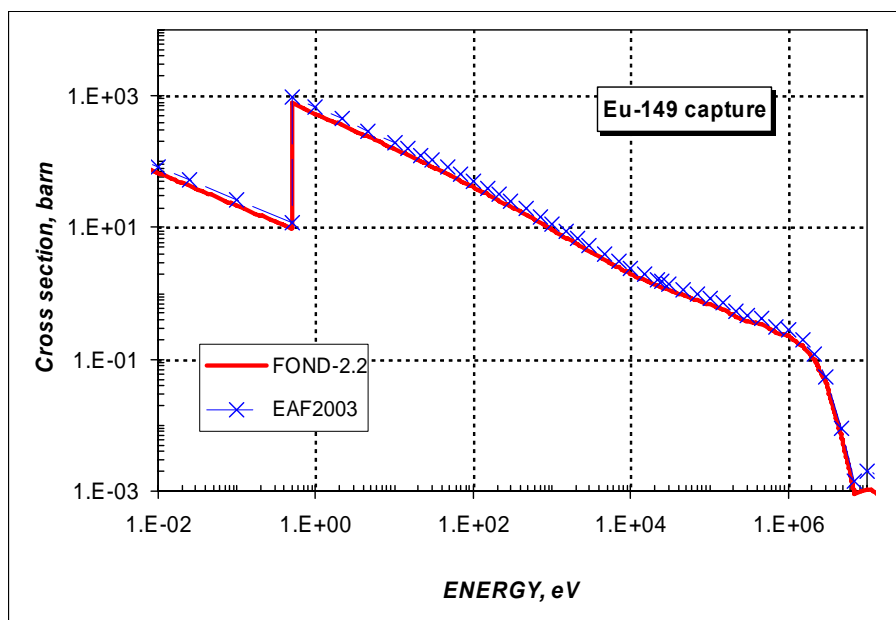


Рисунок 5 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-149.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре изменилось: было – 42.82 барн, стало – 52.86 барн.

В файле MF=9 сохранена только секция MT=111 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

63.6. Европий-150

Испытывает позитронный распад в ^{150}Sm (стабильный изотоп) посредством цепочки распада $^{150}\text{Eu}(T_{1/2}=36.9 \text{ лет}) \rightarrow ^{150}\text{Sm}(\text{стабильный})$.

В ФОНД-2.2 – J.Kopecky, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning.

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

На рисунке 6 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок. Как видно, сечение радиационного захвата осталось без изменения. Сечения остальных реакций пересчитаны на основе современных модельных параметров. Возможно, они являются более надежными, т.к. рекомендуемые ныне параметры основаны на более полном учете систематических знаний о нейтронных сечениях сходных ядер.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций. Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

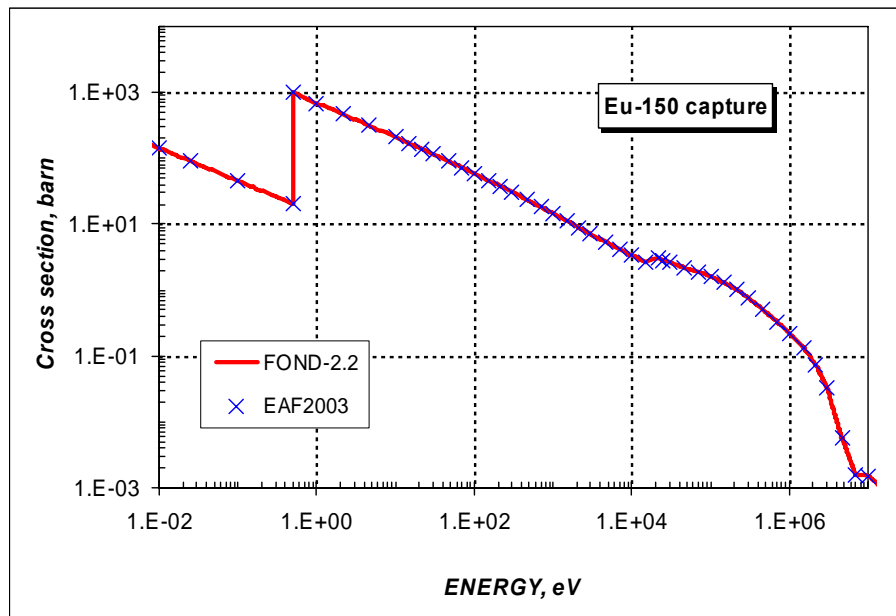


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-150.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (EAF-2003 = JEFF-3.1).

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 90.55 барна.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.Н.

63.7. Европий-151

Содержание в естественной смеси 47.8%.

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2 (~ENDF/B-V).

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabghab, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 1. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 1. Резонансные свойства Eu-151.

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	σ_γ (2200), барн	σ_γ (Maxw), барн	G-factor	I_γ , барн
ENDF/B	100.	100.	9 182.2	8 523.2	0.9390	3 291.5
JENDL	98.2	100.	9 164.5	8 098.0	0.8939	3 107.6
JEFF	98.2	10.0	9 163.4	8 095.9	0.8937	3 352.8
Mughabghab			9200±100		0.8940	3300±300

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что наилучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеет оценки ENDF/B. Отметим, что при этом для G-фактора из оценки ENDF/B наблюдается расхождение ~ 5% между оцененным и рекомендуемым значением Мухабхаба.

На рисунке 7 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что оценка ENDF/B не согласуется с экспериментом Виддера (1975) в тепловой области энергий ~0.1 эВ, что и явилось причиной различия в G-факторе от рекомендованного значения.

Возможно, что в новой оценке Мухабхаба (2005) для такого описания сечения радиационного захвата в тепловой области энергий имелись основания, но, в настоящее время, они нам не известны.

Отметим, что, во-первых, в области энергий 0.01 – 0.1 эВ форма кривой сечения у всех оценок отличается от экспериментальной кривой. Во-вторых, выше 1 эВ с экспериментальными данными расходятся все оценки.

В области энергий 1 – 10 эВ оценка JENDL и ENDF/B по-разному описывают некоторые резонансные уровни.

Выше 10 эВ наблюдается хорошее согласие между всеми оценками.

В целом, для Eu-151 в резонансной области энергий наблюдается хорошее согласие в оценке резонансного поглощения нейтронов.

В тепловой области энергий главной составляющей сечения полного взаимодействия является сечение радиационного захвата. Поэтому имеет прямой резон посмотреть на согласованность оцененных и экспериментальных данных по полному сечению в отмеченной области энергий. Такое сравнение показано на рисунке 8.

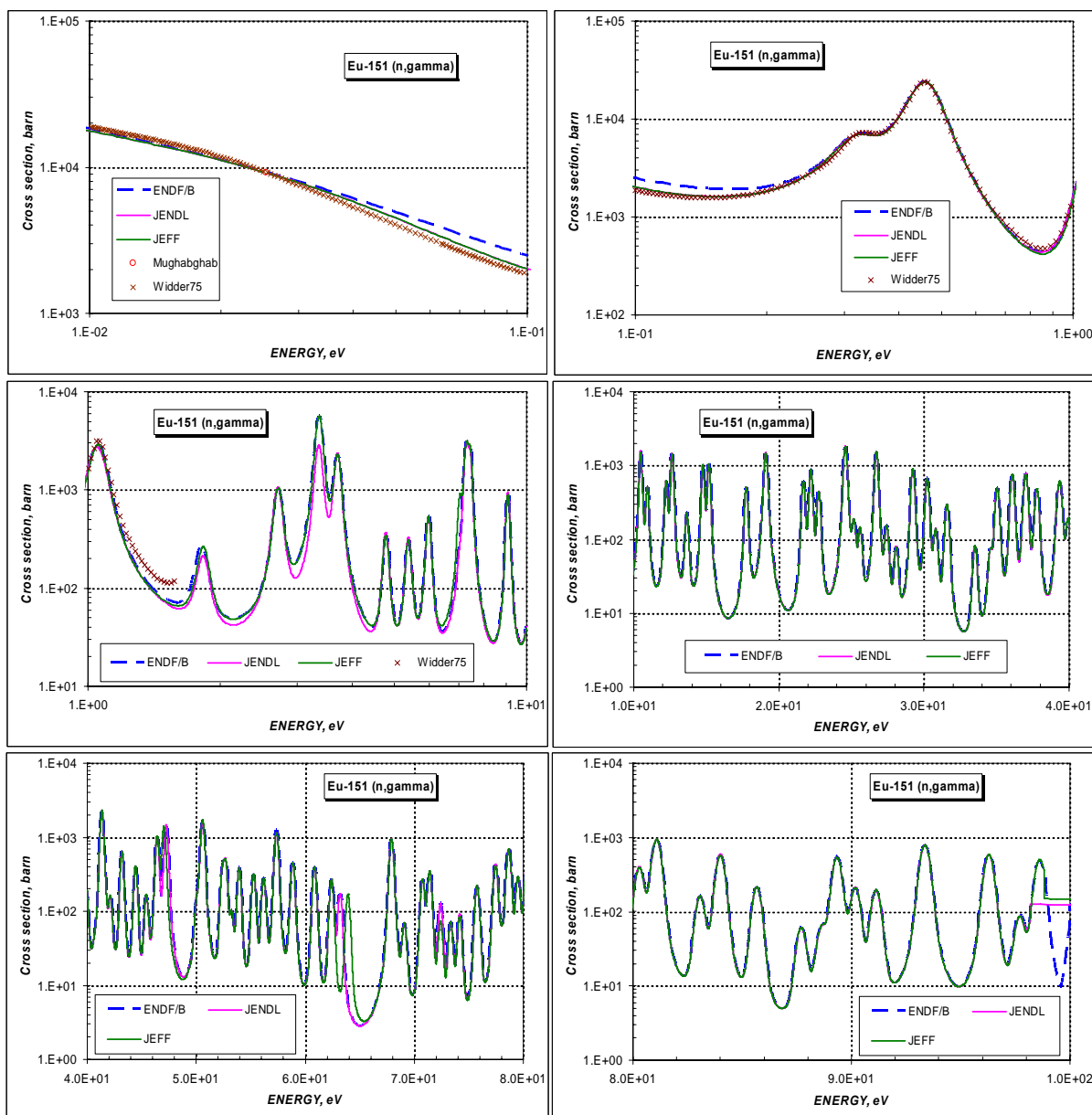


Рисунок 7 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-151 в резонансной области энергий.

