

68. ЭРБИЙ

Природный эрбий включает шесть изотопов. В таблице 1 приводится вклад каждого изотопа в естественную смесь.

Таблица 1 – Состав природного эрбия, %

Изотоп	%
Er-162	0.139
Er-164	1.601
Er-166	33.503
Er-167	22.869
Er-168	26.978
Er-170	14.910

Существует также три долгоживущих изотопа – ^{160}Er ($T_{1/2}=28.6$ ч.), ^{169}Er ($T_{1/2}=9.40$ дн.) и ^{172}Er ($T_{1/2}=49$ ч.).

Для реакторостроения эрбий представляет интерес как элемент, имеющий довольно большое сечение поглощения во всей области энергий, а ^{167}Er характеризуется высоким сечением поглощения тепловых нейтронов (~ 700 барн).

Оценки файла для натурального эрбия нет ни в одной библиотеки оцененных данных. Для изотопов эрбия существует две независимых оценки – старая оценка С.М.Захаровой и др. (1976г.), содержащаяся в библиотеках FOND-2.2 и БРОНД-2, и новая оценка Гарун-ар-Рашида и др. (2000г.), принятая в современных зарубежных библиотеках (ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-3.1).

68.1. Эрбий-160

Испытывает позитронный распад с периодом $T_{1/2}=28.6$ ч.

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

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций (MT=16,17,22,24,33,102,106,107,111). Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

Заключение

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

Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов – 49.0 барн.

Автор отбора данных Забродская С.В.

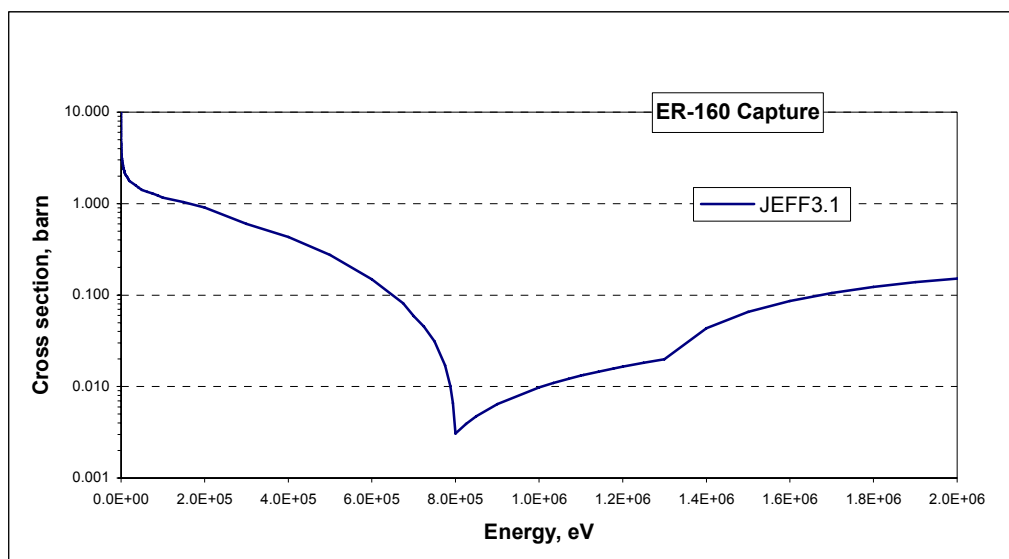


Рис.6.1.Сечение захвата

68.2. Эрбий-162

1.Общие характеристики

Z=68

A=162

Aw= 1.605380+2

Содержание в естественной смеси: 0.139%

Перечень нейтронных реакций

Таблица 1.1

MT	Реакция	JENDL3.3		FOND2.2	
		Q,МэВ	Е _{порог.} , эВ	Q,МэВ	Е _{порог.} , эВ
16	(n,2n) ¹⁶¹ Er	-9.209370+6	9.266740+6	-9.20900+ 6	9.26636+ 6
17	(n,3n) ¹⁶⁰ Er	-1.642670+7	1.652900+7	-1.64260+ 7	1.65280+ 7
22*)	(n,nα) ¹⁵⁸ Dy	1.647910+6			
28	(n,np) ¹⁶¹ Ho	-6.428030+6	6.468070+6	-6.42100+ 6	6.46100+ 6
102	(n,γ) ¹⁶³ Er	6.904700+6		6.90500+ 6	
103	(n,p) ¹⁶² Ho	4.863390+5		4.94400+ 5	
104*)	(n,d) ¹⁶¹ Ho	-4.203460+6	4.229640+6		
105*)	(n,t) ¹⁶⁰ Ho	-6.827720+6	6.870250+6		
107	(n,α) ¹⁵⁹ Dy	8.478280+6		8.48261+ 6	

*) В оценке С.М.Захаровой и др. данных об этих реакциях не содержится.

