

64. ГАДОЛИНИЙ

64.0 Общие замечания

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 12-ти стабильных и долгоживущих изотопов гадолиния. Данные для всех этих изотопов содержатся в библиотеке ФОНД-2.2. Однако, как будет видно ниже, нейтронные данные для всех изотопов целесообразно заменить на более современные и полные оценки, выполненные в последние годы. Рассмотрим результаты деятельности по переоценке данных для изотопов гадолиния, 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).

Радиоактивные изотопы.

Ни для одного из 4-х долгоживущих изотопов диспрозия – ^{148}Gd , ^{149}Gd , ^{150}Gd и ^{151}Gd – авторы библиотеки EAF в версии EAF-2003 данные по радиационному захвату нейтронов не пересматривали, т.е. они сохранились такими же, как в ФОНД-2.2.

Отдельно следует отметить долгоживущий изотоп ^{153}Gd , нейтронные данные для которого в полном объеме имелись только в библиотеке ENDF/B-VII (beta 1.2 version).

Стабильные изотопы.

Данные для стабильных изотопов гадолиния в библиотеке ФОНД-2.2 были взяты из библиотеки БРОНД-2.2. Авторы: Блохин А.И. и Беланова Т.С.

В библиотеке JEF-3.1 для Gd-152, Gd-155 и Gd-157 используется оценка, выполненная для японской библиотеки нейтронных данных JENDL-3.2. Для Gd-154, Gd-158 и Gd-160 – оценка, выполненная для ENDF/B-IV. Для Gd-156 – оценка, выполненная для JEF-2.2 (INEA/CEA).

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) и Обложинский (P. Oblozinsky, BNL), Рохман (D.Rochman, BNL) и Херман (M.Herman, BNL) - область более высоких энергий. Будучи самыми последними по времени и по методике оценки эти данные, несомненно, являются более надежными, чем прежние оценки, принятые в ФОНД-2.2.

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

64.1. Гадолиний-148

Альфа-активен. $^{148}\text{Gd}(T_{1/2}=74.6 \text{ г}) \rightarrow ^{144}\text{Sm}$ (стабильный).

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

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Корецкы, 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.

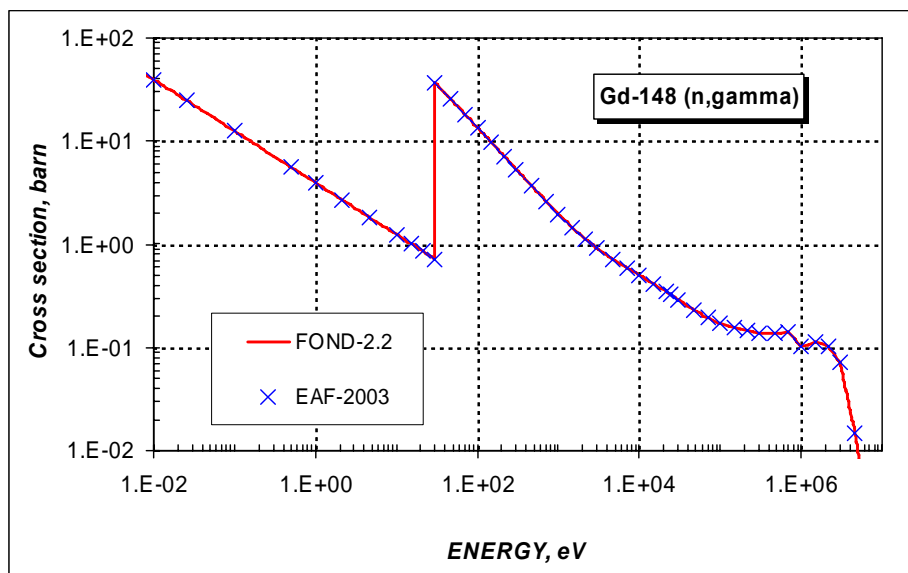


Рисунок 1 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-148.

Заключение

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

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 24.83 барна.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

64.2. Гадолиний-149

Испытывает с позитронный распад: $^{149}\text{Gd}(T_{1/2}=9.28 \text{ дн}) \rightarrow ^{149}\text{Eu}(T_{1/2}=93.1 \text{ дн}) \rightarrow ^{149}\text{Sm}(\text{стабильный})$.

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

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

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.

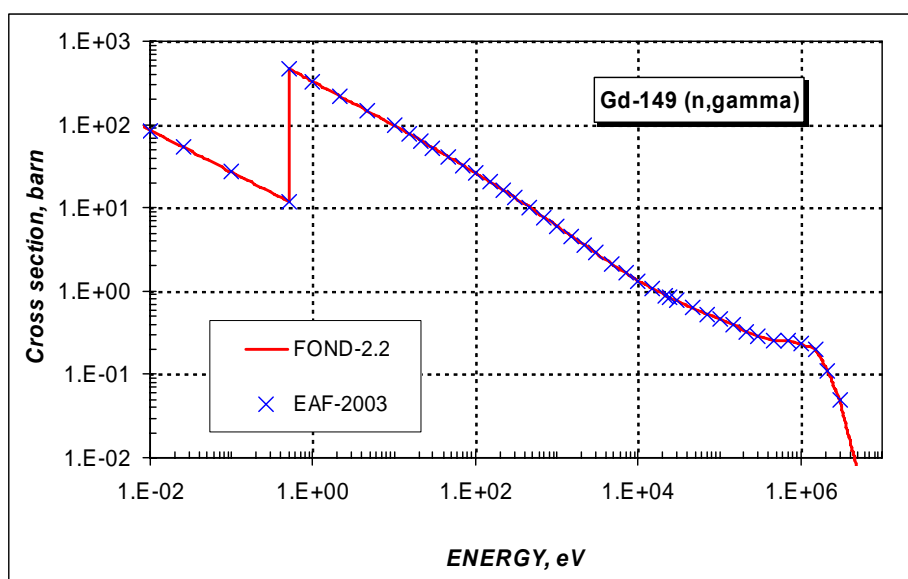


Рисунок 2 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-149.

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 не изменилось: оно равно 53.42 барна.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

64.3. Гадолиний-150

Альфа-активен. $^{150}\text{Gd}(T_{1/2}=1.79\text{E}^6 \text{ г}) \rightarrow ^{146}\text{Sm}(T_{1/2}=1.03\text{E}^7 \text{ г}) \rightarrow ^{142}\text{Nd}$ (стабильный).

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

В JEFF-3.1 (Activation)=EAF-2003 – оценка Forrest, Кореcky, 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.

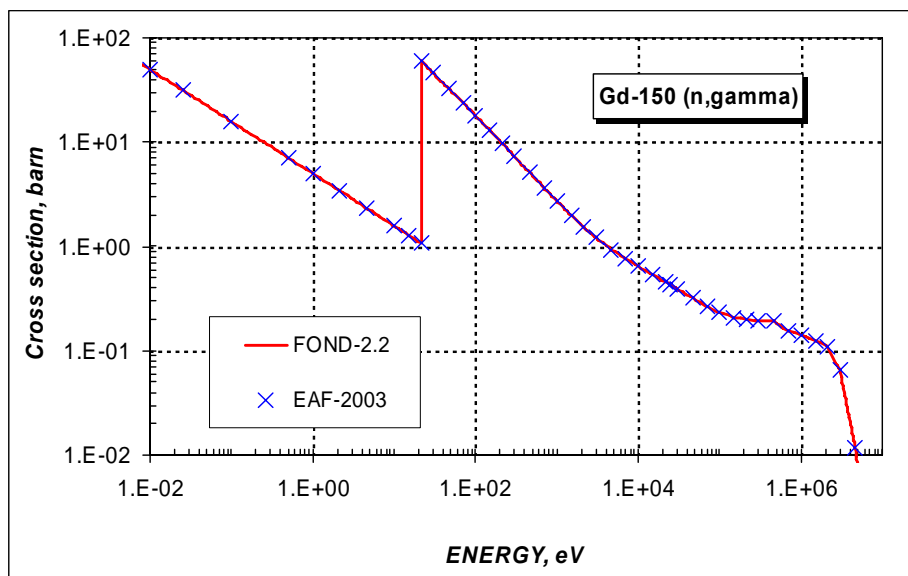


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-150.

Заключение

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

Файлы MF=8 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов при пересмотре не изменилось: оно равно 31.38 барна.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.Н.

64.4. Гадолиний-151

Испытывает позитронный распад в ^{151}Eu (стабильный) с периодом $T_{1/2}=124$ дн.

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

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

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.

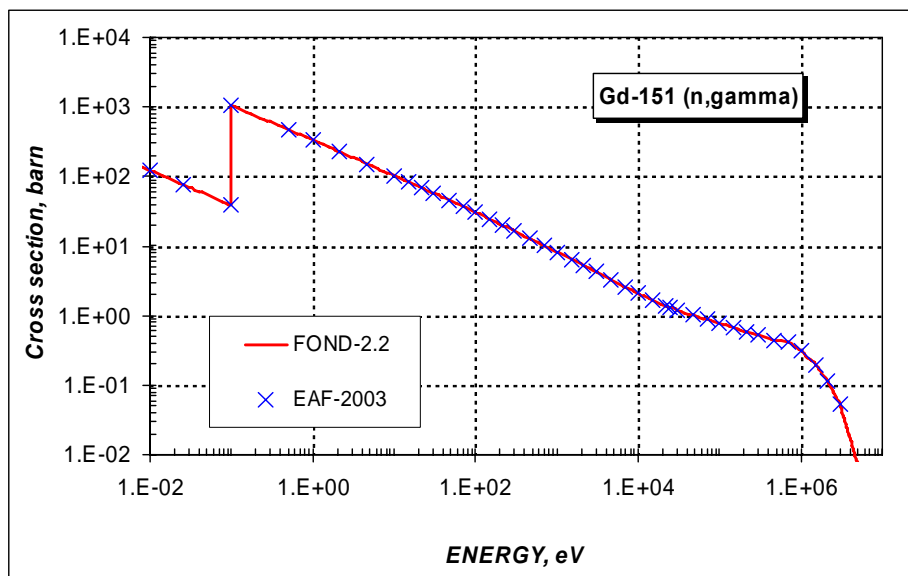


Рисунок 4 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-151.

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 76.45 барна.

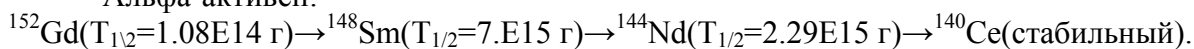
Автор отбора данных

Кошечев В.Н.Н.

64.5. Гадолиний-152

Содержание в естественной смеси 0.20%.

Альфа-активен:



В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2 без изменений, 1990.

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, Mughabgh, 2005.

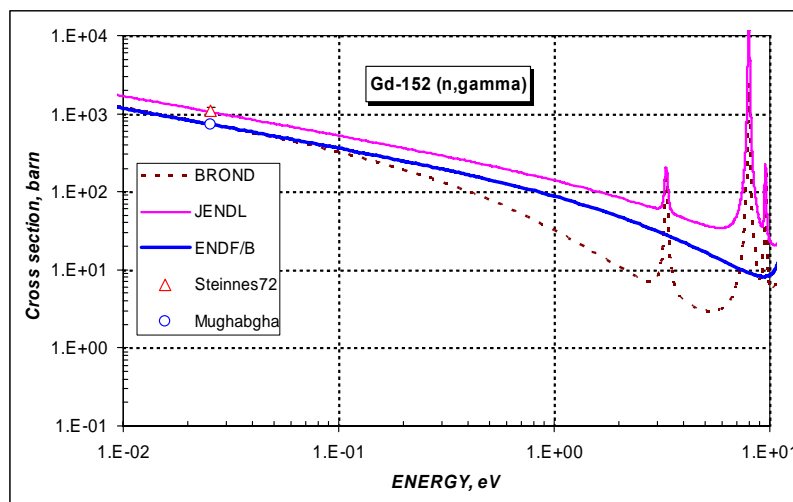
Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 1. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 1. Резонансные свойства Gd-152

Оценка	Граница области RRR, keV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(\text{Maxw})$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	2.6	50.0	735.0	723.6	0.9959	559.4
JENDL	2.66	100.0	1055.8	1041.1	0.9975	987.7
JEFF	2.66	100.0	1055.8	1041.1	0.9975	987.7
BROND	0.234	-	736.8	711.6	0.9771	505.6
Mughabghab (2003)			735±20			2020±160

Из приведенной в таблице 1 информации видно, что наилучшее согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба¹ имеет оценки ENDF/B и БРОНД. Отметим, что наблюдается существенное расхождение между оцененными значениями резонансного интеграла I_γ и значением, рекомендуемым Мухабхабом. Следует, однако отметить, что Мухабхаб отмечает большое различие между измеренным резонансным интегралом и вычисленным по резонансным параметрам.

На рисунке 5 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области энергий с имеющимися экспериментальными данными.



¹ Оценка Мухабхаба основана на результатах усреднения двух измерений резонансного интеграла – Neft-78 (2020±80 барн) и Steinnes-72 (3000±300 барн). Других прямых экспериментальных не имеется.

Рисунок 5 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в тепловой области.

Видно, что оценки BROND и ENDF ориентируются на значение сечения захвата, рекомендуемое Мухабхабом, в то время, как оценка JENDL ориентируется на эксперимент Стейнса(1972).

В оценке ENDF/B существенно изменены параметры связанного состояния (оно сдвинуто с -10 эВ на -6.12 эВ, но его нейтронная ширина сокращена втрое, а радиационная в 14 раз). Первых три резонанса, параметры которых приведены в компиляции Мухабхаба (BNL-325, 3-е издание, 1984), в новой оценке, выполненной с его участием, отсутствуют; в том числе довольно сильный резонанс при 8 эВ, который, вероятно, отнесен, к влиянию примеси Самария-152 в образце. Отбрасывание резонансов, естественно, привело к резкому снижению резонансного интеграла. Отметим, к тому же, что в БРОНД сечение восстанавливается с помощью формализма Райха-Мура, а в ENDF/B используется многоуровневая формула Брейта-Вигнера. Всё это и объясняет различие в форме резонансов как на рисунке 6, так и в дальнейшем.