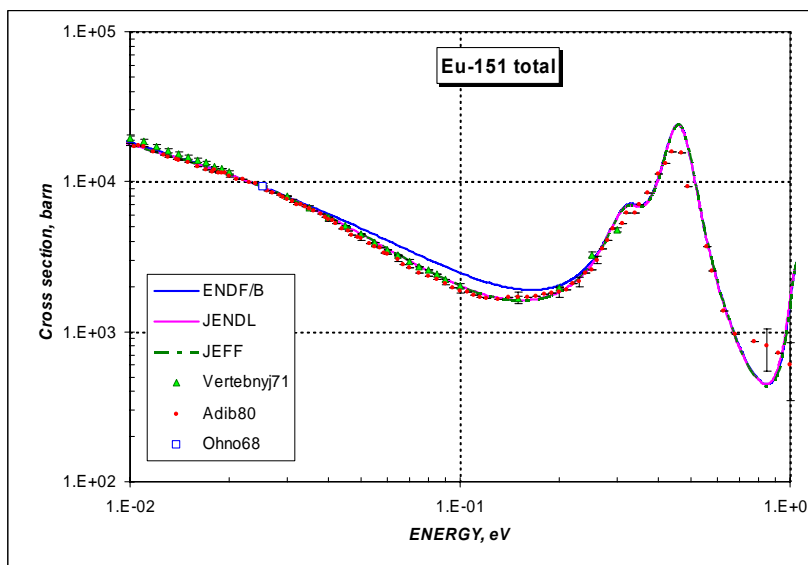


Рисунок 8 – Полное сечение Eu-151 в области энергий 0.01 – 1 эВ.

Из приведенного на рисунке 8 сравнения оцененных значений полного сечений с имеющимися экспериментальными данными видно, что поведение полного сечения в тепловой области, как и поведение сечения радиационного захвата, не подтверждает ход сечения из оценки ENDF/B. **В отсутствии дополнительной информации, которой, возможно, располагают, специалисты, готовившие оцененные данные для ENDF/B-VII, целесообразно внести коррективу в принятые в этой оценке параметры связанного состояния и первых двух резонансов, лежащих выше энергии связи нейтрона, заменив их на параметры из JEFF-3.1. В файле, включенном в РОСФОНД такая замена сделана, в результате чего, сечения при энергиях ниже 1эВ, следующие из этого файла, совпадают с таковыми из JEFF-3.1.**

На рисунке 9 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что до 300 кэВ оценки ENDF/B и JENDL согласуются друг с другом и ориентированы на воспроизведение экспериментальных данных Маклина (1987) и Боховко (1991). Оценка JEF в этой области энергий ориентирована на более старые экспериментальные данные Кзира (1970), Мицумото (1979) и Кононова (1977).

Выше 300 кэВ оценка JEF хорошо воспроизводит эксперимент Хокенбарри (1975), но плохо соответствует новым экспериментальным данным. Из двух оценок ENDF/B и JENDL, первая проходит по самому низу совокупности экспериментальных данных. В целом, обе оценки согласовано описывают имеющиеся новые экспериментальные данные в области энергий выше 100 эВ.

Заключение

РОСФОНД предлагается принять оценку Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabghab, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2) с заменой параметров трех первых резонансов.

Включить секцию 9/107 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях, используя данные EAF-2003.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

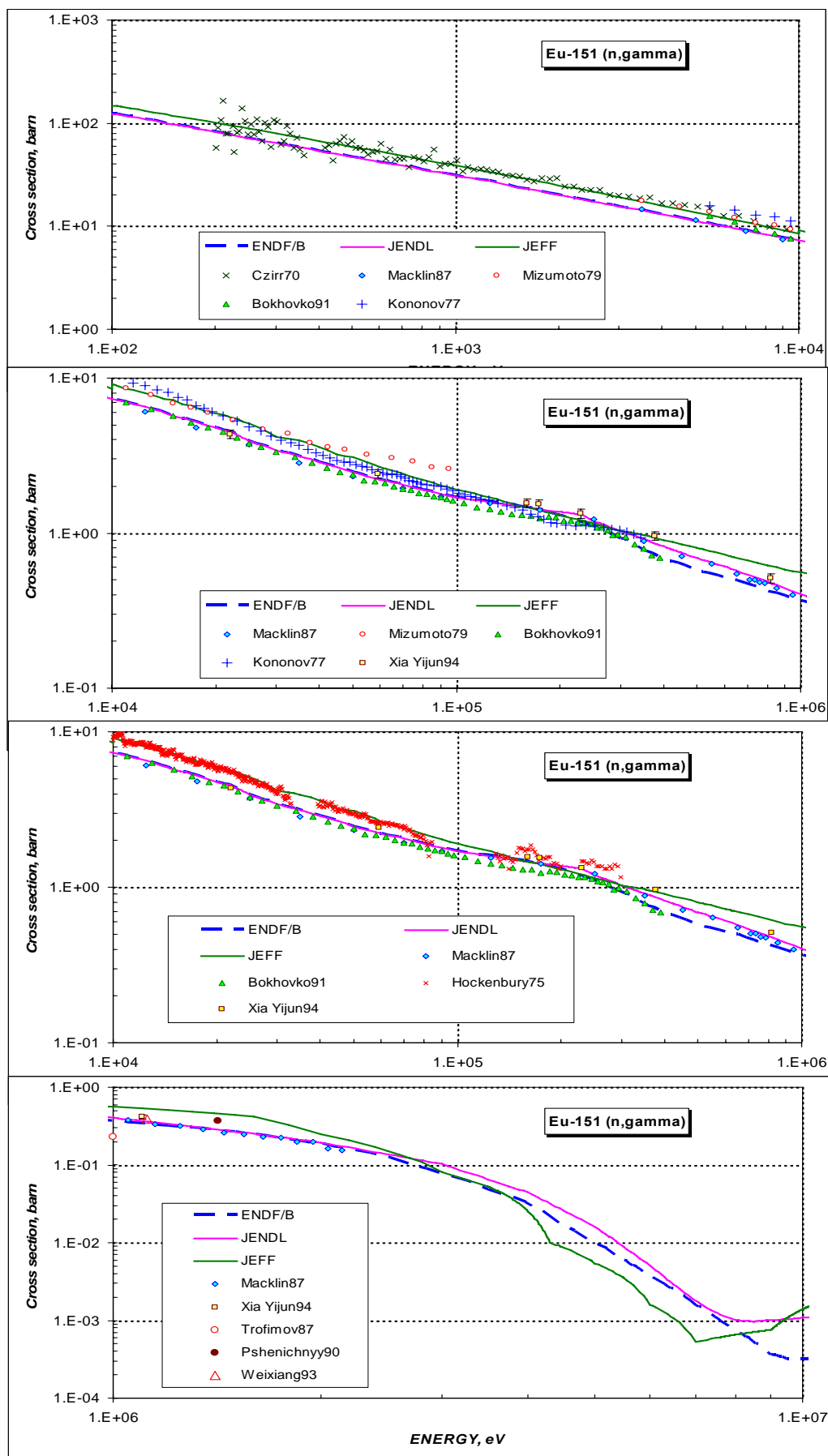


Рисунок 9 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-151 в области энергий выше 100 эВ.

63.8. Европий-152

Изотоп Eu-152 образуется путем выгорания стабильного изотопа Eu-151. Он имеет три изомерных состояния.

В основном состоянии - период полураспада $T_{1/2}=13.516$ лет. Из которого изотоп, с $\sim 70\%$ вероятностью испытывая β -распад превращается в стабильный изотоп Gd-150 (α -активный), и с $\sim 30\%$ вероятностью в результате позитронного распада превращается в Sm-152.

В первом изомерном состоянии - период полураспада составляет 9.31 часа. Цепочка распада аналогичная основному состоянию, с той лишь разницей, что поменялись местами вероятности процессов распада. Вероятность изомерного перехода ничтожно мала.

Во втором изомерном состоянии ($T_{1/2}=96$ мин.) испытывает изомерный переход в основное состояние с испусканием γ -кванта.

В ФОНД-2.2 – оценка J.Кореску, D.Nierop, 1992 (EAF-3).

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – оценка R.Wright и JNDC FPND W.G. (2005) для международной библиотеки продуктов деления. В области разрешенных резонансов (1.E-5 эВ – 62.07 эВ) использована оценка ENDF/B, выше – оценка JENDL-3.3.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 2. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 2. Резонансные свойства Eu-152.

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-factor	I_γ , барн
ENDF/B	62.	100.	12 792.	11 618.	0.9187	2 378.
JENDL	6.55	100.	12 747.	11 574.	0.9185	2 139.
FOND	-	-	2 310.3	2 075.5	0.8984	3 679.
Von Egidy			10 900 ± 1800			1 580.

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что и оценка ENDF/B и оценка JENDL согласуется с экспериментальным значением сечения захвата. Отметим, имеется сильное расхождение между рекомендованным Мухабхабом (BNL-325, 1981) значением резонансного интеграла и величинами, полученными на основе оцененных сечений. Из табличных данных видно также, что оценка, принятая в ФОНД, нуждается в пересмотре.

На рисунке 10 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что оценка ENDF/B существенно расширяет область разрешенных резонансов. При описании резонансов в районе 2 эВ оценка ENDF/B выше оценки JENDL, что и обуславливает небольшие расхождения в величине резонансного интеграла между этими оценками.