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

2. Область низких энергий.

На рис. 1.1, 1.2 и 1.3 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в области энергий ниже 1.5 эВ. Налицо противоречивость экспериментальных данных. Данные Вертебного и данные Власова – это данные одной и той же группы, полученные в одном и том же институте – Киевском Институте Ядерных Исследований. Они находятся в противоречии с сечением захвата, измеренным Глэрнсетом в 70 г. При оценке данные, полученные в Киеве, были проигнорированы и оценка опиралась на результат измерения наиболее сечения радиационного захвата Глэрнсетом. Решение представляется достаточно обоснованным¹.

В таблице 1 приводится сечение в тепловой точке.

Таблица 1.2

	JENDL3.3	FOND2.2	Мухабхаб - 2003
Упругое рассеяние	8.002	53.6	
Радиационный захват	18.908	29.0	19±2
Полное сечение	26.911	82.6	

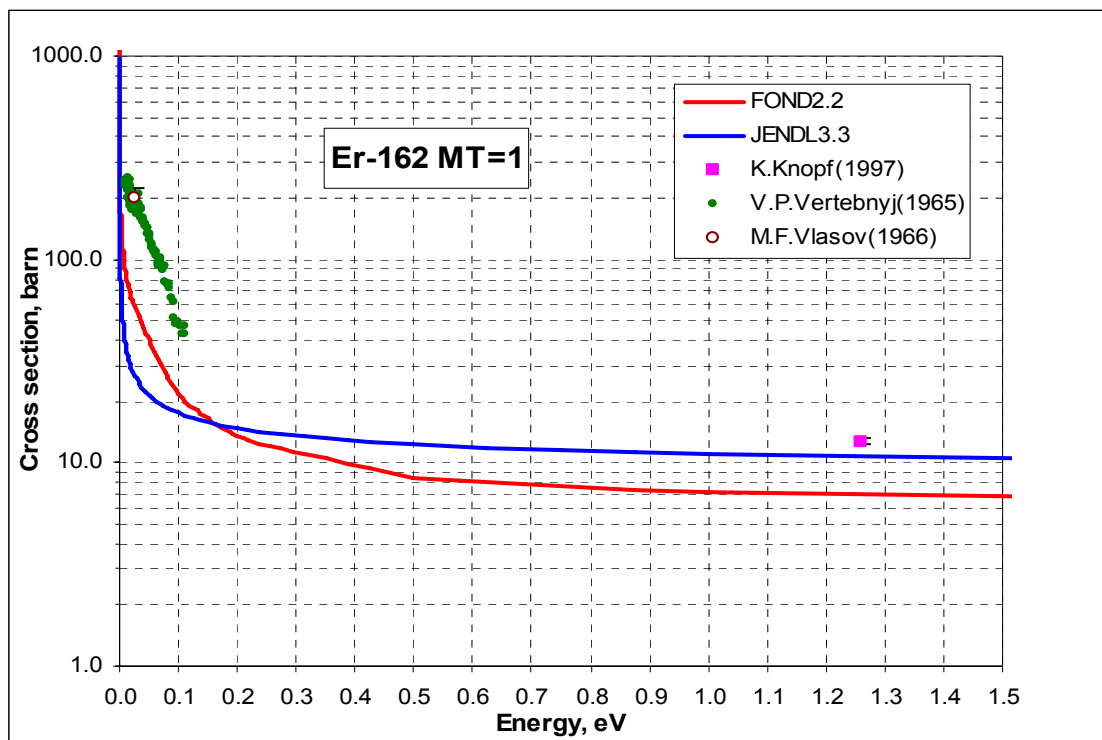


Рис. 1.1 Полное сечение при низких энергиях.

¹ Вероятной причиной противоречивости результатов измерений является недооценка содержания эрбия-167 в образце эрбия-162, что должно было приводить к завышению полного сечения и некоторому занижению сечения упругого рассеяния.