На рисунке 6 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 1 кэВ.

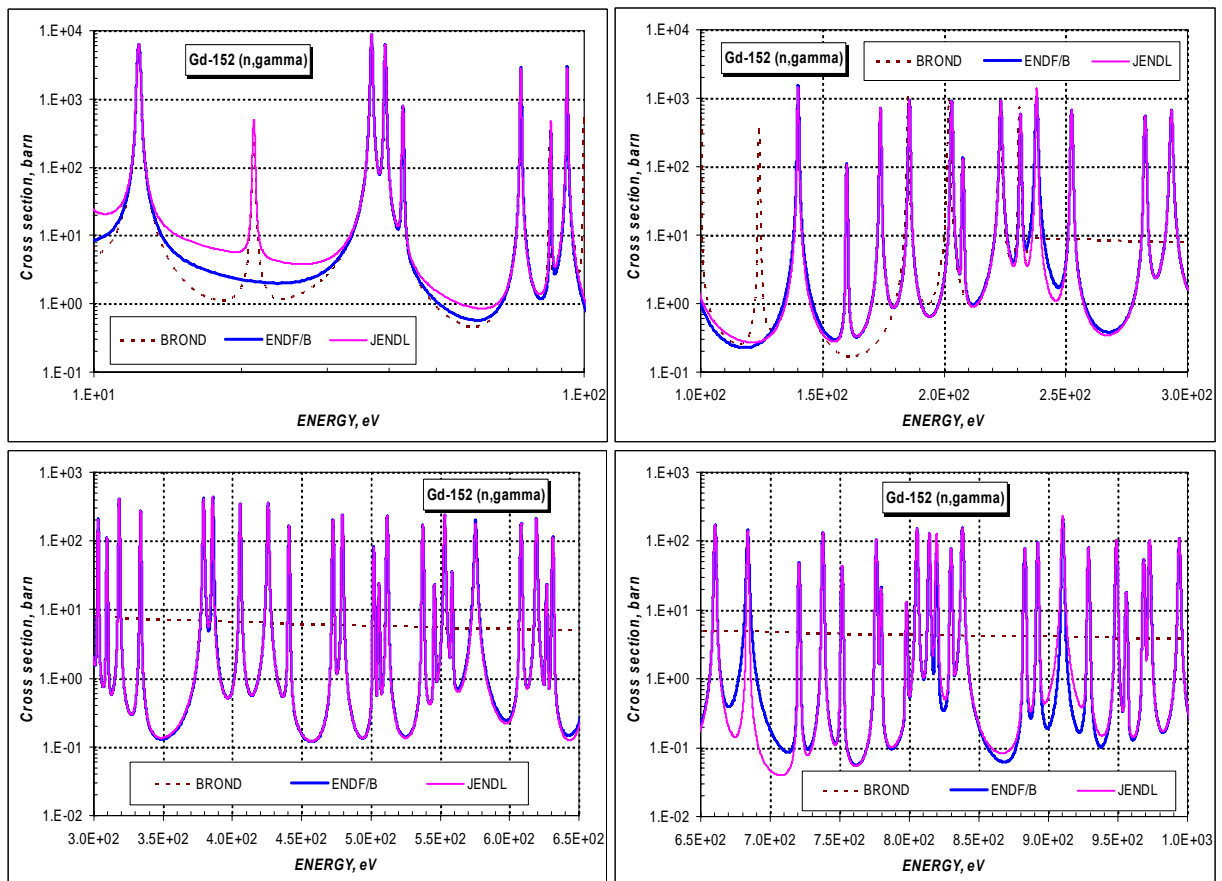


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в резонансной области энергий от 10 эВ до 1 кэВ.

Из приведенного на рисунке 6 сравнения видно, что в оценке ENDF/B имеются пропуски резонансов, которые наблюдаются в других оценках. В тоже время, как в оценке БРОНД наблюдаются резонансы, которых нет в других оценках и пропущены резонансы, присутствующие в других оценка. Учитывая тот факт, что резонансный интеграл I_γ из оценки JENDL лучше согласуется с рекомендуемым значением Мухабхаба, можно предположить, что оценка JENDL лучше других описывает начальную область резонансных энергий. Заметим что, практически невозможно даже для этой оценки,

разумным образом модифицируя ее, получить рекомендуемое значение резонансного интеграла.

На рисунке 7 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий выше 2.5 кэВ с имеющимися экспериментальными данными.

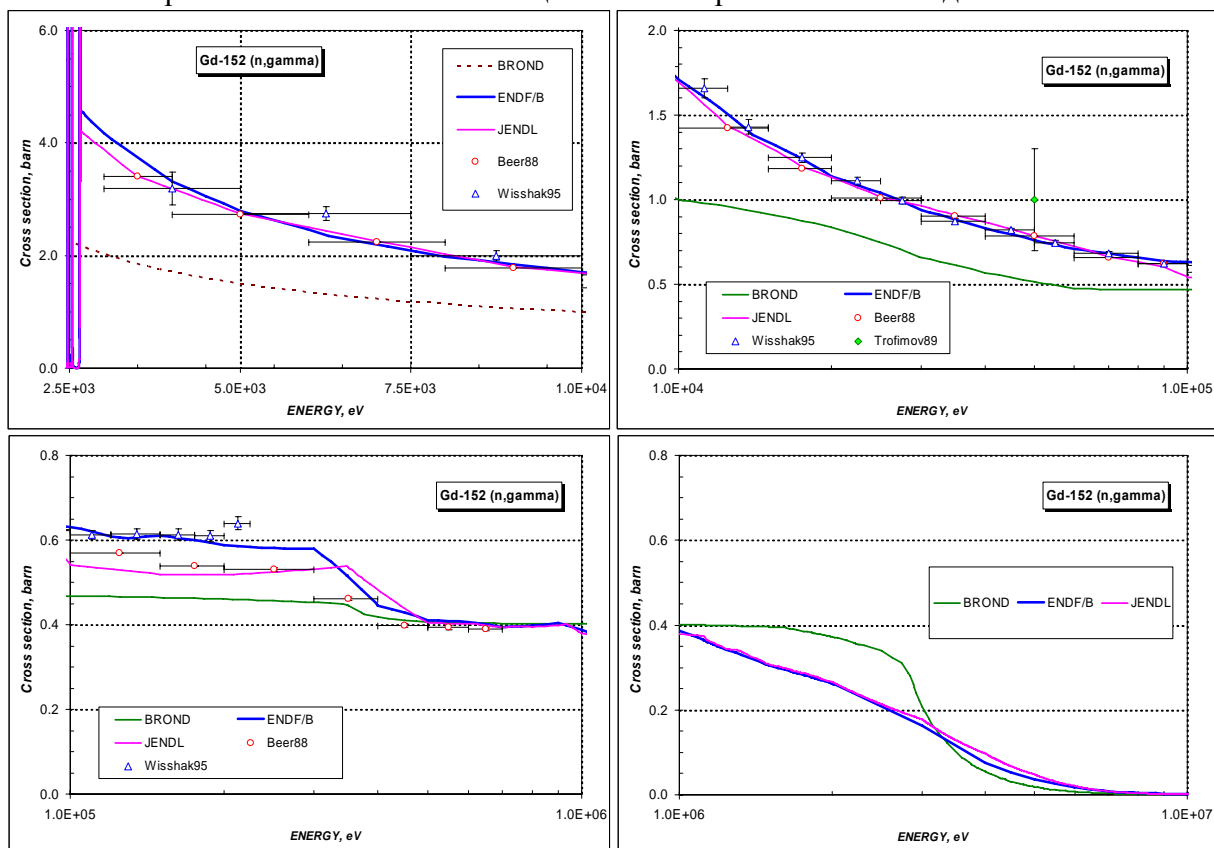


Рисунок 7 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в области энергий от 2.5 кэВ до 10 МэВ.

Из приведенного на рисунке 7 сравнения видно, что оценка ENDF/B лучше согласуется с экспериментом Висхака (1995), в то время как оценка JENDL лучше описывает эксперимент Бира(1988). Основные различия наблюдаются в области энергий 100 – 300 кэВ. В целом, оценки согласовано описывают имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные.

Заключение

Учитывая тот факт, что концентрация данного изотопа в естественной смеси мала и, что в оценке данных для ENDF/B принимал участие сам Мухабхаб а в ближайшем будущем появится публикация новой компиляции резонансных параметров Мухабхаба (апрель 2006), в РОСФОНД предлагается принять оценку Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

В дальнейшем, возможно, потребуется уточнить как резонансные параметры первых резонансов согласно новой компиляции резонансных параметров Мухабхаба, так и рекомендуемое значение резонансного интеграла.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

64.6. Гадолиний-153

Испытывает позитронный распад в ^{153}Eu (стабильный) с периодом $T_{1/2}=240.4$ дн.

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

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

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

Несмотря на нестабильность этот изотоп, возникающий в результате радиационного захвата в гадолинии-152 и в реакции (n,2n) на гадолинии-154, может заметно сказываться на поглощении нейтронов в гадолинии, облучаемом в реакторе за счет исключительно высокого сечения радиационного захвата.

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 Gd-153

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(\text{Maxw})$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	129.	-	22300.	16300.	0.7392	189.9
JENDL	-	-	-	-	-	-
JEFF	-	-	20300.	20500.	1.009	2.17E⁴
BROND	-	-	-	-	-	-
Вертебный (1987)			23000. ±3000.			

Из приведенной в таблице 2 информации видно, что наилучшее согласие с экспериментальным значением сечения захвата согласно эксперименту Вертебного и др. имеет оценка ENDF/B, но и оценка JEFF не противоречит экспериментальному значению. Отметим, что в рассматриваемых оценках наблюдается существенное расхождение между значениями резонансного интеграла I_γ .

На рисунке 8 сравнивается сечение радиоактивного захвата нейтронов из перечисленных оценок.

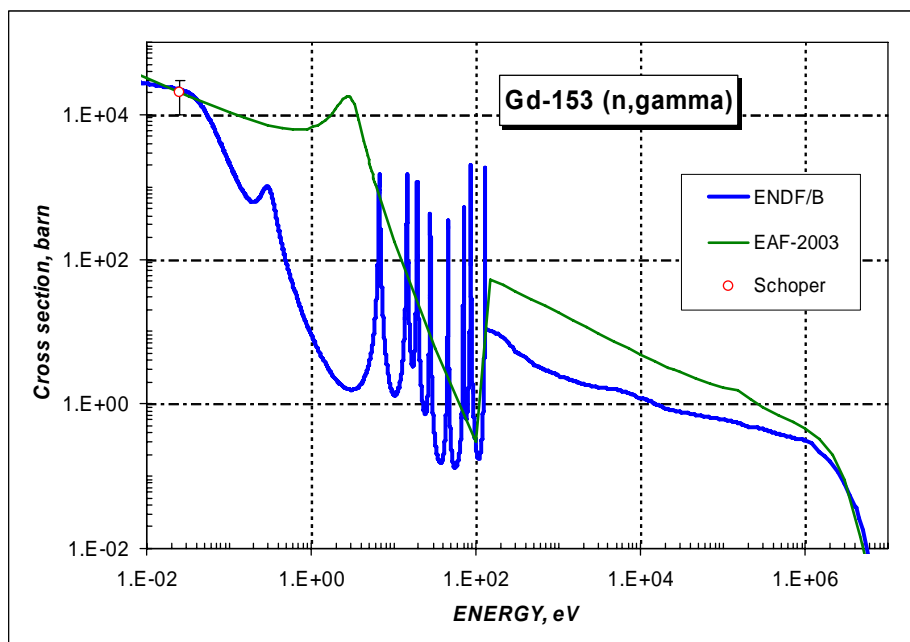


Рисунок 8 - Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-153.

Из представленного на рисунке 8 сравнения видно, что в оценках существенно различается энергетический ход сечения радиационного захвата, что и обуславливает различие в величине резонансного интеграла. В оценке ENDF/B сечение восстанавливается с помощью многоуровневого формализма Брейт-Вигнера. В оценке EAF-2003 расчет сечения выполнен с помощью программы MASGAM, в которой сечения рассчитываются по оптической модели с учетом предравновесных процессов.

Для разрешения существующего противоречия привлечем экспериментальные данные по полному сечению, которые имеются в базе экспериментальных данных EXFOR. На рисунке 9 показано сравнение экспериментальных данных по полному сечению Вертебного и др. с полным сечением из оценки ENDF/B. Там же приводятся парциальные сечения (упругое рассеяние и радиационный захват), составляющие сечение полного взаимодействия.

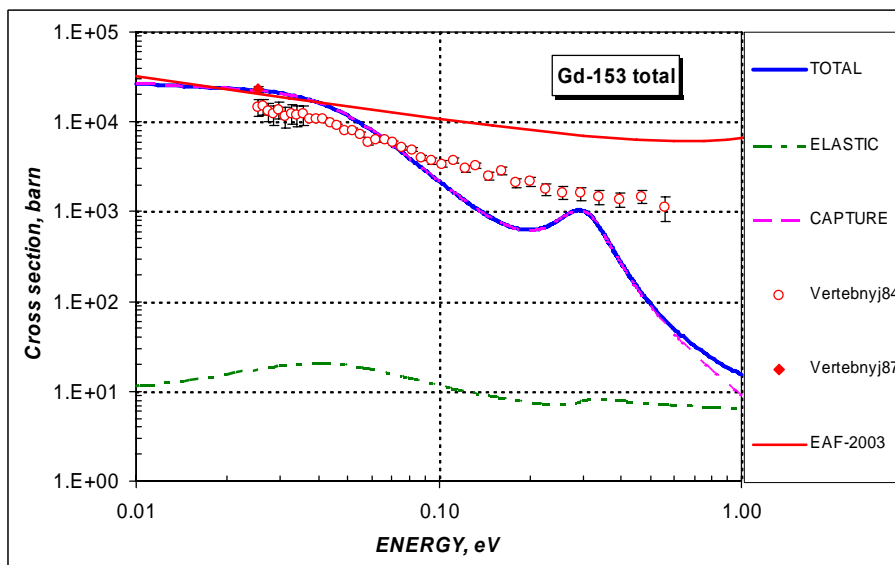


Рисунок 9 - Сечение полного взаимодействия на Gd-153 в тепловой области энергий.