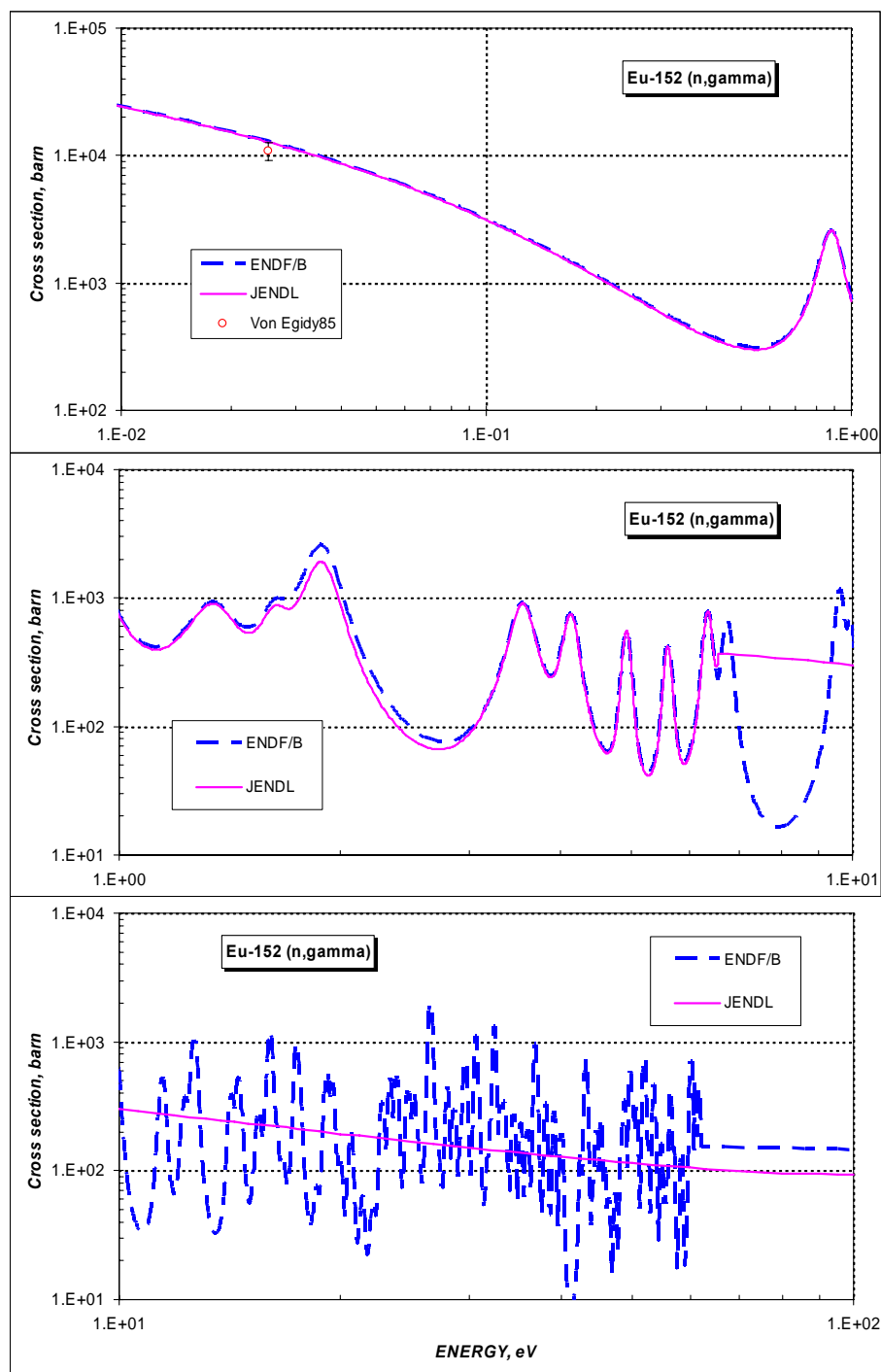


Рисунок 10 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-152 в резонансной области энергий.

На рисунке 11 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ. Экспериментальные данные отсутствуют.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что до 500 кэВ оценки ENDF/B и JENDL не согласуются друг с другом. Эта область является переходной для оценки ENDF/B с тем, чтобы состыковаться в дальнейшем с оценкой JENDL. В дальнейшем обе оценки идентичны.

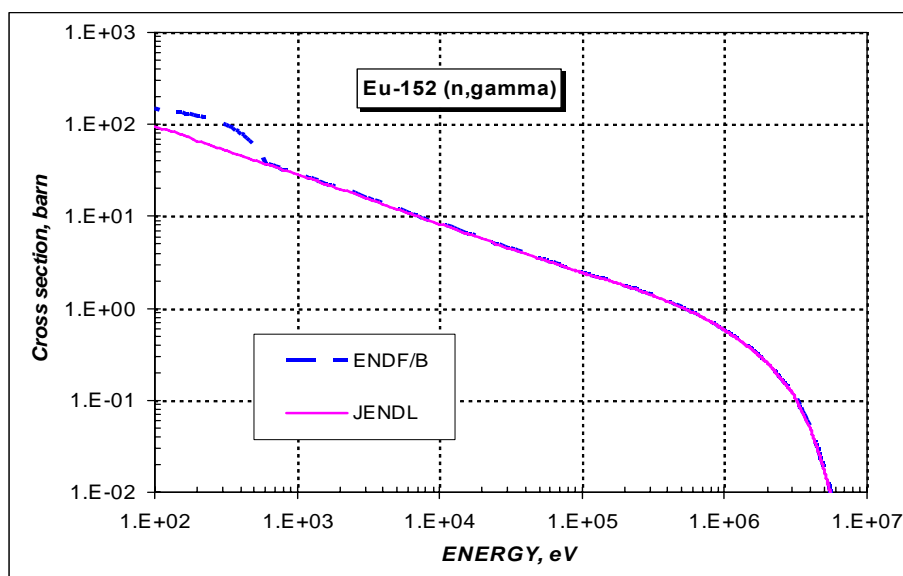


Рисунок 11 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-152 в области энергий выше 100 эВ.

Заключение

Учитывая тот факт, что в оценке данных для ENDF/B область разрешенных резонансов существенно расширена, в РОСФОНД предлагается принять оценку Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabghab, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2). Включить секцию 9/22 с вероятностями образования прометия-148 в основном и изомерном состояниях, используя данные EAF-2003.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

63.9. Европий-153

Содержание в естественной смеси 52.19%. Eu-153 – один из основных осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива достаточно велик от $\sim 182 \cdot 10^{-3}$ (U235) до $\sim 5.74 \cdot 10^{-3}$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой по рекомендации В.Н. Манохина модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В БРОНД-2.2 – оценка, выполненная А.Игнатьюком и И.Кравченко в 1985 году. В 1989 году резонансная область энергий пересмотрена Г.Мантуровым.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – новая оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabghab, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 3. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 3. Резонансные свойства Eu-153.

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	97.8	83.9	312.4	304.4	0.9858	1 428.
JENDL	97.2	100.	312.6	304.6	0.9858	1 411.
BROND	100.0	100.	312.5	304.6	0.9858	1 508.
Mughabg hab			312. \pm 7.		0.986	1 420. \pm 100.

Из приведенной в таблице 3 информации видно, все оценки хорошо согласуются с рекомендованным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба. Что касается резонансного интеграла, то лучше других оценок рекомендованное значение согласуется с ENDF/B, хотя все оцененные значения резонансного интеграла согласуются друг с другой и с рекомендацией Мухабхаба лучше, чем заявленная точность рекомендованного значения.

На рисунке 12 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в тепловой области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что все оценки и ENDF/B, и JENDL и БРОНД замечательным образом согласуются с рекомендованным значением Мухабхаба и не согласуется с экспериментом Виддера (1975) в тепловой области энергий. Если в случае с Eu-151 эксперимент Виддера находился ниже всей совокупности оцененных кривых, то на этот раз экспериментальные точки лежат значительно выше оцененных кривых. Конечно, этот факт не опровергает экспериментальные данные, но ставит под сомнение правильность определения результатов эксперимента.

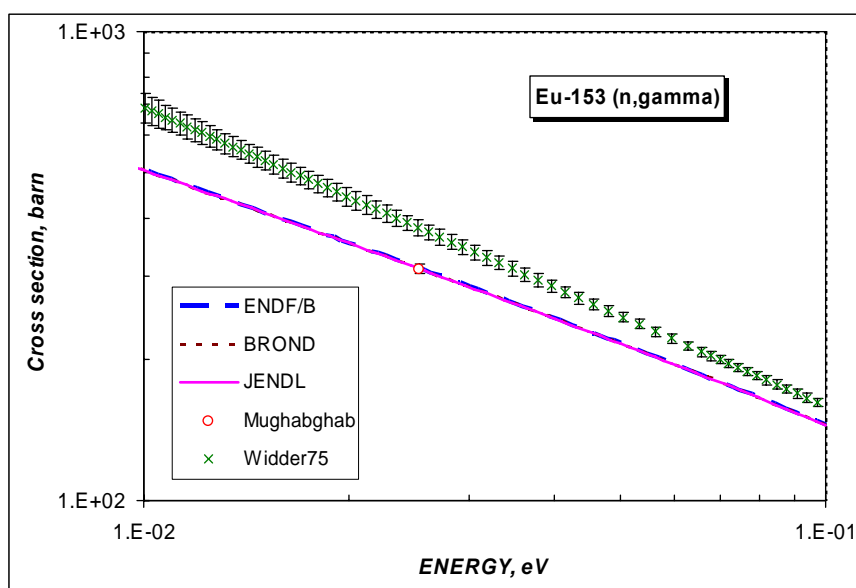


Рисунок 12 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-153 в тепловой области энергий.

На рисунке 13 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

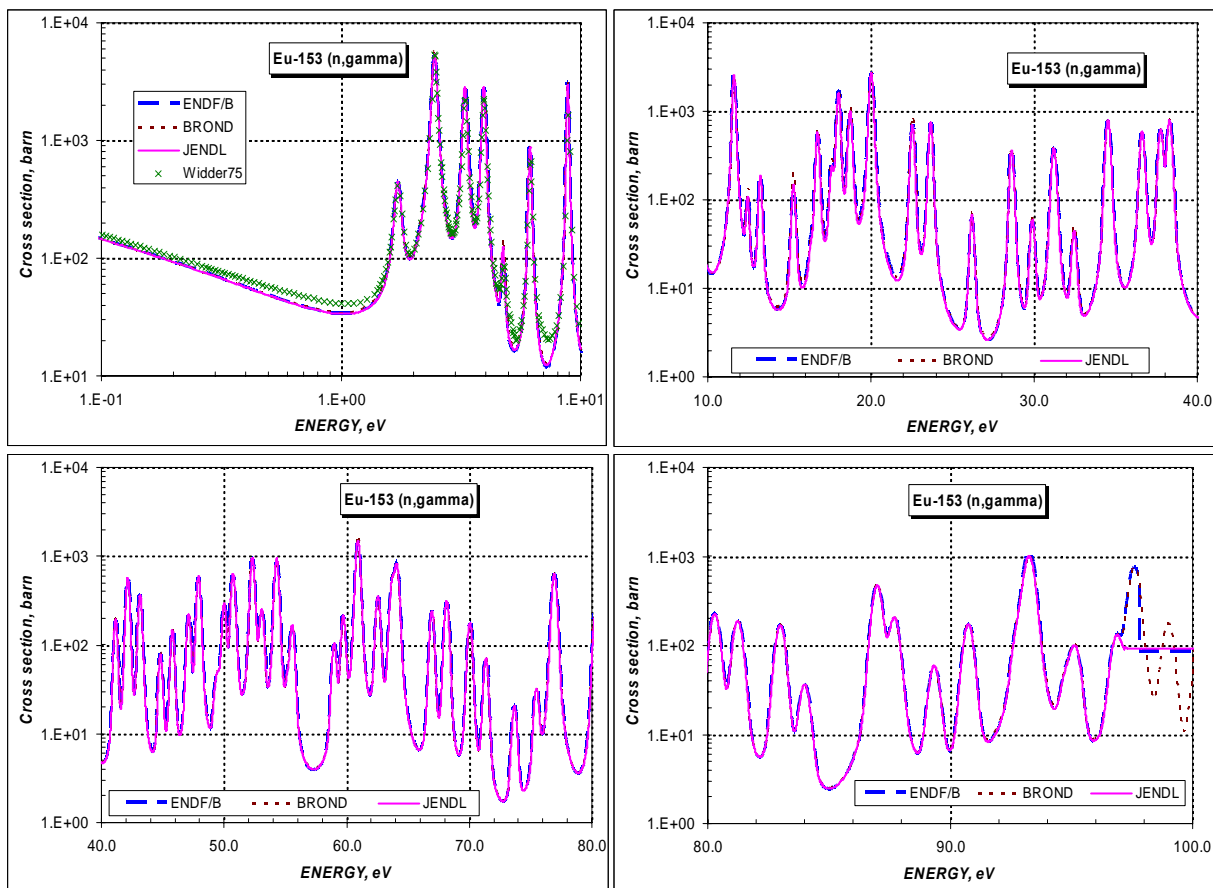


Рисунок 13 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-153 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что все оценки и ENDF/B, и JENDL и БРОНД согласовано описывают резонансное поглощение в области энергий до 100 эВ. При этом все оценки не согласуются с экспериментом Виддера (1975) в тепловой области энергий.

На рисунке 14 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ с имеющимися экспериментальными данными.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что в области энергий от 100 эВ до 1 кэВ оценки ENDF/B и БРОНД имеют “нерегулярную” форму сечения и отличаются от оценки JENDL. Это, вероятно, связано с интерполяцией параметров неразрешенных резонансов.

Выше 1 кэВ все оценки согласуются друг с другом и ориентированы на воспроизведение экспериментальных данных Конкса (1968), Маклина (1987), Боховко (1991), Вейхианга (1993) и Хиа Юджуна (1994).

Более старые экспериментальные данные Кзира (1970), Мицумото (1979), Кононова (1977), Хокенбарри (1975) и Моксона (1976) не согласуются с более

поздними экспериментальными данными. Совокупность “старых” данных приблизительно на 40 % находится выше совокупности “новых” данных.

В области энергий выше 3 МэВ оценки начинают различаться согласно результатам различным расчетным программам. Однако в этой области энергий и сами сечения становятся малыми.

Заключение

Учитывая, что

- в оценке данных для ENDF/B принимали участие Mughabghab et al.;
- оценка выполнена в 2005 году;
- оценка выполнена в рамках международной библиотеки для продуктов деления,

в РОСФОНД предлагается принять оценку ENDF/B-VII betha 1.2 версию.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

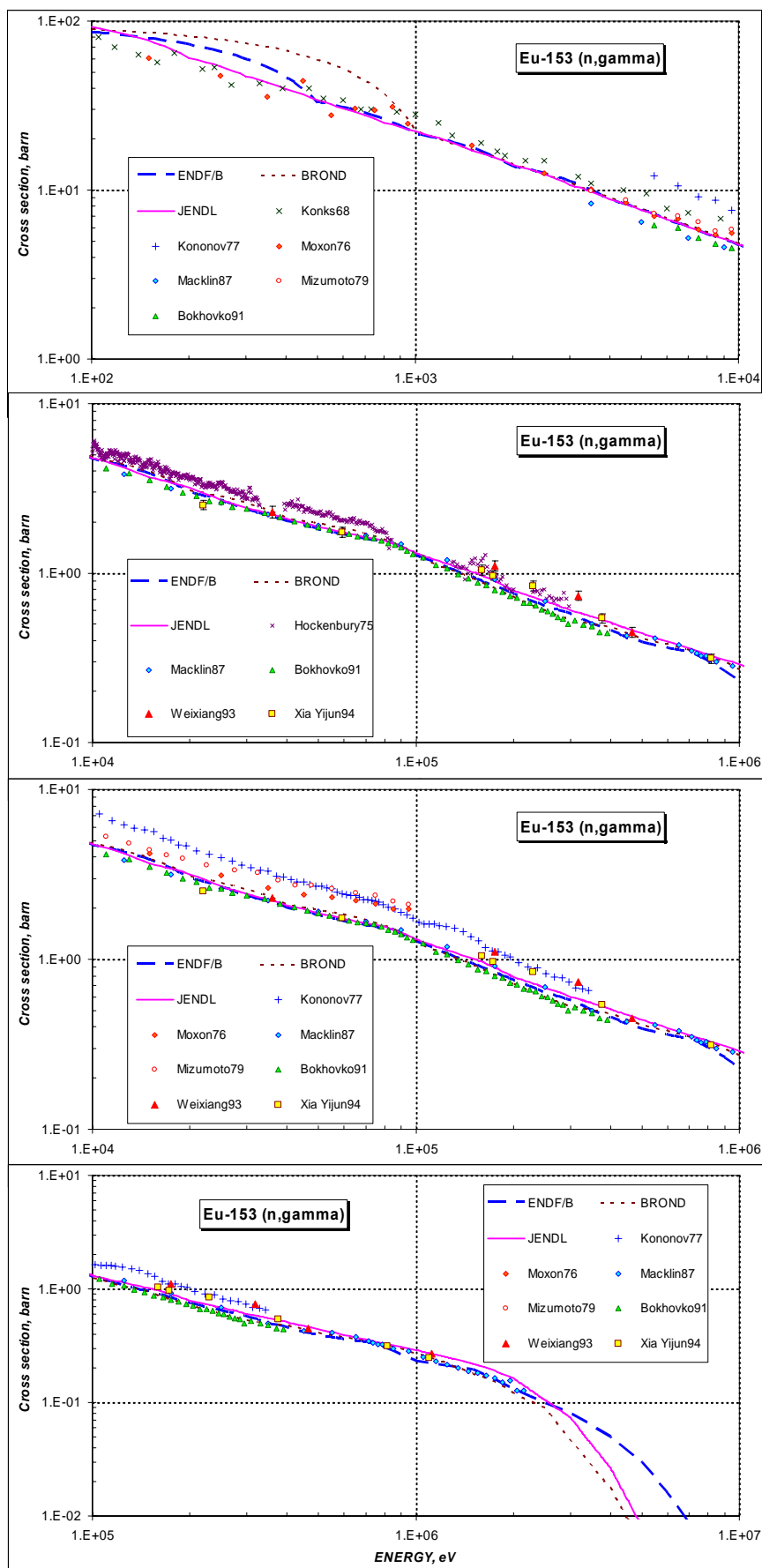


Рисунок 14 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-153 в области энергий выше 100 эВ.

63.10. Европий-154

Изотоп Eu-154 образуется путем выгорания стабильного изотопа Eu-153. Он имеет изомерное состояние.

В основном состоянии - период полураспада $T_{1/2}=8.592$ лет. Из которого изотоп, с $\sim 99.98\%$ вероятностью испытывая β -распад превращается в стабильный изотоп Gd-154. В изомерном состоянии ($T_{1/2}=46.3$ мин.) испытывает изомерный переход в основное состояние с испусканием γ -кванта.

Кроме того, Eu-154 является одним из осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива достаточно велик от $\sim 2.0E-4$ (U235) до $\sim 6.1E-4$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для ENDF/B-VI rel.7.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – оценка S.Mughabghab и JNDC FPND W.G. (2005) для международной библиотеки продуктов деления. В области разрешенных резонансов (1.E-5 эВ – 27.5 эВ) использована новая оценка Мухабхаба, выше – оценка CENDL-3.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 4. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 4. Резонансные свойства Eu-154.

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	27.5	100.	1 353.	1 663.	1.2441	1 317.
JENDL	26.2	100.	1 847.	2 212.	1.2116	1 194.
JEFF	63.0	10.0	1 845.	2 199.	1.2057	1 358.
Mughabghab			1 340. $\pm 130.$			1 600. $\pm 200.$

Из приведенной в таблице 4 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с рекомендованным значением сечения захвата. Оцененные значения из JEFF и JENDL не согласуются с рекомендованным значением сечения захвата в тепловой точке. Отметим также, что имеется расхождение между рекомендованным Мухабхабом (BNL-325, 1981) значением резонансного интеграла и величинами, полученными на основе оцененных сечений для всех оценок.

На рисунке 15 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 15 сравнения видно, что величина резонансного интеграла в оценке JEFF приближается к рекомендованному значению, вероятно, за счет описания резонансных минимумов. В настоящее время, отсутствует возможность сравнительного анализа резонансных параметров для первых резонансных уровней. Но после выхода новой компиляции Мухабхаба такой анализ был бы уместен.