Из приведенного на рисунке 9 сравнения видно, что основной вклад в полное взаимодействие в области энергий до 1 эВ происходит за счет радиационного захвата

нейтронов. Существующие экспериментальные данные подтверждают ход сечения из ENDF/B. Оценка сечения радиационного захвата в EAF-2003 в области резонансных энергий, вероятно, является ошибочной.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2). В дальнейшем желательно уточнить значение резонансного интеграла и параметры первых резонансных уровней.

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

64.7. Гадолиний-154

Содержание в естественной смеси 2.18%.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2~ENDF/B-IV, 1982.

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,Mughabgh, 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 Gd-154

Оценка	Граница области RRR, keV	Граница области URR, keV	$\sigma_{\gamma}(2200)$, барн	$\sigma_{\gamma}(Maxw)$, барн	G-fact	I_{γ} , барн
ENDF/B	2.76	50.0	85.2	83.3	0.9891	216.0
JENDL	2.76	100.0	85.0	83.3	0.9919	213.7
JEFF	0.276	-	85.0	84.1	1.000	246.3
BROND	0.986	-	86.8	85.5	0.9965	228.2
Mughabghab (2003)			85±12		0.9967	245±30

Из приведенной в таблице 3 информации видно, что согласие с оцененным значением сечения захвата из компиляции Мухабхаба имеют все оценки. В целом, все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла.

На рисунке 10 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

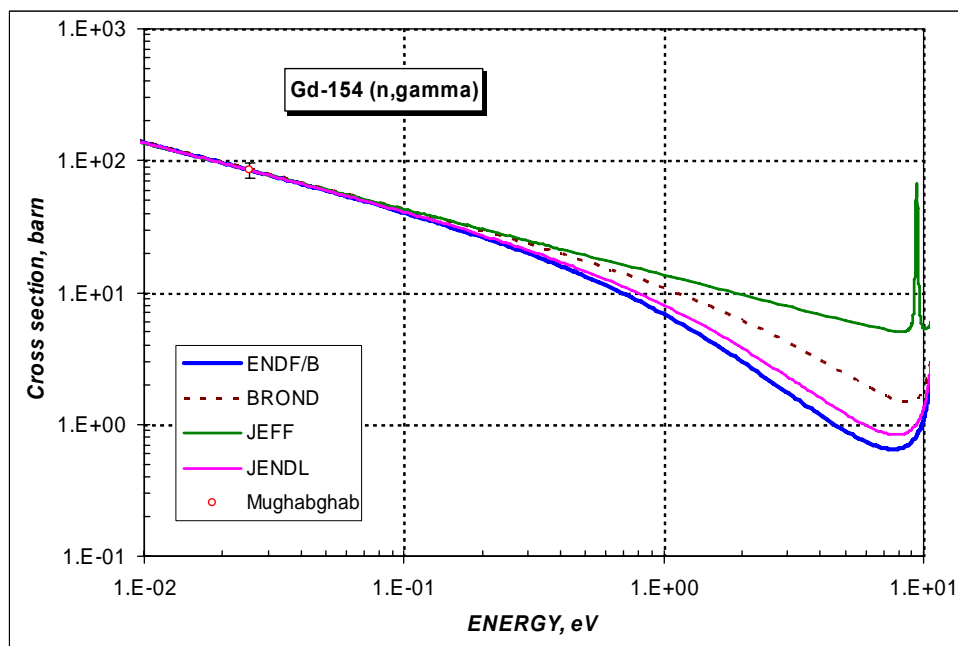


Рисунок 10 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-154 в тепловой области.

Из приведенного на рисунке 10 сравнения видно, что для всех оценок наблюдается различный характер описания сечения в эпирезонансной области энергий, что и обуславливает, главным образом, различие в резонансном интеграле.

На рисунке 11 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 0.9 кэВ.

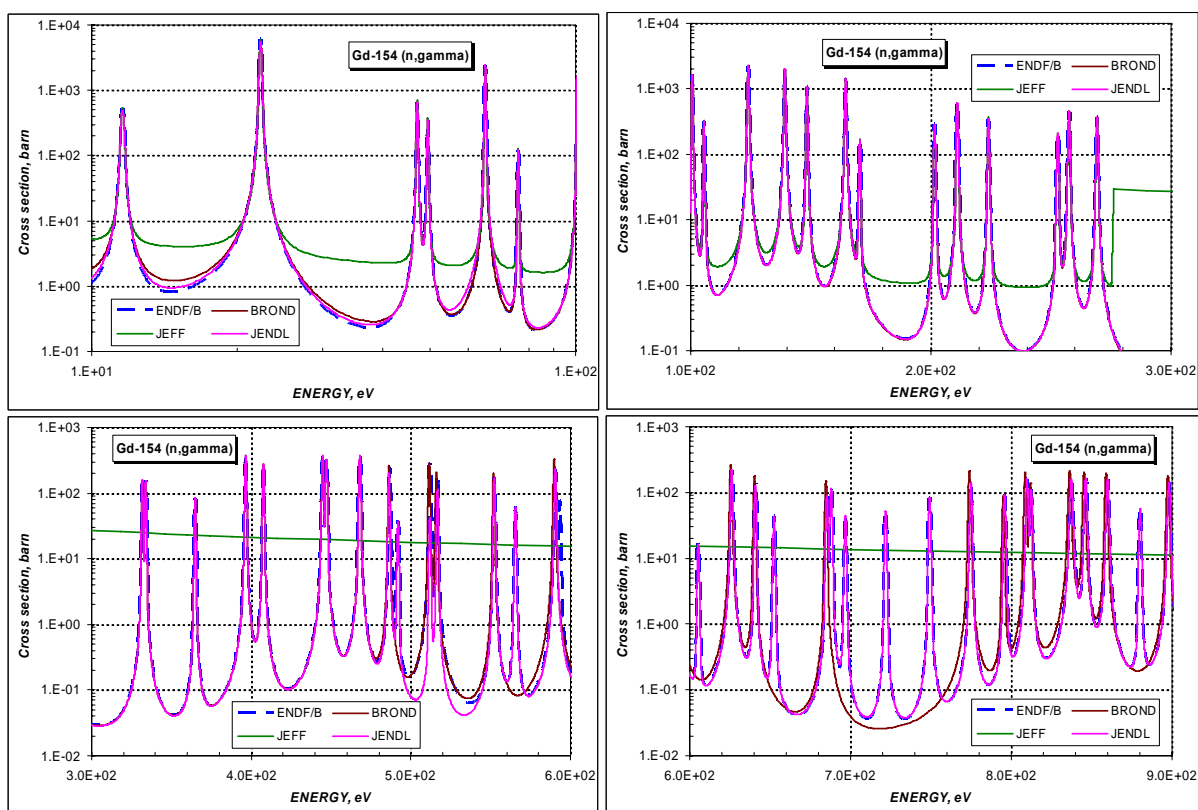


Рисунок 11 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-152 в резонансной области энергий от 10 эВ до 0.9 кэВ.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что только оценки ENDF/B и JENDL согласуются друг с другом по полноте резонансных уровней и по качеству их описания.

Рассмотрим сечение радиационного захвата в области энергий выше 3 кэВ, резонансная структура сечений уже не разрешена. Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными приводится на рисунке 12.

Из представленного на рисунке 12 сравнения видно, что до 10 кэВ оценка ENDF/B и JEF опираются на эксперимент Висхака(1995), оценка JENDL лежит ниже ENDF/B, описывая эксперимент Бира(1968). Оценка БРОНД основывается на эксперименте Шорина (1974), данные которого лежат выше всей совокупности экспериментальных данных.

Далее оценки ENDF/B, JENDL и JEF согласуются между собой в пределах 20% в области энергий ~ 0.1 МэВ, и в пределах 5 - 10% в области энергий ~ 1 МэВ.

Выше 1 МэВ экспериментальные данные отсутствуют, здесь различия в энергетическом ходе сечения определяются как различиями в используемых моделях, так и различиями в используемых модельных параметрах.

Оценка ENDF/B представляется более привлекательной, поскольку опирается на более современные экспериментальные данные и в основе ее лежат расчеты по более современным моделям.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

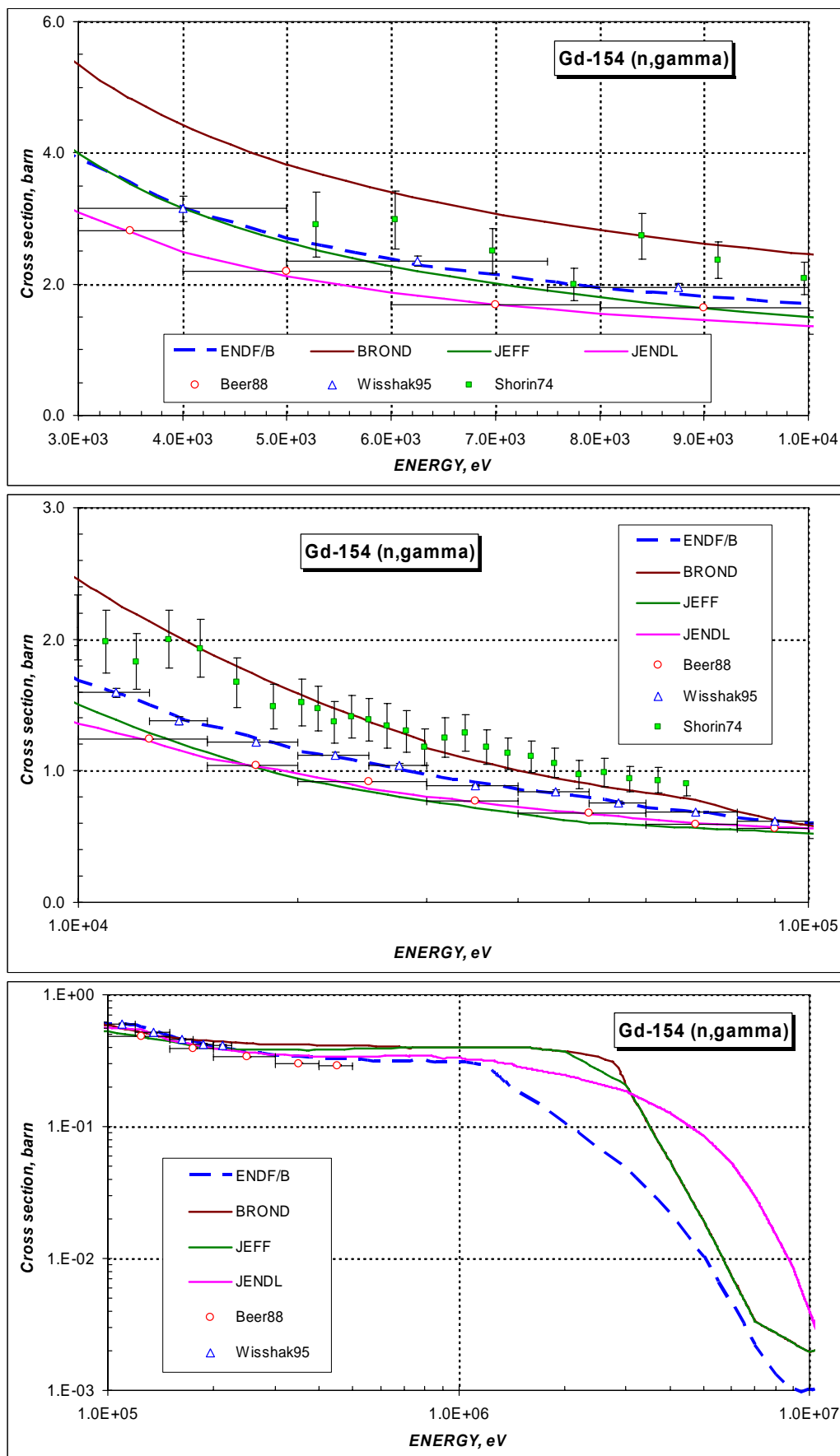


Рисунок 12 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-154 в области энергий от 3 кэВ до 10 МэВ.

64.8. Гадолиний-155

Содержание в естественной смеси 14.80%. Изотоп Gd-155 является одним из важнейших выгорающих изотопов гадолиния. Выгорая, он превращается в стабильный изотоп Gd-156.

Кроме того, Gd-155 является осколком деления тяжелых ядер. Выход его при делении ядерного топлива невелик от $\sim 1.E-5$ (U235) до $\sim 1.2E-4$ (Pu-241). Однако, из-за наличия у него большого сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области, его вклад в суммарное сечение захвата является заметным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-2~JENDL-3.2, 1988.

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,Mughabgh, 2005.

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 Gd-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	183.	60.4	60 729.	50 344.	0.8386	1542.
JENDL	182.	100.	60 729.	50 343.	0.8386	1533.
JEFF	182.	100.	60 729.	50 344.	0.8386	1544.
BROND	183.	104.	60 903.	50 488.	0.8386	1555.
Mughabghab (2003)			60 900. \pm 500.		0.8390	1447. \pm 100.

Из приведенной в таблице 4 информации видно, что в целом, все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла.

На рисунке 13 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в начале резонансной области энергий с имеющимися экспериментальными данными.

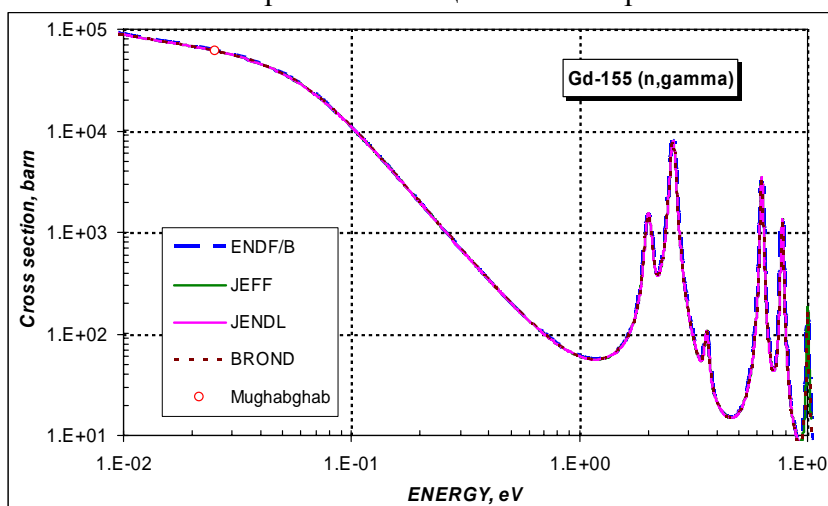


Рисунок 13 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-155 в тепловой области.