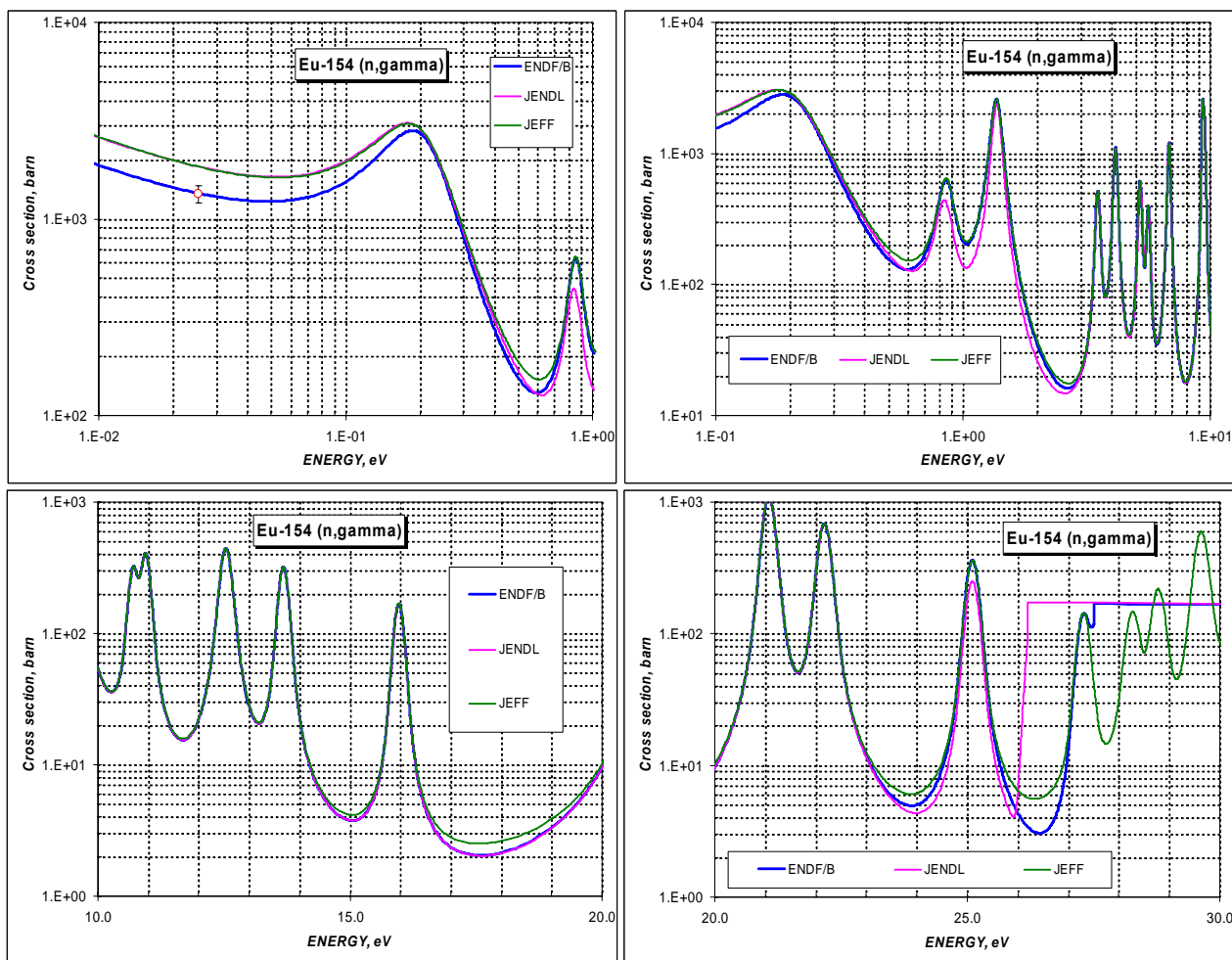


Рисунок 15 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-154 в резонансной области энергий.

На рисунке 16 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ. Экспериментальные данные в этой области энергии отсутствуют.

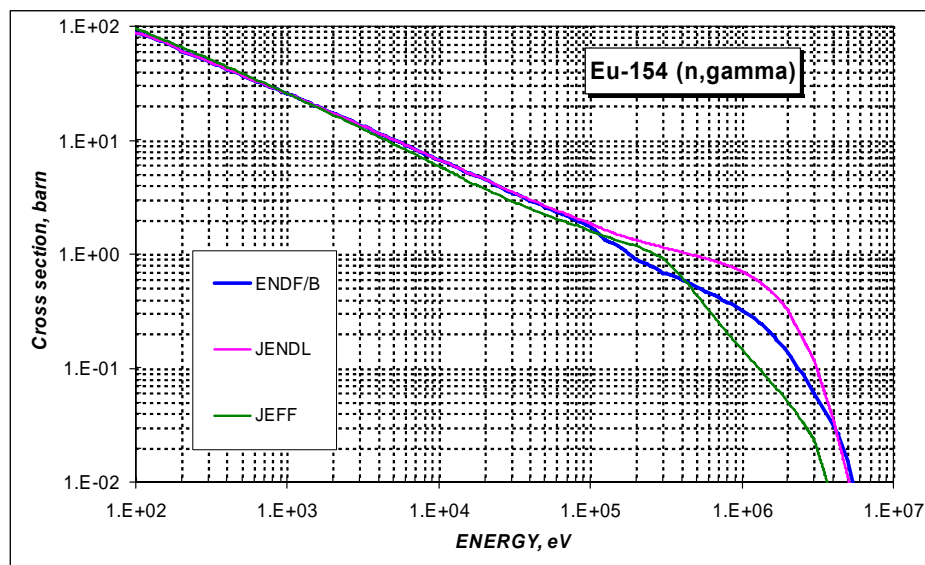


Рисунок 16 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-154 в области энергий выше 100 эВ.

Из приведенного на рисунке 16 сравнения видно, что в области энергий от 100 эВ до 100 кэВ все оценки согласуются друг с другом.

В области энергий выше 100 кэВ оценки начинают различаться согласно результатам различным расчетных программ. Однако в этой области энергий и сами сечения становятся малыми.

Заключение

Учитывая, что

- в оценке резонансных параметров для ENDF/B принимал участие Mughabghab et al.;
- эта оценка выполнена в 2005 году;
- выполнена в рамках международной библиотеки для продуктов деления,

в РОСФОНД предлагается принять оценку ENDF/B-VII betha 1.2 версию.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

63.11. Европий-155

Изотоп Eu-155 образуется путем выгорания радиоизотопа Eu-154, имеющего период полураспада $T_{1/2}=8.8$ лет. Период полураспада Eu-155 $T_{1/2}=4.761$ лет.

Кроме того, Eu-155 является одним из важнейших осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива достаточно велик от $\sim 3.4\text{E-}4$ (U-235) до $\sim 2.95\text{E-}3$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для ENDF/B-VI rel.7.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – международной рабочей группой рекомендована оценка CENDL-3, основу которой составляет откорректированная в области высоких энергий версия оценки JENDL-3.3.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 5. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 5. Резонансные свойства Eu-155.

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	29.7	100.	3 760.	3 802.	1.0229	15 531.
JENDL	29.7	100.	3 760.	3 802.	1.0229	15 531.
JEFF	37.5	10.0	3 757.	3 811.	1.0213	15 516.
Mughabg hab			3 950. $\pm 125.$			16 000. \pm

Из приведенной в таблице 5 информации видно, что все оценки согласуются с рекомендованным значением сечения захвата одинаково плохо. Отметим, что расхождения между рекомендованным Мухабхабом (BNL-325, 1981) значением резонансного интеграла и величинами, полученными на основе оцененных сечений, отсутствуют, вероятно, в силу большой погрешности рекомендованной величины резонансного интеграла.

На рисунке 17 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 17 сравнения видно, что величина резонансного интеграла в оценке JEFF приближается к рекомендованному значению, вероятно, за счет описания резонансных минимумов. В настоящее время, отсутствует возможность сравнительного анализа резонансных параметров для первых резонансных уровней. Но после выхода новой компиляции Мухабхаба такой анализ был бы уместен. Возможно, что в новой компиляции произошло уточнение значения резонансного интеграла.

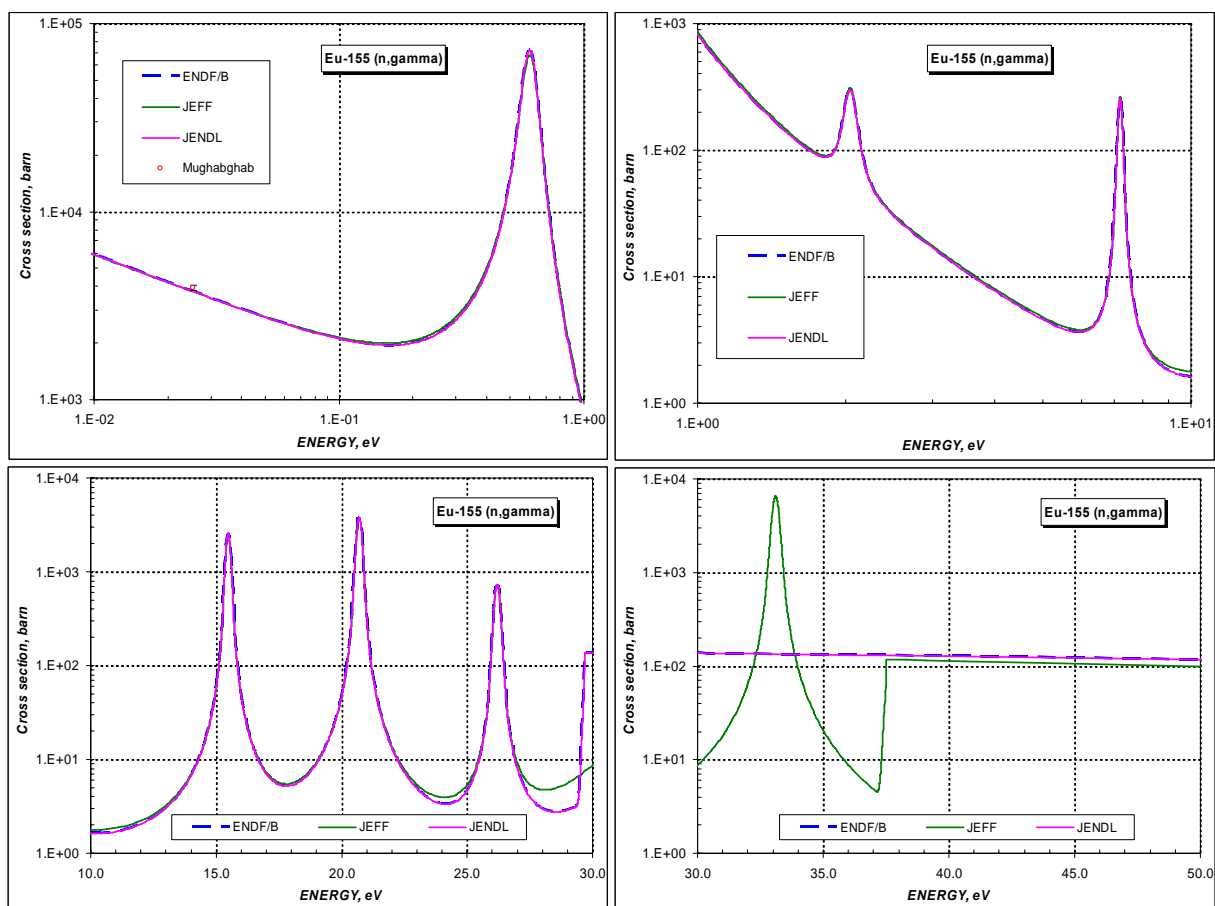


Рисунок 17 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-155 в резонансной области энергий.

На рисунке 18 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 100 эВ. Экспериментальные данные в этой области энергии отсутствуют.

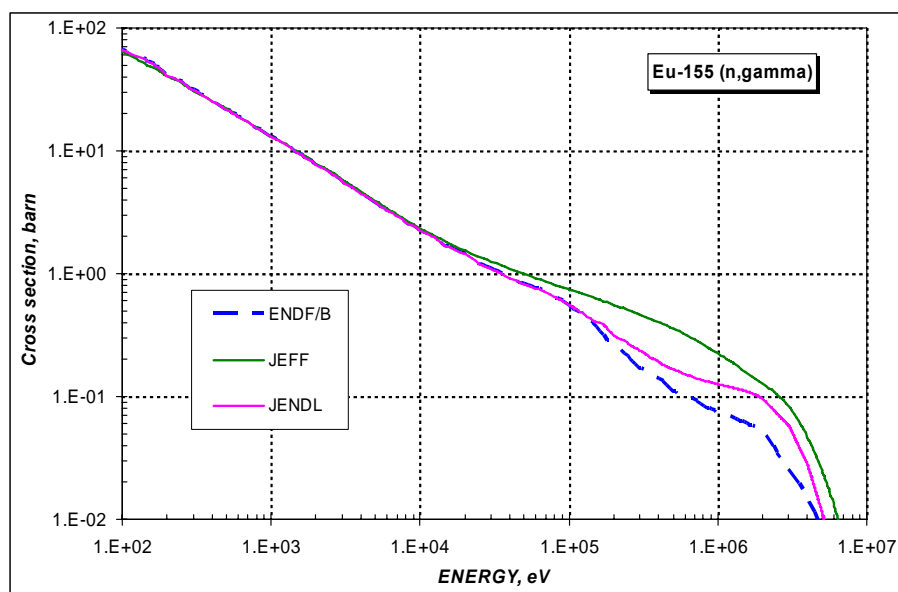


Рисунок 18 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-155 в области энергий выше 100 эВ.

Из приведенного на рисунке 18 сравнения видно, что в области энергий от 100 эВ до 10 кэВ все оценки согласуются друг с другом.

В области энергий выше 10 кэВ оценки начинают различаться согласно результатам вычислений по различным расчетным программам. Однако в этой области энергий и сами сечения становятся малыми.

Заключение

Учитывая, что

- все оценки сечения радиационного захвата хорошо согласуются друг с другом;
- оценка для ENDF/B выполнена в 2005 году;
- оценка выполнена в рамках международной библиотеки для продуктов деления,

в РОСФОНД предлагается принять оценку ENDF/B-VII betha 1.2 версию.

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

63.12. Европий-156

Изотоп Eu-156 образуется путем выгорания радиоизотопа Eu-155 $T_{1/2}=4.761$ лет. Период полураспада Eu-156 $T_{1/2}=15.19$ дней.

Кроме того, Eu-156 является одним из осколков деления при делении в быстром реакторе. Выход его при делении ядерного топлива от $\sim 2.0E-5$ (U-235) до $\sim 3.0E-4$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка, выполненная для JEF-2.2, в которой модифицировали сечения пороговых реакций, 1999.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2.

В JENDL-3.3 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 с незначительными изменениями, 1990.

В ENDF/B-VII b1.2 – международной рабочей группой рекомендована оценка JENDL-3.3, с незначительными изменениями, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 6. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 6. Резонансные свойства Eu-156.

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	-	1 эВ – 100	100.	98.9	1.0001	1 873.
JENDL	-	1 эВ – 100	100.	98.9	1.0001	1 873.
ФОНД-2.2	-	-	482.	477.	1.0005	1 492.
JEFF	-	-	482.	477.	1.0005	1 492.
Mughabghab						

Из приведенной в таблице 6 информации видно, что нет никакой ясности по поводу правильности сечения радиационного захвата для Eu-156. Имеется европейская оценка, в которой сечение в тепловой точке в 4 - 5 раз больше, чем в японской оценке, а значение резонансного интервала меньше на 20 - 25%.

На рисунке 19 приводится сравнение оцененных сечений радиационного захвата нейтронов в широкой области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 19 сравнения видно, насколько теоретические кривые сечения радиационного захвата различаются между собой.

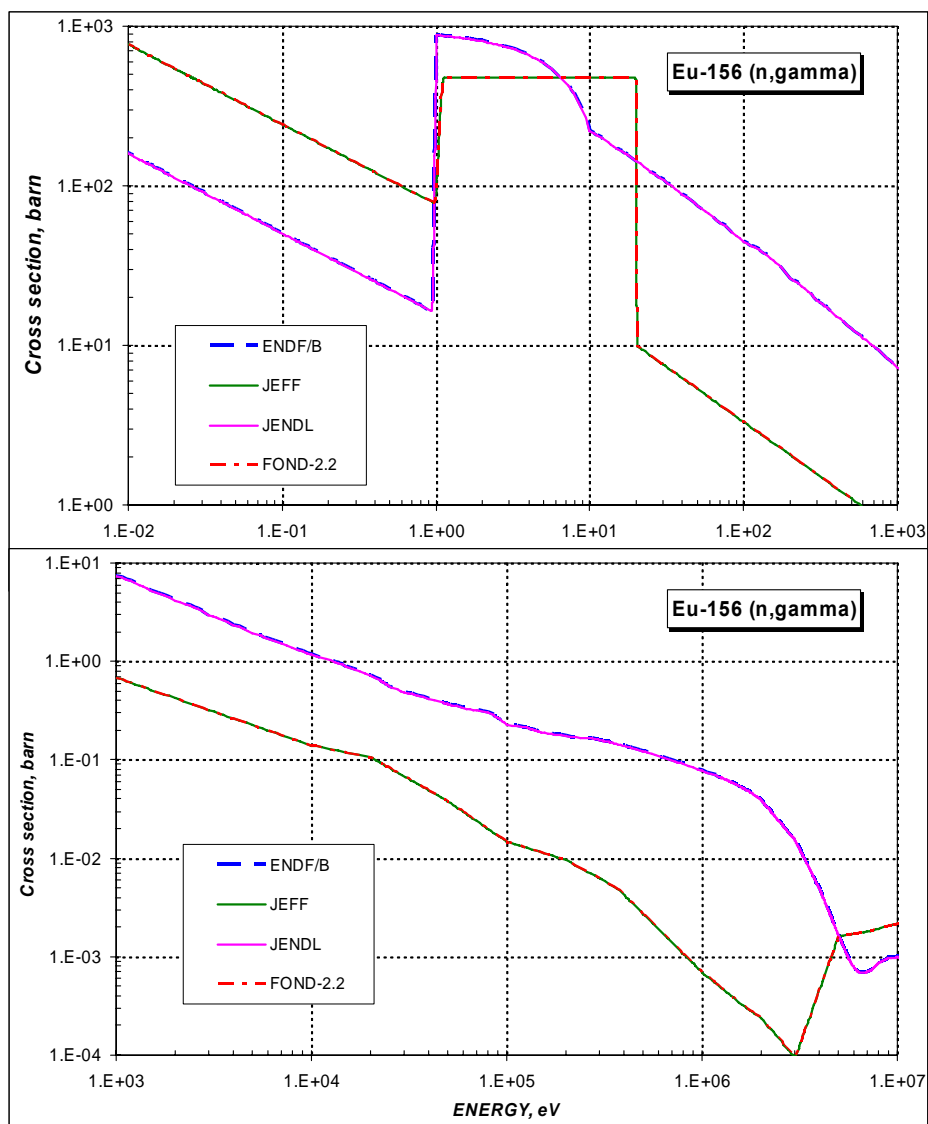


Рисунок 19 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Eu-156.

Заключение

Учитывая, что экспериментальных оснований для выбора оценки сечений европия-156 не имеется, для европия-156 (как и для более легких изотопов этого элемента) целесообразно принять в РОСФОНДе оценку международной группы, включенную в ENDF/B-VII.

Автор отбора данных

Кощеев В.Н.

63.13. Природный европий

В настоящем разделе приводятся результаты тестирования 299-групповых сечений, полученных на основании оцененных нейтронных данных стабильных изотопов из различных оценок. Мультигрупповые сечения для стабильных изотопов были получены с помощью программы переработки нейтронных данных NJOY. Затем с весом концентрации их в смеси, были получены мультигрупповые сечения для природного европия.

Сравнение проводилось только для тех типов сечения, для которых в международной базе экспериментальной информации EXFOR имелись какие либо наборы экспериментальных данных.