Хорошее согласие между оценками наблюдается и в резонансной области энергий выше 10 эВ (смотри рисунок 14).

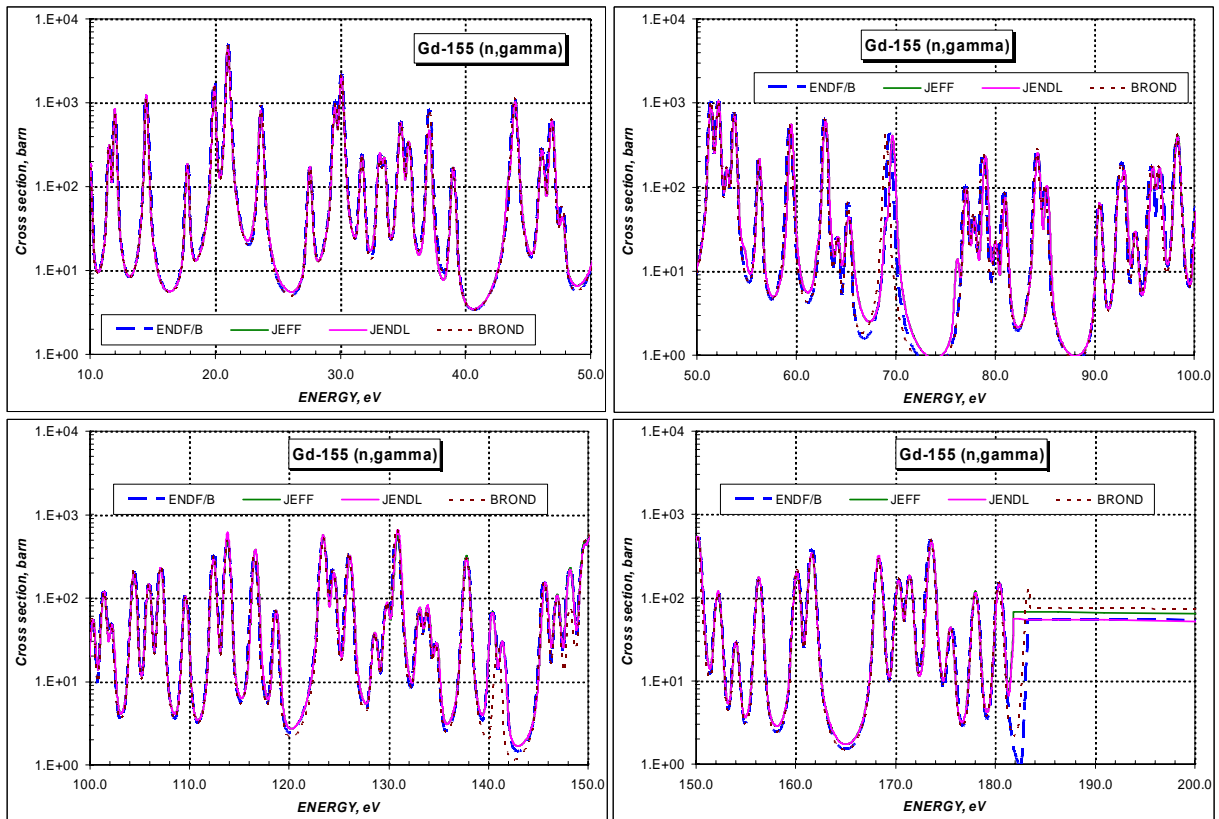


Рисунок 14 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-155 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 14 сравнения видно, что в целом, все оценки хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий выше 1 кэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий выше 1 кэВ приведено на рисунке 15.

Из приведенного на рисунке 15 сравнения видно, что в области энергий от 1 кэВ до 10 кэВ оценка БРОНД лежит выше других, опираясь на эксперимент Шорина и др.(1974). Остальные оценки хорошо согласуются друг с другом и с экспериментальными данными.

В области энергий от 10 до 100 кэВ в соответствии с экспериментом Шорина “проваливается” вниз. Оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с совокупностью экспериментальных данных. Оценка JEF лежит выше остальных, опираясь на экспериментальные данные Накажима и др.(1984).

В области энергий от 0.1 до 1.0 МэВ две оценки JENDL и ENDF/B, согласуясь между собой, наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными. Оценки БРОНД и JEF в этой области выпадают.

В области энергий выше 1 МэВ сечение реакции резко падает и экспериментальных данных совсем немного. Наилучшим образом экспериментальные данные описываются оценкой из ENDF/B. Хотя и оценка JENDL не противоречит экспериментальным данным.

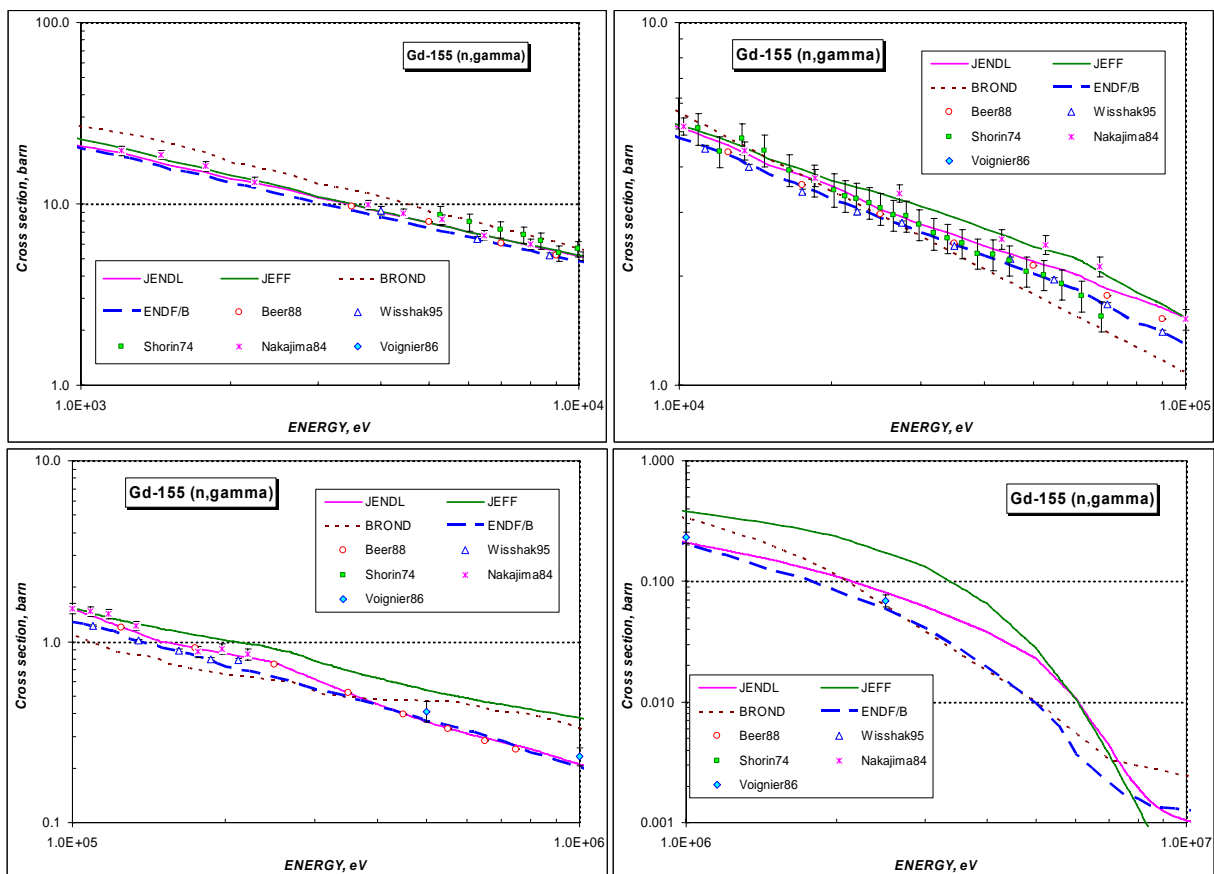


Рисунок 15 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-155 в области энергий выше 1 кэВ.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

64.9. Гадолиний-156

Содержание в естественной смеси 20.47%. Gd-156 является также одним из основных осколков деления в ядерном реакторе. Выход его при делении ядерного топлива довольно значителен: он составляет от $\sim 1.7E-4$ (U235) до $\sim 2.46E-3$ (Pu-241). Из-за этого его вклад в суммарное сечение захвата продуктов деления является заметным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2 (ENEA/CEA), 1982.

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 5. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 5. Резонансные свойства Gd-156

Оценка	Граница области RRR, keV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	2.2	-	1.795	1.775	1.0006	107.2
JENDL	2.21	100.	2.188	2.164	1.0005	119.7
JEFF	1.58	50.	1.536	1.519	1.0006	100.2
BROND	0.98	-	2.056	2.034	1.0005	117.3
Mughabghab (2003)			1.8 ± 0.7		1.0007	104 ± 15

Из приведенной в таблице 5 информации видно, что в целом все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла, однако ENDF/B согласуется наилучшим образом.

На рисунке 16 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в начале резонансной области энергий.

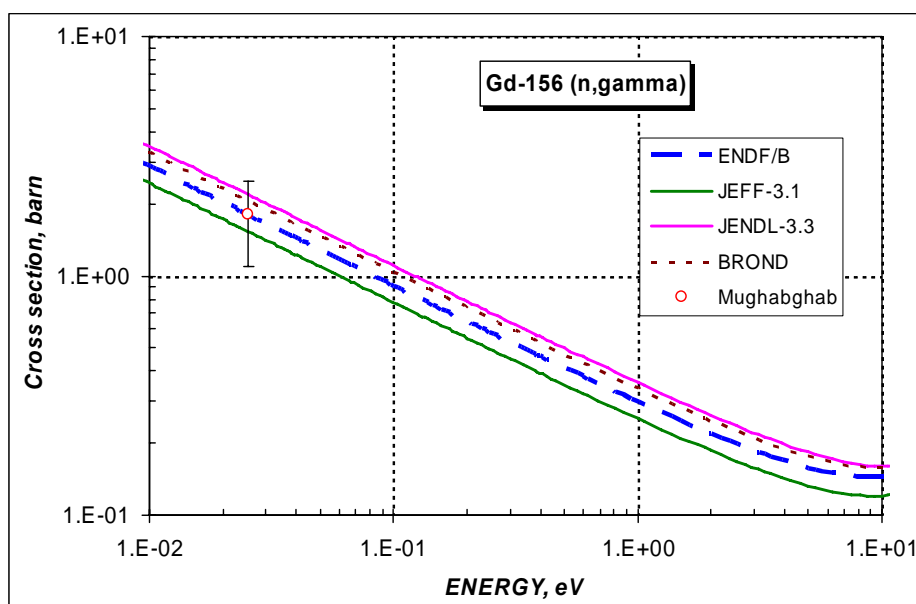


Рисунок 16 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-156 в тепловой области.

На рисунке 17 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 2.0 кэВ.

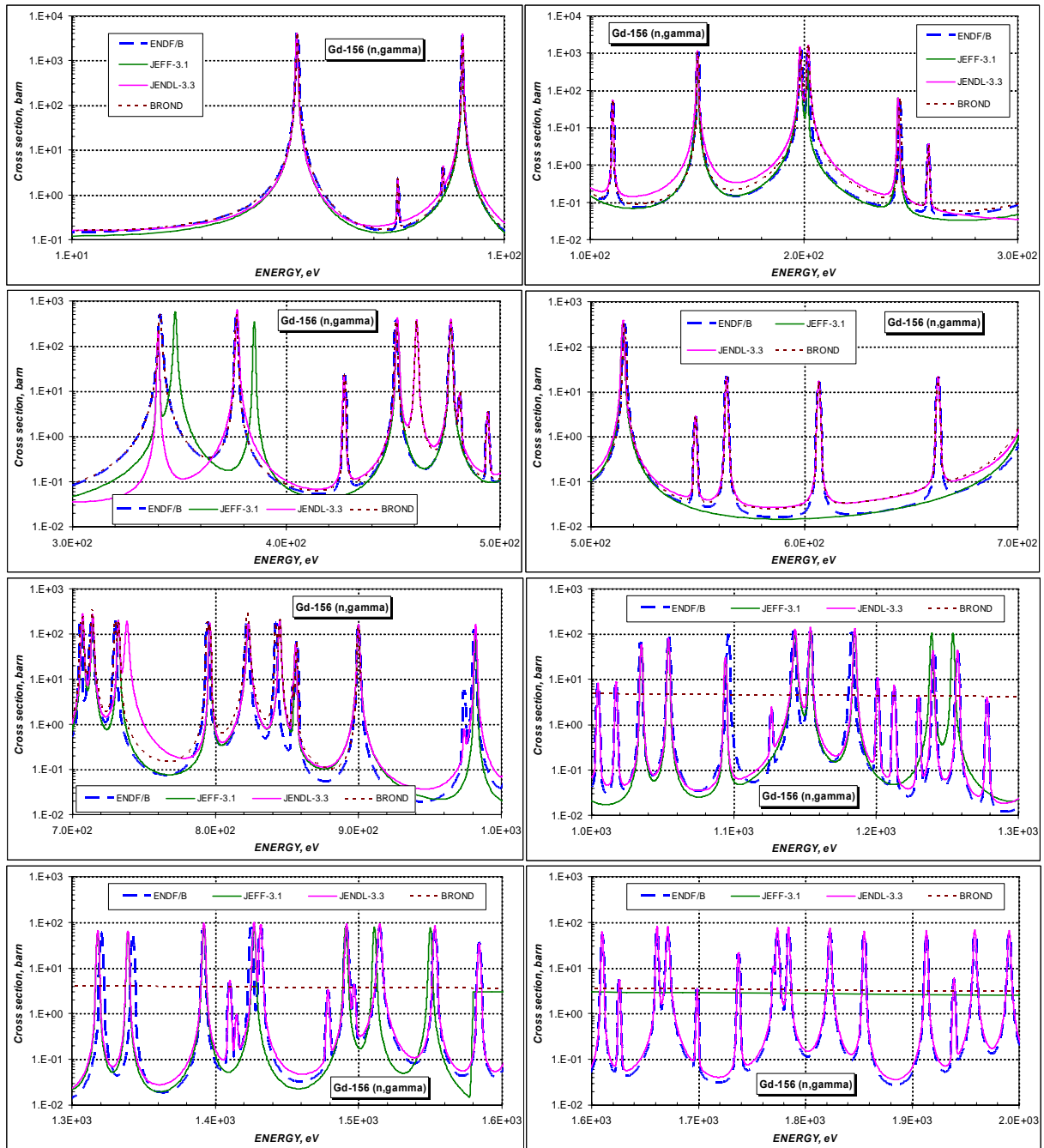


Рисунок 17 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-156 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 17 сравнения видно, что не все оценки хорошо описывают резонансное поглощение нейтронов. В целом, наилучшим образом друг с другом согласуются оценки ENDF/B и JENDL, как по полноте резонансных уровней, так и по качественному описанию резонансов. В оценке JEF наблюдается большой пропуск уровней. Оценка БРОНД хорошо согласуется с ENDF/B, но резонансная область у нее простирается только до 0.98 кэВ.