На рисунке 20 приведено общее сравнение оцененных сечений полного взаимодействия в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

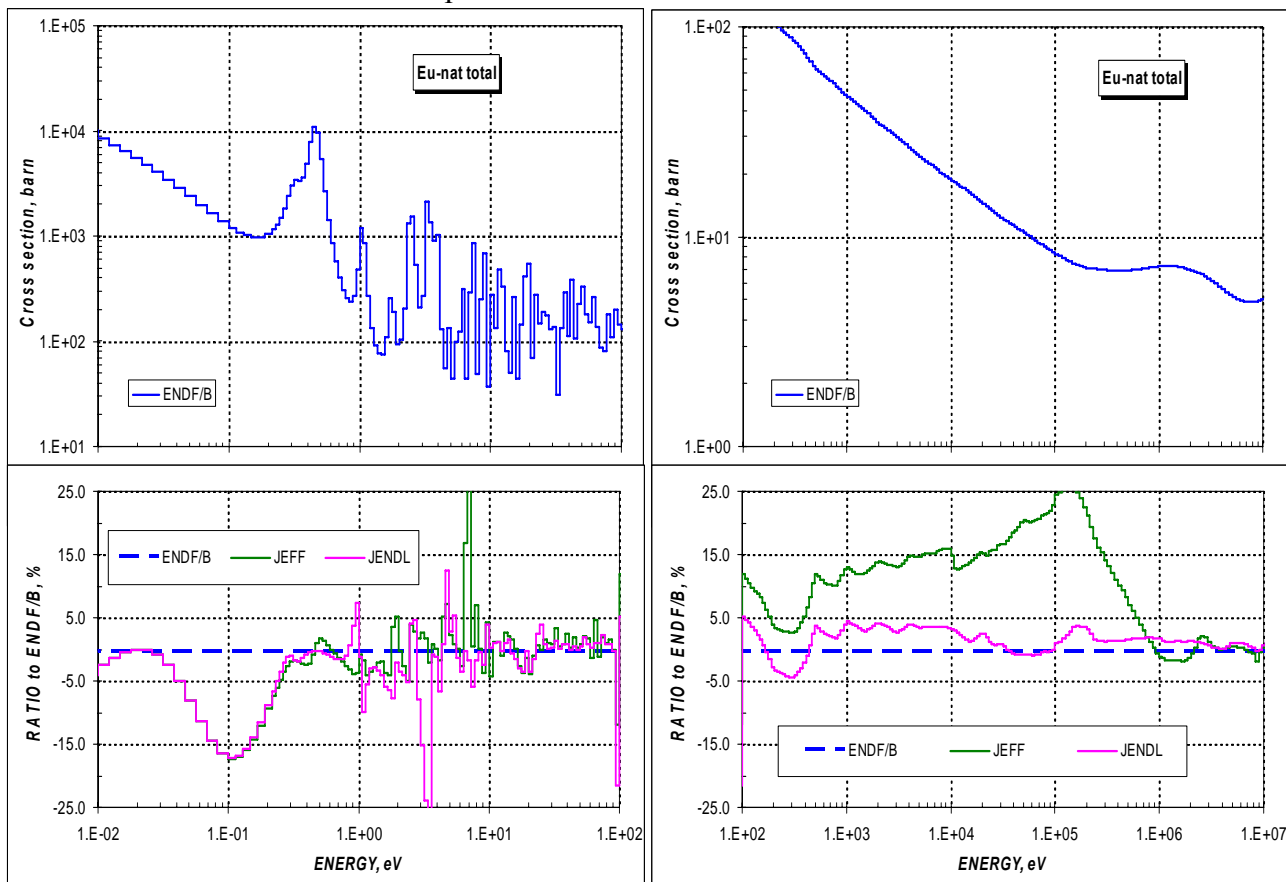


Рисунок 20 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений полного взаимодействия для Eu-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 20 информации видно, что полное сечение из оценки ENDF/B в интервале энергий от 0.03 до 0.3 эВ лежит выше остальных. Расхождение достигает 15 %. Это связано с отличием полного сечения для Eu-151 (см. раздел 63.7). Напомним, что в этой области энергий в РОСФОНД принята откорректированная оценка, совпадающая с JEFF-3.1.

В области энергий от 1 эВ до 200 эВ оценки, в целом, согласуются в пределах 5% с некоторыми “осцилляциями”, связанными с различным положением резонансных уровней. Выше 200 эВ оценки JENDL и ENDF/B согласуются между собой в пределах лучше, чем 5%, в то время, как оценка JEFF вплоть до энергии 1 МэВ отличается от остальных до 25 %. В области энергий выше 1 МэВ все оценки прекрасно согласуются между собой.

Сравнение оцененных сечений полного взаимодействия с имеющимися экспериментальными данными в области энергий до 1 эВ показано на рисунке 21.

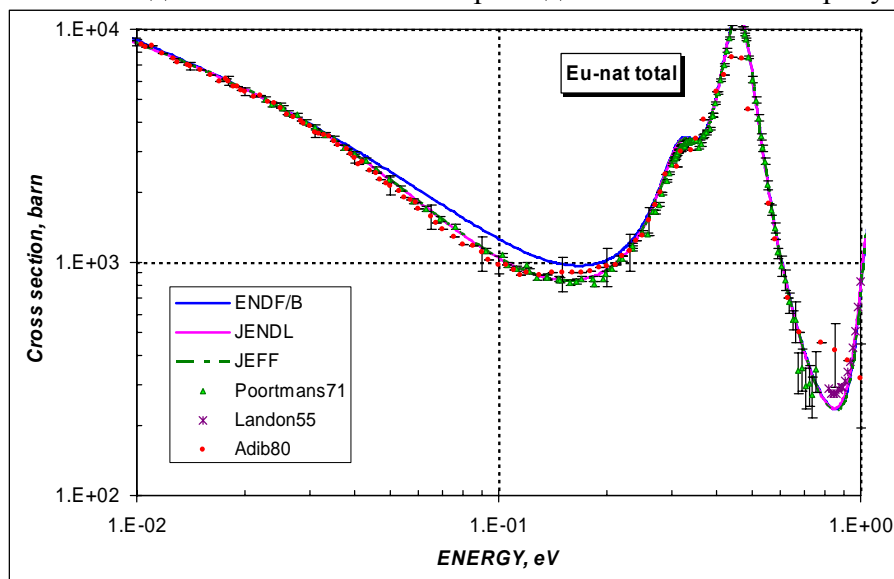


Рисунок 21 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения Gd-nat в области энергий 0.01 эВ – 1.0 эВ.

Из приведенного сравнения на рисунке 21 видно, что для оценки ENDF/B наблюдаются существенные расхождения от экспериментальных данных, в то время как, оценки JEF и JENDL согласуются со всей совокупностью экспериментальных данных. Это различие объясняется расхождением в полном сечении европия-151, отмеченном ранее.

Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными в области энергий от 100 эВ до 10 МэВ показано на рисунке 22.

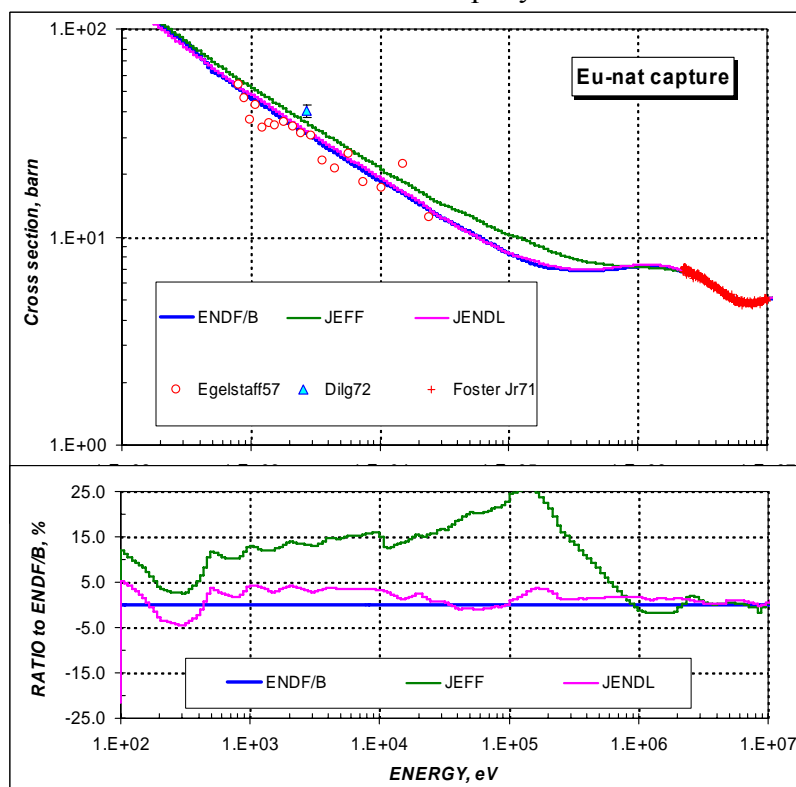


Рисунок 22 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения Gd-nat в области энергий 100. эВ – 10 МэВ.

Из приведенного сравнения на рисунке 22 видно, что прекрасное согласие оцененных сечений объясняется наличием детального эксперимента Фостера (1971). В области энергий ниже 1 МэВ экспериментальные данные не многочисленны и противоречивы. Экспериментальная точка Дилга (1972) не согласуется с экспериментальными данными Эгельстаффа, полученными еще в 1957 году.

Далее, было протестировано сечение захвата, полученное, путем свертки сечений с весом концентрации стабильных изотопов в природной смеси.

Для захвата были посчитаны значения сечения в тепловой точке и резонансный интеграл на основе рассмотренных выше значений для стабильных изотопов. Они сравнивались со значениями, рекомендованными в компиляции Мухабхаба. Сравнение приведено в таблице 9.

Таблица 7. Резонансные свойства Eu-nat.

Оценка	$\sigma_{\gamma}(2200)$, барн	I_{γ} , барн
ENDF/B	4 553.	2 319.
JENDL	4 545.	2 222.
JEFF	4 544.	2 339.
<i>Mughabgha</i> <i>b</i>	4 565. \pm 100.	2 320. \pm 150.