В области гладких сечений экспериментальная информация немногочисленна – всего два набора экспериментальных данных. Сравнение имеющихся экспериментальных

данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий выше 2 кэВ приведено на рисунке 18.

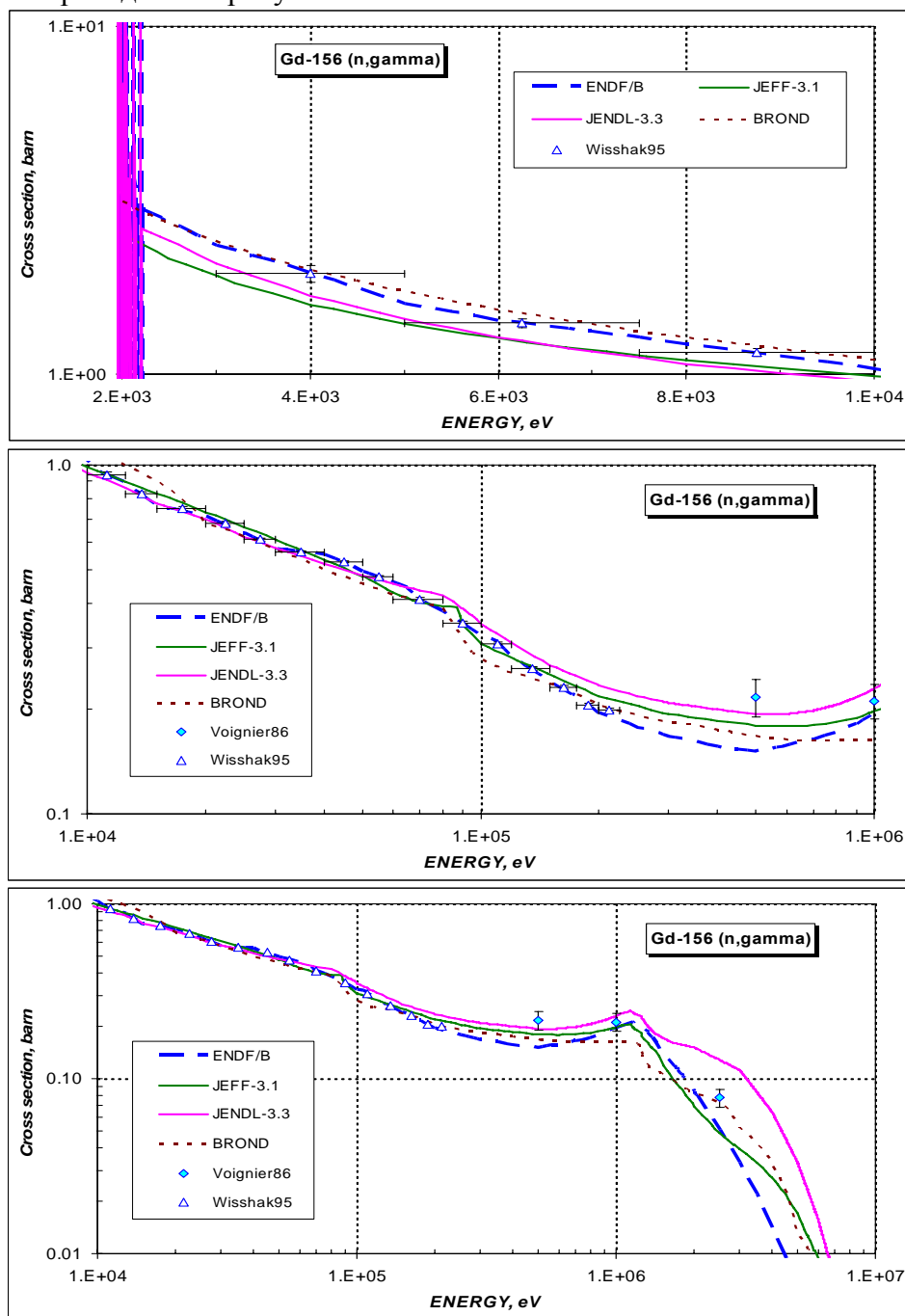


Рисунок 18 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-156 в области энергий выше 2 кэВ.

Из приведенного на рисунке 18 сравнения видно, что в области энергий от 2 кэВ и до 10 МэВ оценки БРОНД и ENDF/В наилучшим образом согласуются друг с другом и с экспериментальными данными Висхака (1995) и Войжнира(1988). Оценка JENDL, ориентируясь на эксперимент Войжнира(1988), в области энергий до 10 кэВ лежит ниже всех оценок, а выше 100 кэВ – находится выше всех.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных Кощеев В.Н.

64.10. Гадолиний-157

Содержание в естественной смеси 15.65%. Изотоп Gd-157 является одним из важнейших выгорающих изотопов гадолиния. Выгорая, он превращается в стабильный изотоп Gd-158.

Кроме того, Gd-157 является осколком деления в ядерном реакторе. Выход его при делении ядерного топлива от $\sim 7 \cdot 10^{-5}$ (U235) до $\sim 1.39 \cdot 10^{-3}$ (Pu-241). Из-за наличия у него большого сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой области, его вклад в суммарное сечение захвата является существенным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JENDL-3.2, 1982.

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, Mughabgh, 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 Gd-157

Оценка	Граница области RRR, eV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-factor	I_γ , барн
ENDF/B	306.	55.	253 700.	212 400.	0.8468	753.6
JENDL	304.	100.	253 600.	212 500.	0.8475	761.1
JEFF	215.	-	253 200.	212 100.	0.8471	761.8
BROND	306.	10.	253 500.	212 200.	0.8468	757.2
Mughabghab (2003)			254 000. $\pm 815.$		0.8472	<u>754.\pm20.</u>

Из приведенной в таблице 6 информации видно, что в целом, все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями резонансного интеграла.

На рисунке 19 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в начале резонансной области энергий со значением, рекомендованным Мухабхабом.

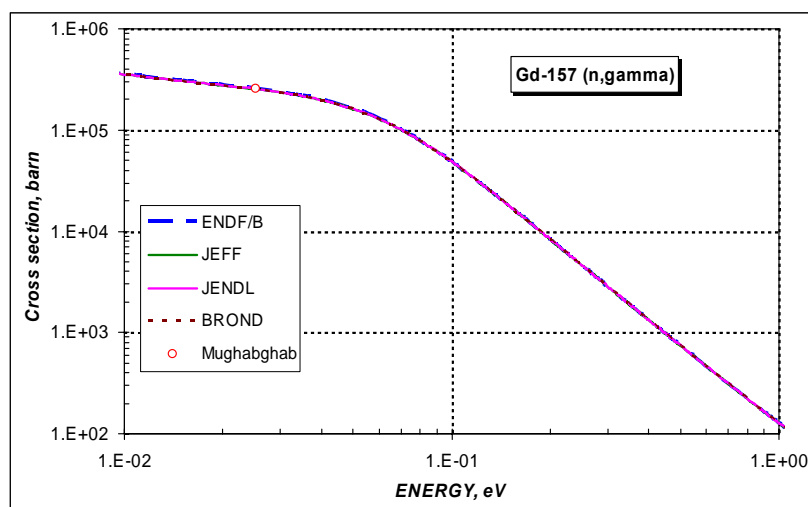


Рисунок 19 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-157 в тепловой области.

Хорошее согласие между оценками наблюдается и в резонансной области энергий выше 10 эВ (смотри рисунок 20).

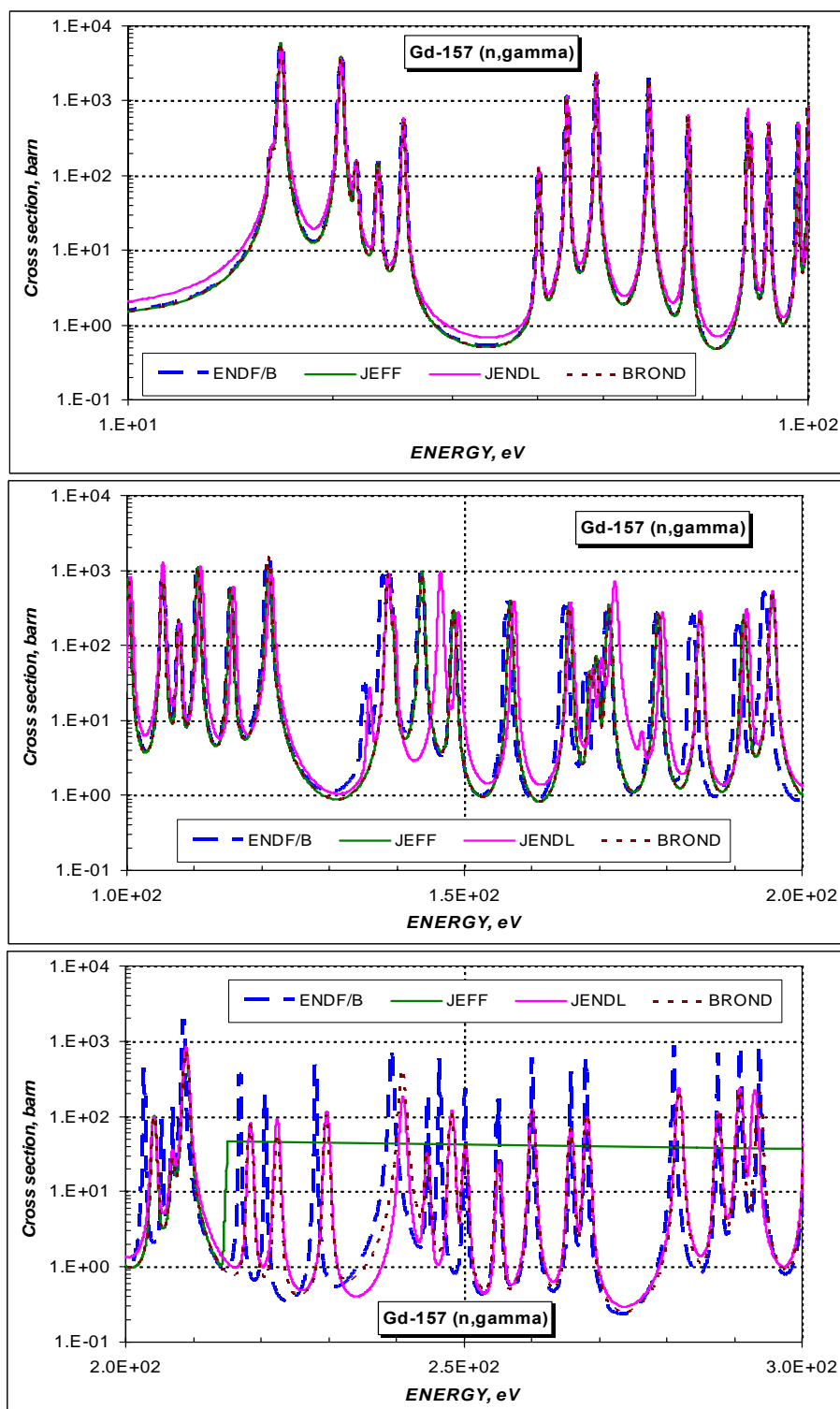


Рисунок 20 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-157 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 20 сравнения видно, что не все оценки хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов. До 120 эВ все оценки согласуются между собой, кроме JENDL, в которой минимумы не так глубоки, как в других оценках. Выше 120 эВ наблюдаются существенные различия в описании резонансных уровней. Видно, что в последней оценке ENDF/B (Мухабхаб и др.) для части уровней резонансные параметры сильно изменены.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий выше 1 кэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий выше 1 кэВ приведено на рисунке 21.

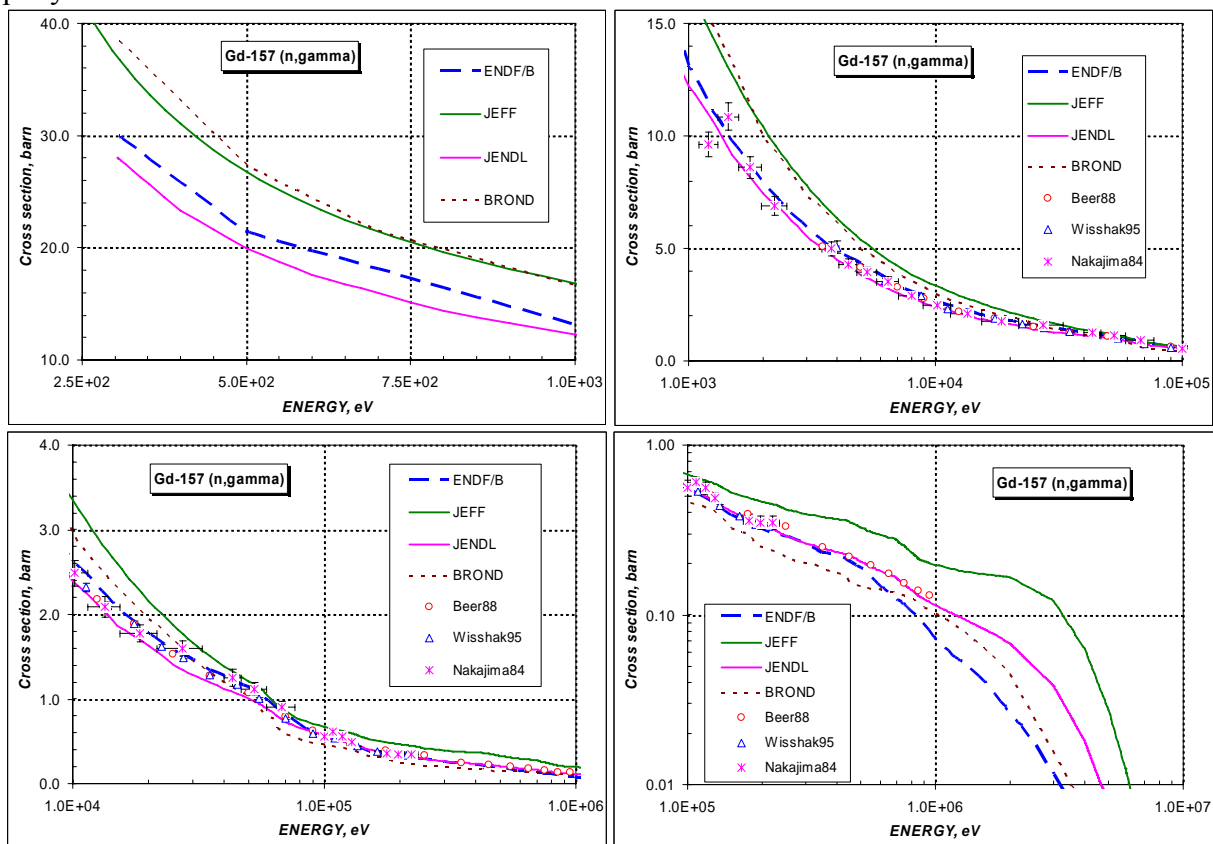


Рисунок 21 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-157 в области энергий выше 250 эВ.

Из приведенного на рисунке 21 сравнения видно, что в области энергий от 1 кэВ до 10 кэВ оценки БРОНД и JEF лежат выше других, не согласуясь с экспериментальными данными. Остальные оценки ENDF/B и JENDL согласуются друг с другом и с экспериментальными данными. До 1 МэВ наилучшим образом с экспериментальными данными согласуется ENDF/B, при оценке которой использовались экспериментальные данные Висхака (1995).

В области энергий выше 1 МэВ сечение реакции резко падает, а экспериментальных данных нет. Наилучшим образом согласуются друг с другом оценки ENDF/B, БРОНД и JENDL, в то время как, оценка JEF явным образом и неоправданно лежит выше.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman,Oblozinsky,Sarer,Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных

Кощев В.Н.

64.11. Гадолиний-158

Содержание в естественной смеси 24.84%. Gd-158 является одним из основных осколков деления в ядерном реакторе. Выход его при делении ядерного топлива значителен и составляет от $\sim 6.E-5$ (U235) до $\sim 1.35E-3$ (Pu-241). Его вклад в суммарное сечение захвата является также заметным.

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2~ENDF/B-IV, 1982.

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,Mughabgh, 2005.

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 7. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 7. Резонансные свойства Gd-158

Оценка	Граница области RRR, keV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-fact	I_γ , барн
ENDF/B	9.98	-	2.20	2.18	1.0006	68.1
JENDL	6.6	100.	2.50	2.47	1.0004	63.7
JEFF	6.0	-	2.50	2.47	1.0006	62.8
BROND	9.98	-	1.97	1.95	1.0007	70.8
Mughabghab (2003)			2.2 ± 0.2		1.0009	$73. \pm 7.$

Из приведенной в таблице 7 информации видно, что не все оценки в пределах заявленной точности, согласуются с рекомендованными значениями сечения захвата тепловых нейтронов и резонансного интеграла. Наилучшим образом с рекомендуемыми Мухабхабом значениями согласуются оценки ENDF/B и БРОНД. В то время как, оценки сечения захвата тепловых нейтронов в JEF и JENDL кажутся завышенными, а резонансные интегралы- заниженными.

На рисунке 22 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в тепловой и эпитепловой областях.

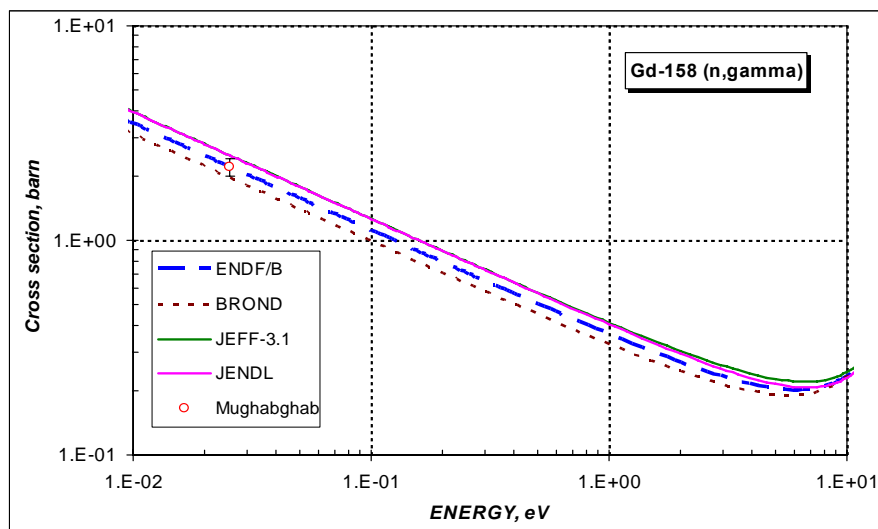


Рисунок 22 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в тепловой области.

На рисунке 23 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий от 10 эВ до 3.0 кэВ.

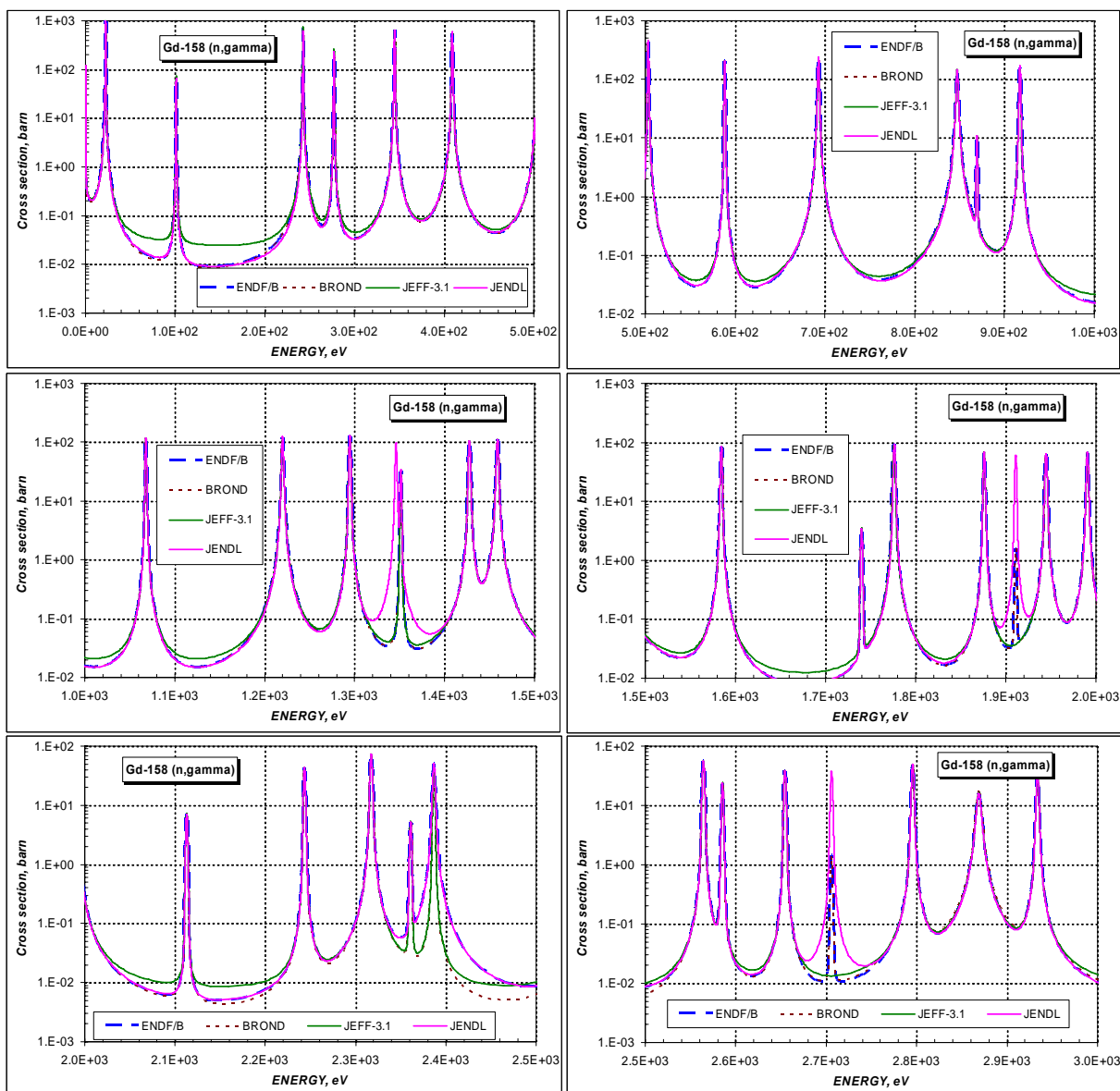


Рисунок 23 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в резонансной области энергий.

Из приведенного на рисунке 23 сравнения видно, что, в целом, все оценки хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов, за исключением, быть может, оценки JEF. Видно, что в последней оценке ENDF/B (Мухабхаб и др) для некоторой части уровней резонансные параметры изменены.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ приведено на рисунке 24.

Из приведенного на рисунке 24 сравнения видно, что Оценка ENDF/B, для которой учитывались экспериментальные данные Висхака (1995), наилучшим образом согласуется со всей совокупностью экспериментальных данных. С ENDF/B хорошо согласуется и оценка JENDL.

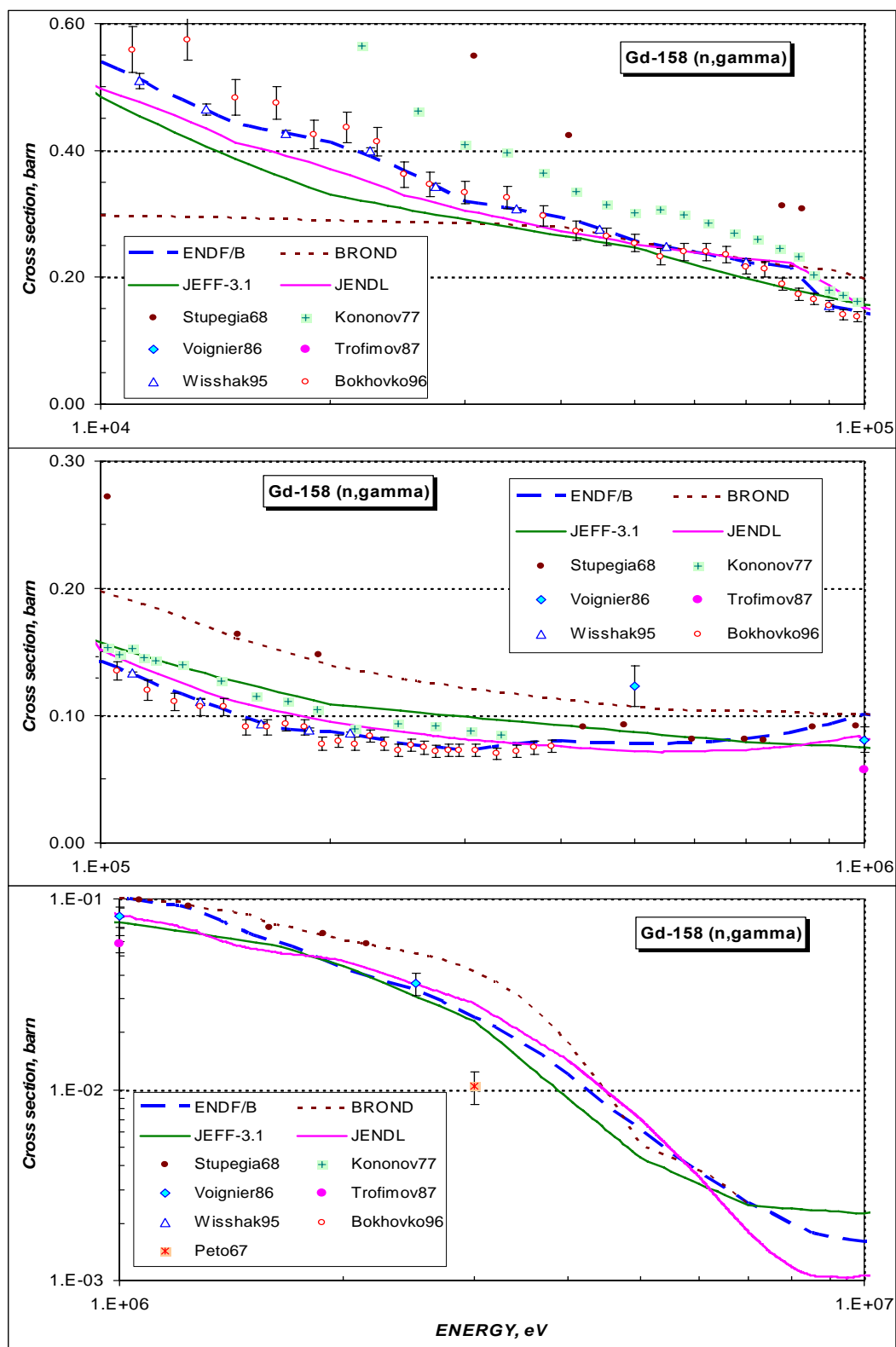


Рисунок 24 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ.