Из приведенной в таблице 7 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с рекомендуемыми значениями Мухабхаба. В то же время, и остальные оцененные значения согласуются с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной точности.

На рисунке 23 представлено сравнение оцененных сечений в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

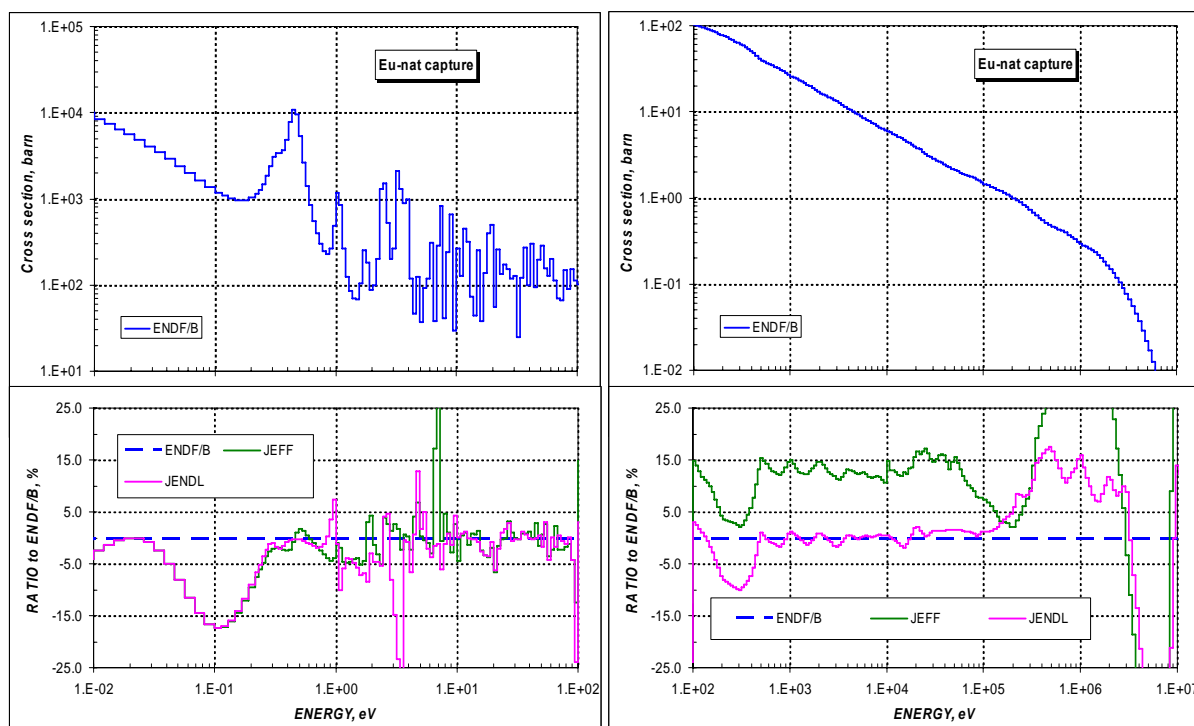


Рисунок 23 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений захвата для Eu-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 23 информации видно, что сечение захвата из оценки ENDF/B в интервале энергий от 0.03 до 0.3 эВ лежит выше остальных. Расхождение достигает более 15 %. Это связано с отличием сечения захвата для Eu-151 (см. раздел 63.7). В области энергий от 1 эВ до 200 эВ оценки, в целом, согласуются в пределах 5% с некоторыми “осцилляциями”, связанными с различным положением резонансных уровней. В области энергий от 200 эВ до 100 кэВ оценки JENDL и ENDF/B согласуются между собой в пределах 5%, в то время, как оценка JEFF во всей области энергий отличается от остальных. Различия достигают в среднем 15%. В области энергий выше 200 кэВ все оценки наблюдаемое расхождение сечений объясняется различиями в используемой теоретической расчетной модели сечений.

Экспериментальных данных по сечению захвата в области низких энергий нет. Об “истинности” оцененных сечений захвата можно судить по ситуации в этой области энергий с оценкой полного сечения. Как было видно выше, оценка ENDF/B не согласуется с экспериментальными данными в области энергий от 0.02 – 0.2 эВ.

Сравнение оцененных сечений захвата с имеющимися экспериментальными данными в области энергий выше 100 эВ показано на рисунке 24.

В области энергий от 100 эВ до 10 кэВ оценки ENDF/B и JENDL лежат на 10 - 15% ниже всех экспериментальных данных и оценки JEFF. Рассогласованность вызвана тем, что принятая в РОСФОНД оценка данных для Eu-151 опирается на эксперименты Моксона (1987) и Боховко (1991), экстраполяция которых на область несколько более низких энергий и ведет к отмеченному противоречию. Пересмотр принятых для Eu-151 данных не представляется целесообразным, т.к. погрешность сечения захвата в килоэлектронвольтовой области едва-ли ниже 20%.

В области энергий от 10 кэВ до 100 кэВ оценки JENDL и ENDF/B согласованно в пределах 5% описывают наилучшим образом экспериментальные данные. Выше 100 кэВ наблюдается расхождение всех оценок с экспериментом Боховко (1991), данные которого лежат в основе оценки сечения захвата для Eu-151 и Eu-153.

В области энергий выше 100 МэВ оценки ENDF/B и JENDL в пределах неопределенности ~20% согласованно описывают имеющиеся в этой области энергий экспериментальные данные. Оценка JEFF в этой области несколько завышена.

К сожалению, никакой другой экспериментальной информации найти не удалось. Поэтому в отсутствии экспериментальных данных мы не стали проводить сравнение оцененных сечений для других процессов.

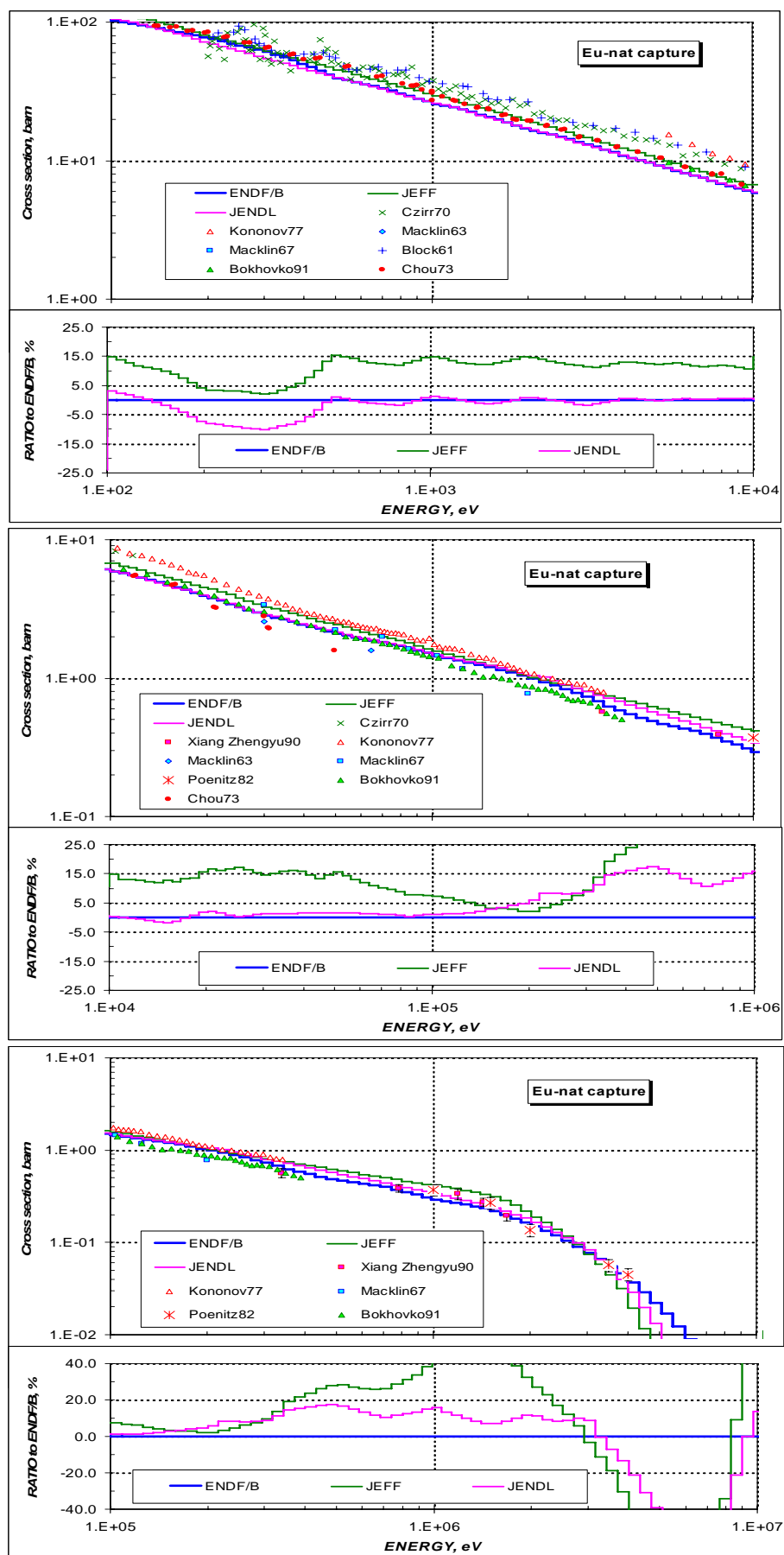


Рисунок 24 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения захвата Gd-nat в области энергий 100. эВ – 10 МэВ.

Заключение

Принятые в РОСФОНД оцененные данные для изотопов европия, в целом подтверждаются имеющимися экспериментальными данными для природного европия. Сомнение вызывает лишь поведение сечения захвата в интервале 1-10 кэВ. Возможно, что оно занижено процентов на 10-15 (главным образом, из-за сравнительно низкого сечения захвата, принятого в этой области для европия-151). Надежных экспериментальных данных, позволяющих разрешить это противоречие, в настоящее время в нашем распоряжении не имеется.

Автор заключения – В.Н.Кошечев.