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных
Кощев В.Н.

64.12. Гадолиний-160

Содержание в естественной смеси 21.86%. Gd-160 является одним из осколков деления тяжелых ядер. Его выход при делении ядерного топлива составляет от $\sim 1.E-5$ (U235) до $\sim 3.9E-4$ (Pu-241).

В ФОНД-2.2 – оценка Блохина, Белановой, 1989.

В JEFF-3.1 – оценка, выполненная для JEF-2.2~ENDF/B-IV, 1982.

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

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

Некоторые характеристики для области резонансных энергий приведены в таблице 8. Они получены с помощью программы INTER из комплекса программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13, July 2002).

Таблица 8. Резонансные свойства Gd-160

Оценка	Граница области RRR, keV	Граница области URR, keV	$\sigma_\gamma(2200)$, барн	$\sigma_\gamma(Maxw)$, барн	G-factor	I_γ , барн
ENDF/B	9.66	-	1.410	1.394	1.0000	8.09
JENDL	4.22	100.	0.796	0.787	0.9997	11.9
JEFF	2.88	-	0.770	0.761	1.0001	8.21
BROND	9.67	-	0.209	0.206	1.0001	7.57
Mughabghab			1.4 ± 0.3		0.9997	7.4 ± 1.0

Из приведенной в таблице 8 информации видно, что с рекомендованными значениями Мухабхаба наилучшим образом согласуется оценка ENDF/B. В то время как, оценки JEF и JENDL кажутся заниженными по отношению к тепловому значению сечения и завышенными по отношению к резонансному интегралу. Оценка БРОНД имеет ошибочное значение сечения в тепловой точке.

На рисунке 25 сравниваются оцененные сечения радиационного захвата нейтронов в резонансной области энергий от 0.01 эВ до 5.0 кэВ.

Из приведенного на рисунке 25 сравнения видно, насколько неправильно описывают сечение в тепловой области оценки JEF, JENDL и БРОНД.

Далее, оценка JENDL не согласуется с другими оценками в описании минимумов в сечении резонансного поглощения.

Оценки БРОНД и ENDF/B хорошо согласуются друг с другом при описании резонансного поглощения нейтронов, за исключением тепловой области энергий.

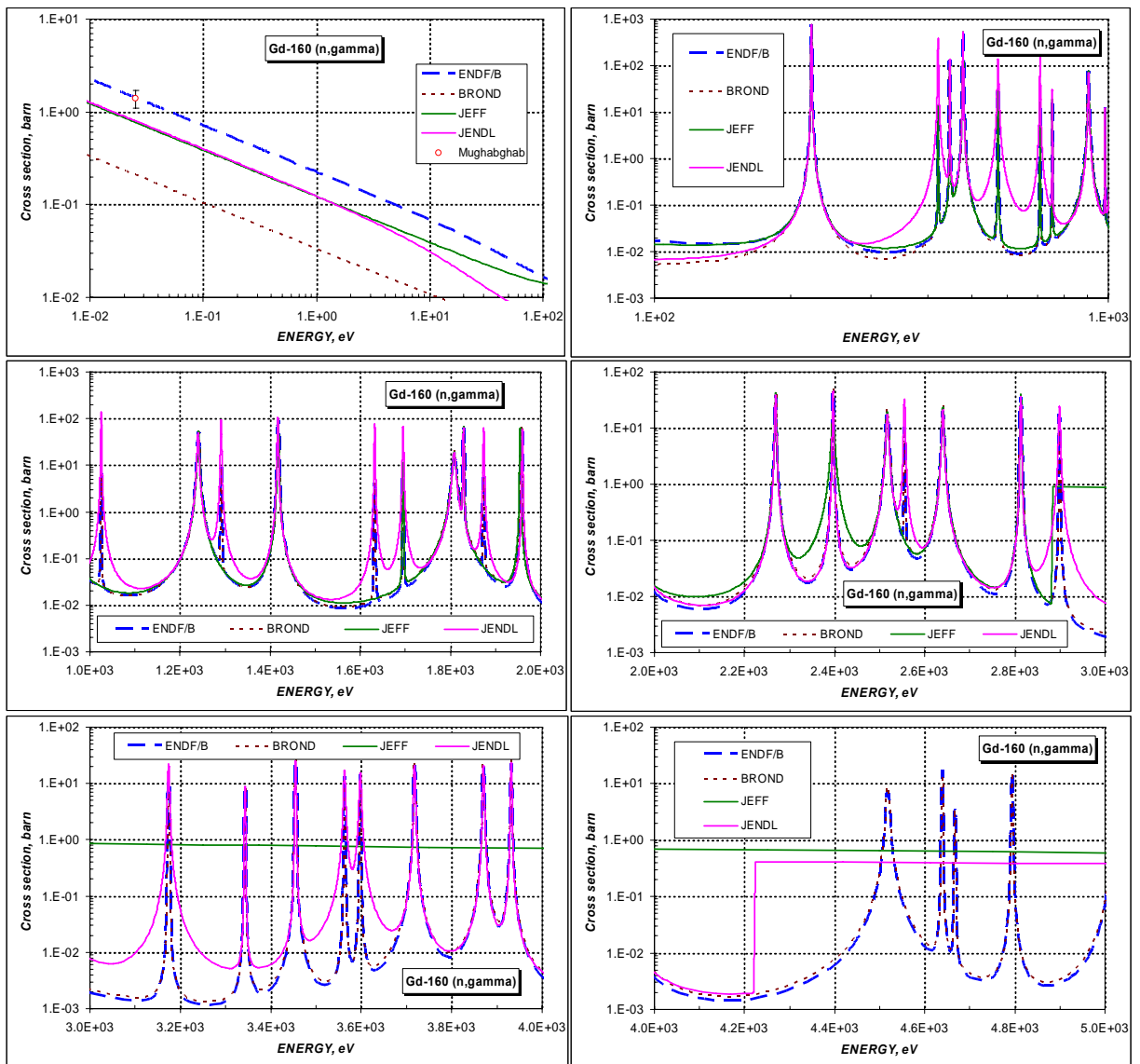


Рисунок 25 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-158 в резонансной области энергий.

В области гладких сечений экспериментальная информация имеется в области энергий от 10 кэВ до 20 МэВ. Сравнение имеющихся экспериментальных данных с оцененными значениями сечения радиационного захвата в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ приведено на рисунке 26.

Из приведенного на рисунке 26 сравнения видно, что оценка ENDF/B, в которой учитывались экспериментальные данные Боховко и др. (1996), наилучшим образом согласуется со всей совокупностью экспериментальных данных.

С оценкой ENDF/B хорошо согласуется и оценка JENDL.

Оценки сечений, принятые в JEF и БРОНД представляется ошибочными.

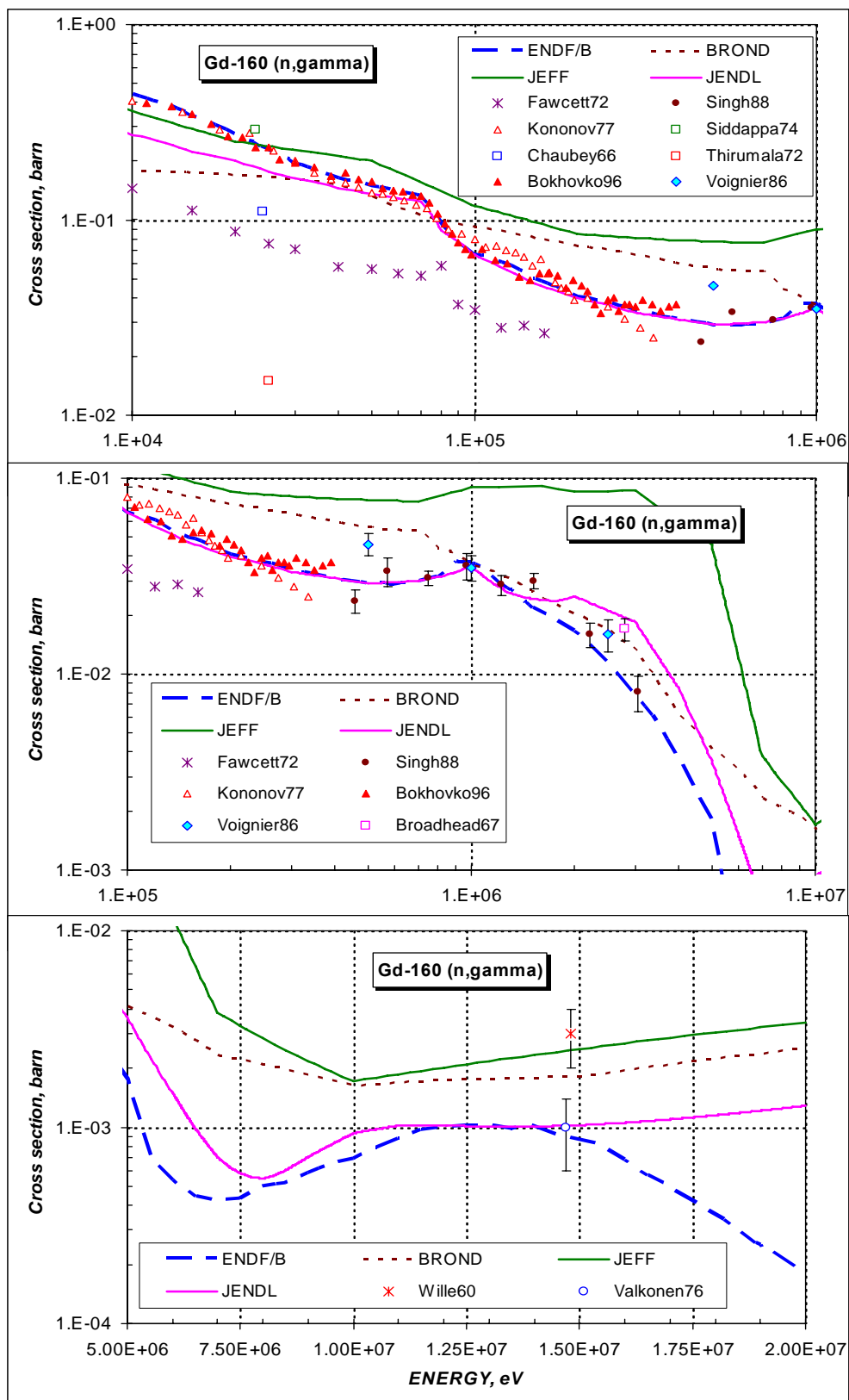


Рисунок 26 – Сечение радиационного захвата нейтронов на Gd-160 в области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ.

Заклучение

В РОСФОНД принимается оценка Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2).

Автор отбора данных Кошечев В.Н.

64.13. Природный гадолиний

Включать в РОСФОНД файл данных для натурального гадолиния не предполагается. 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 концентраций их в естественной смеси, были получены мультигрупповые сечения для природного гадолиния.

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

На рисунке 27 приведено сравнение оцененных сечений полного взаимодействия в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

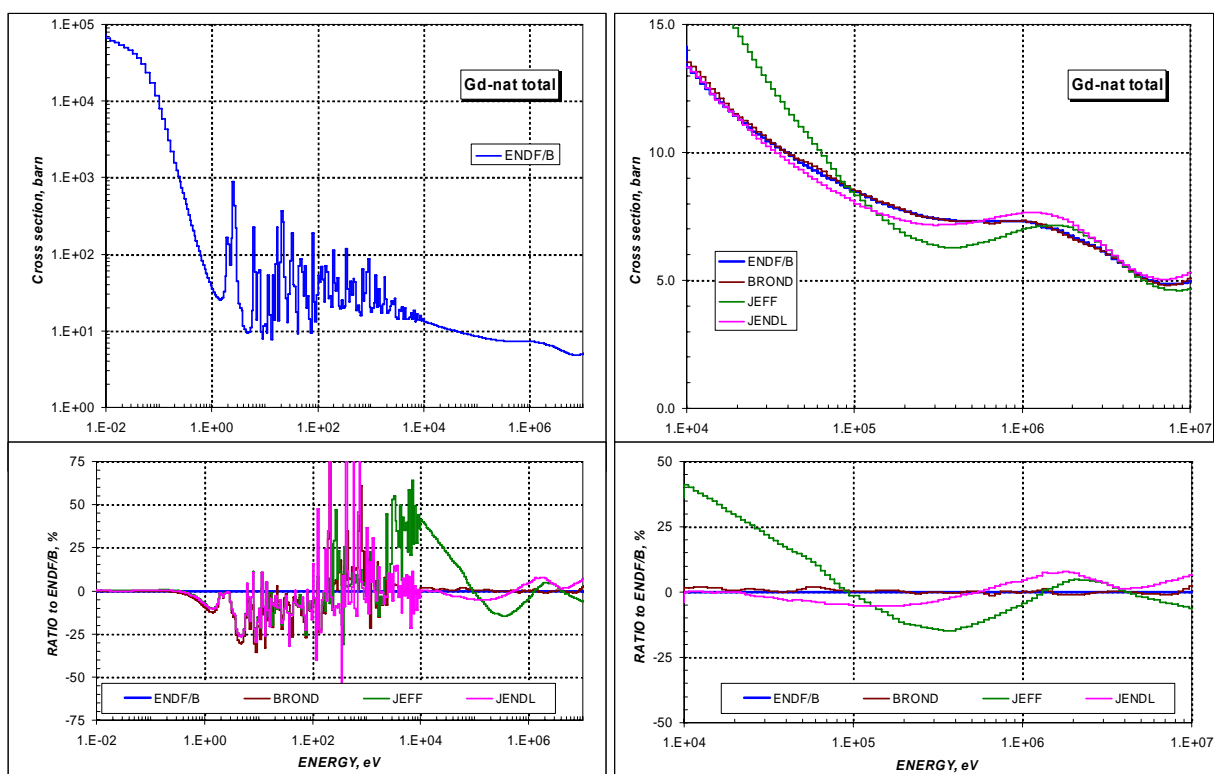


Рисунок 27 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений полного взаимодействия для Gd-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 27 информации видно, что оценка полного сечения оценки ENDF/B в интервале энергий от 0.1 до 200 эВ лежит выше остальных оценок, в среднем, на 10 - 15 %. В области энергий выше 1 кэВ оценка JEF расходится до 50% с оценкой ENDF/B. В области энергий выше 10 кэВ все оценки (кроме JEF) согласуются между собой в пределах 5 – 7 %.

Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 28.

Из приведенного сравнения на рисунке 28 видно, что только оценки ENDF/B и БРОНД согласуются со всей совокупностью экспериментальных данных, в то время как, для оценок JEF и JENDL наблюдаются существенные расхождения от экспериментальных данных.

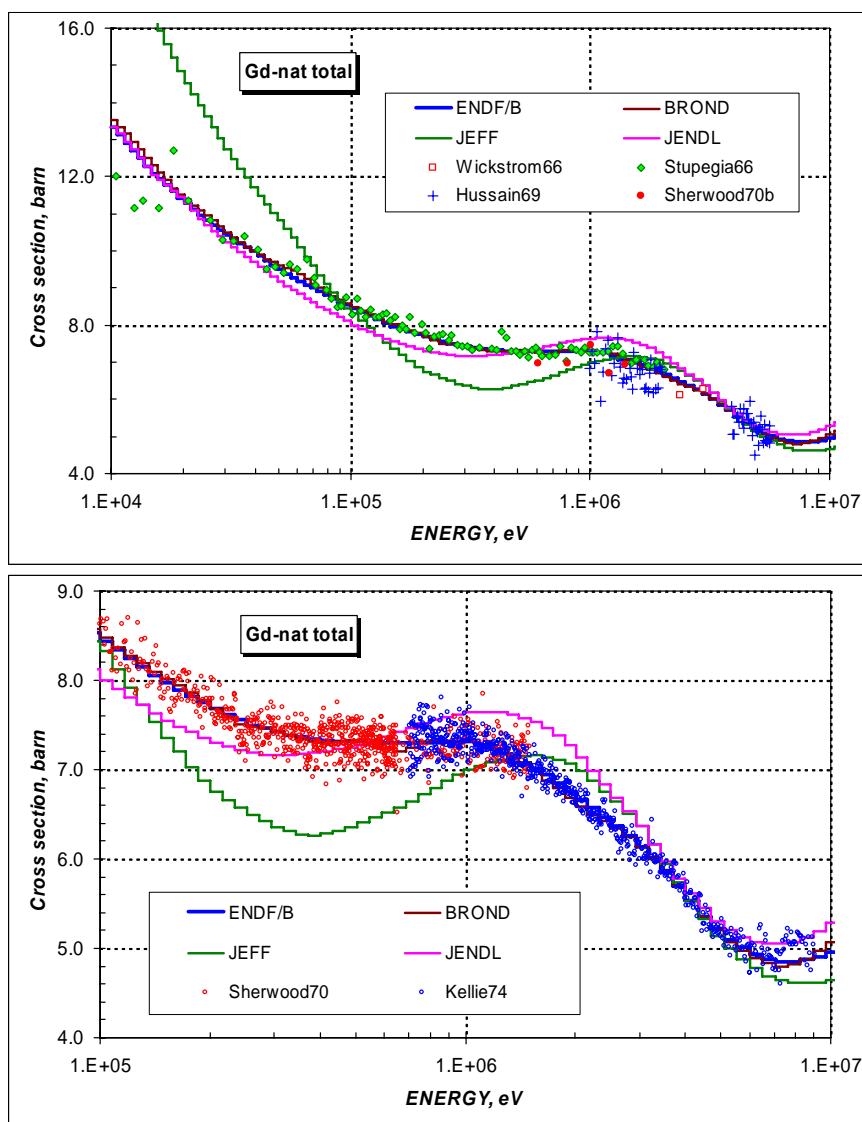


Рисунок 28 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения Gd-nat в области энергий выше 10 кэВ.

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

Для захвата были рассчитаны 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 9. Сечение захвата медленных нейтронов Gd-nat.

Оценка	$\sigma_{\gamma}(2200)$, барн	I_{γ} , барн
ENDF/B	48 699.	392.5
JENDL	48 686.	395.6
JEFF	48 625.	393.1
BROND	48 647.	397.9
Mughabghab	48 890. ± 104.	390. ± 10.

Из приведенной в таблице 9 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с рекомендуемыми значениями Мухабхаба. В то же время, все оцененные значения согласуются с рекомендациями Мухабхаба в пределах заявленной точности.

На рисунке 29 представлено сравнение оцененных сечений в области энергий от 0.01 эВ до 10 МэВ.

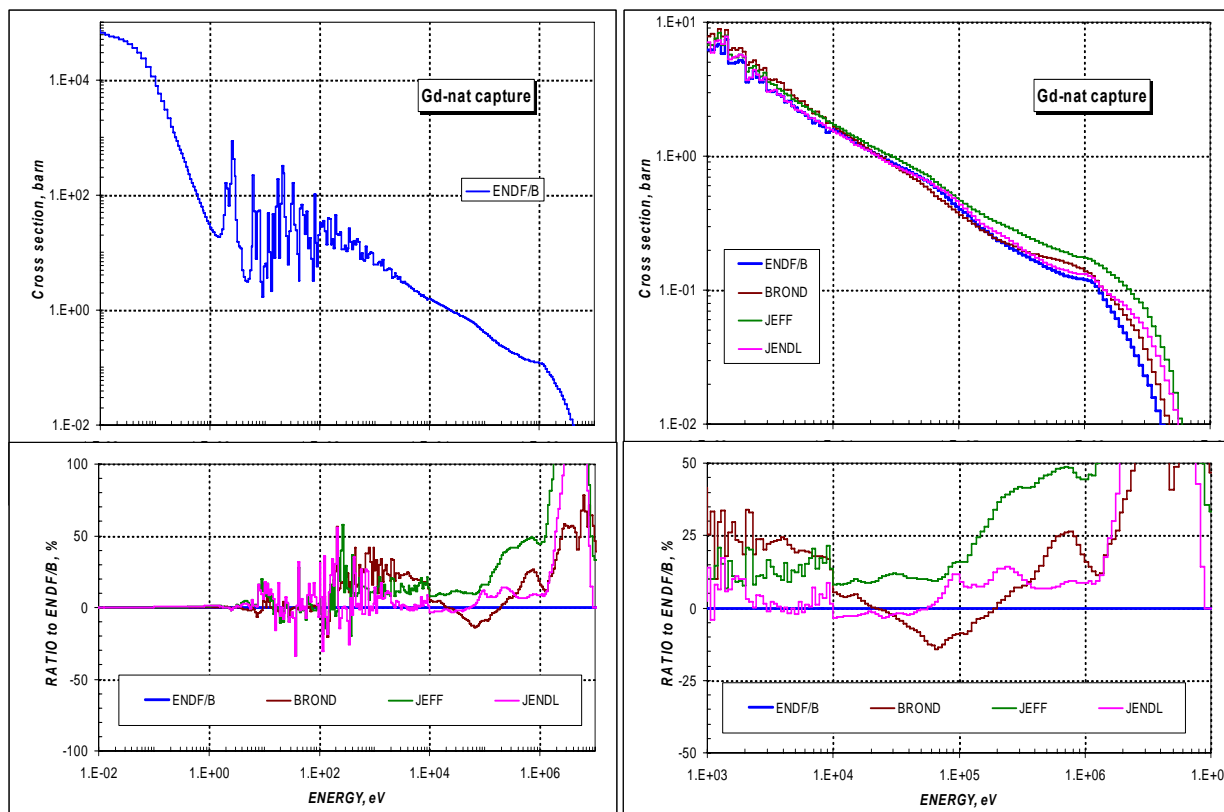


Рисунок 29 – Сравнение оцененных мультигрупповых сечений захвата для Gd-nat в области энергий 0.01 эВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 29 информации видно, что оценка сечения захвата в интервале энергий от 0.1 до 200 эВ лежит выше остальных оценок, в среднем, на 10 - 15 %. В области энергий выше 1 кэВ оценка JEF расходится до 50% с оценкой ENDF/B. В области энергий выше 10 кэВ все оценки (кроме JEF) согласуются между собой в пределах 5 – 7 %.

Из приведенного на рисунке 29 сравнения видно, что до 100 эВ оценки согласуются в пределах 10 %, от 100 эВ до 10 кэВ расхождения между оценками достигают ~ 25 - 30 %, выше 10 кэВ – в пределах 20 % (не считая JEF). В области энергий выше 1 МэВ, где сечения малы по величине, расхождения возрастают до 100 %.

Сравнение оцененных сечений с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 30.

Из приведенного сравнения на рисунке 30 видно, что оценка ENDF/B в области энергий от 1 до 10 кэВ лежит ниже совокупности экспериментальных данных, а выше 10 кэВ наилучшим образом согласуется со всеми наборами экспериментальных данных.

Что касается других оценок, то только оценка JEF выше 100 кэВ лежит выше всей совокупности экспериментальных данных. Остальные оценки согласуются между собой в пределах разброса различных экспериментальных наборов данных.

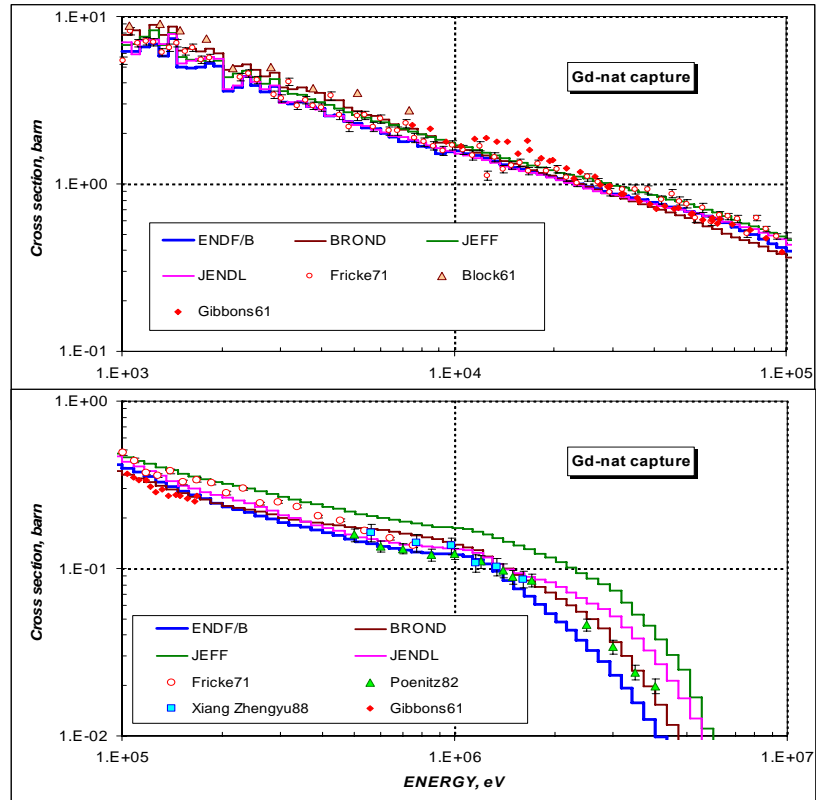


Рисунок 30 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения захвата на Gd-nat в области энергий выше 1 кэВ.

И, наконец, в базе экспериментальных данных EXFOR имелись немногочисленная экспериментальная информация по сечению неупругого рассеяния нейтронов. На рисунке 31 представлено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния и экспериментальных данных.

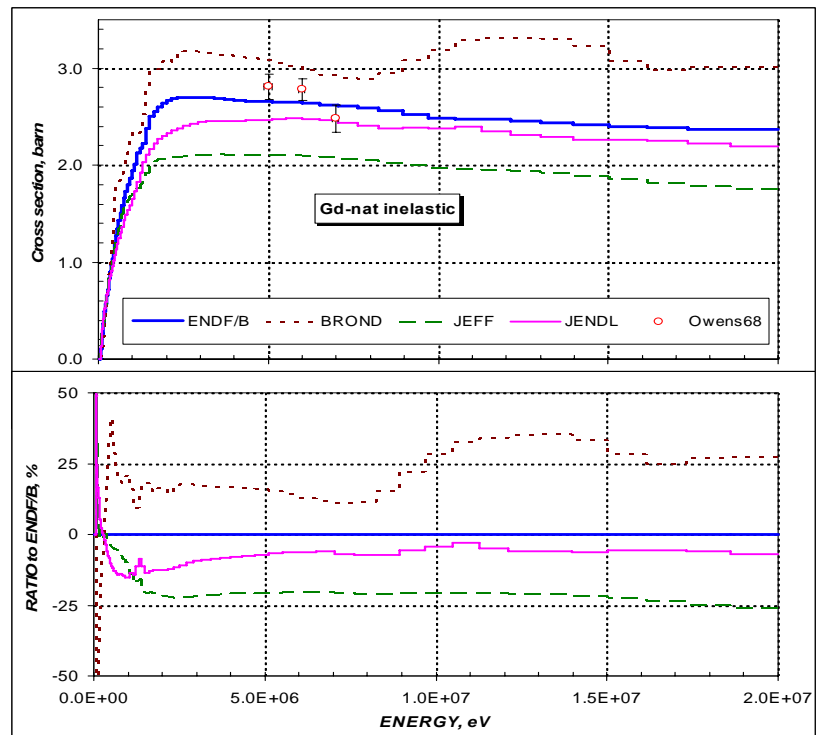


Рисунок 31 – Сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения неупругого рассеяния на Gd-nat.

Из представленной на рисунке 31 информации видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом согласуется с экспериментом Оуэнса (1968). В пределах 10 % с экспериментом согласуется оценка JENDL. Остальные оценки противоречат экспериментальным данным.

Заключение

Принятые в РОСФОНД оценки Herman, Oblozinsky, Sarer, Mughabgh, 2005 (ENDF/B-VIIb1.2) для стабильных изотопов гадолиния не противоречат имеющейся совокупности экспериментальных данных для природной смеси.

Автор заключения – В.Н.Кощеев.