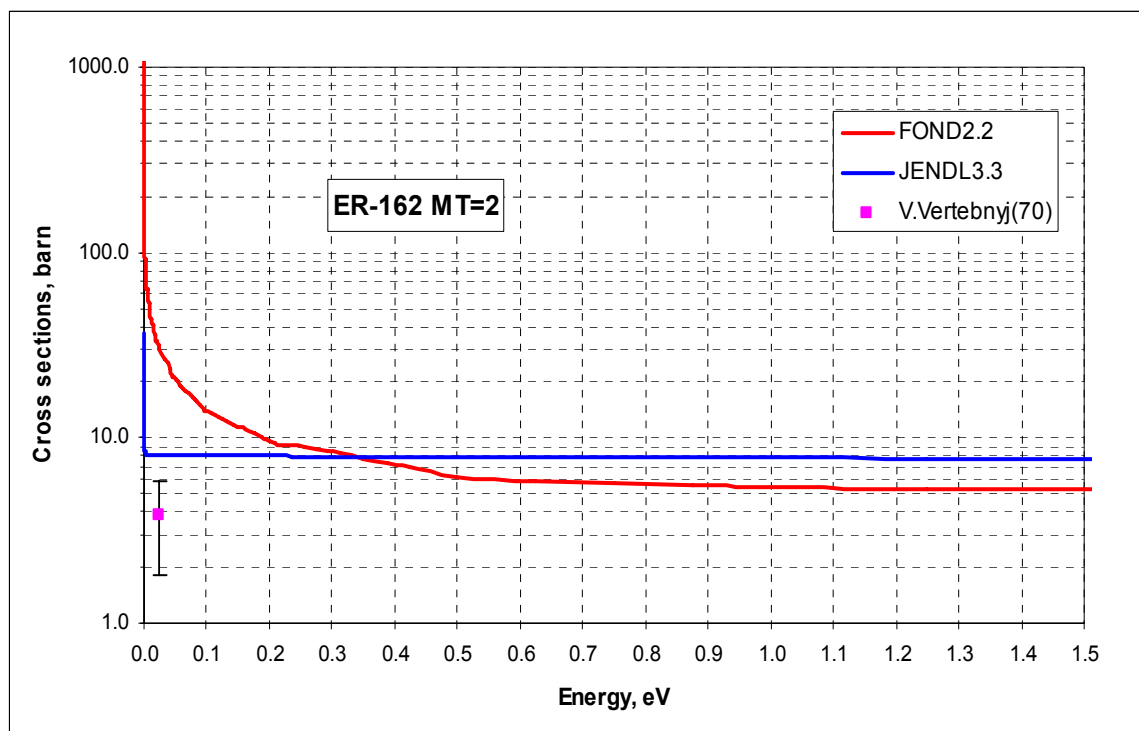


Рис. 1.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях.

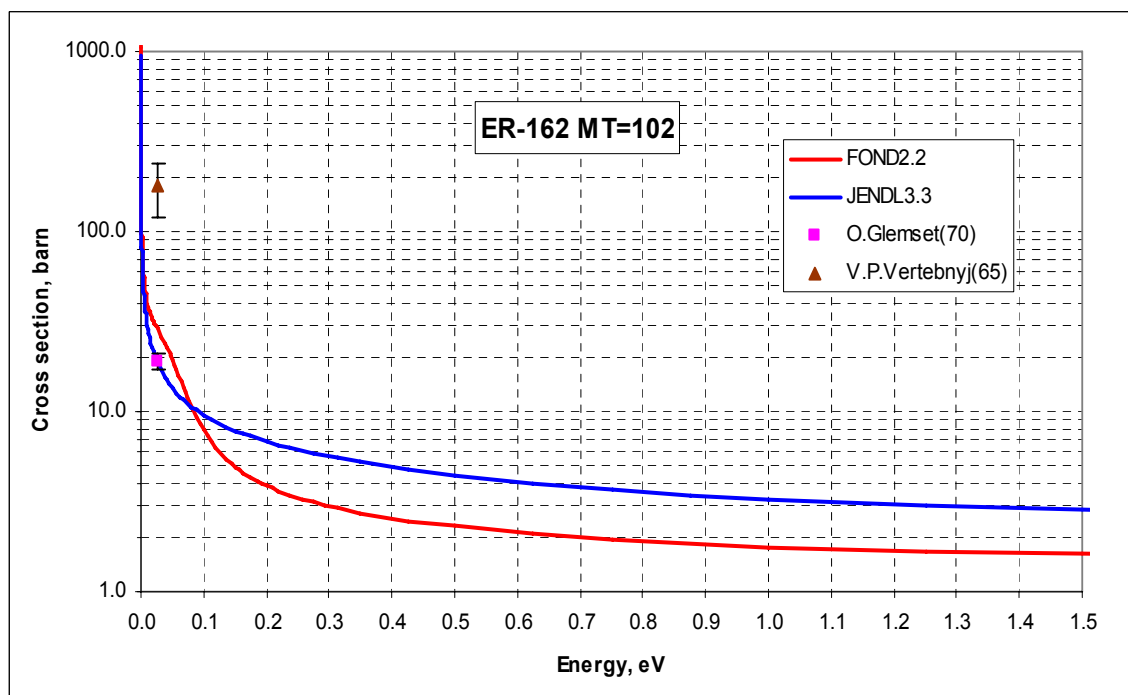


Рис.1.

3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях.

3. Резонансная область.

В обеих оценках, и в FOND-2.2 и в JENDL-3.3, приводятся резонансные параметры для 18-ти s-резонансов, с максимальной энергией 228.5 эВ. Однако область разрешенных резонансов определяется по-разному. В FOND-2.2 с помощью этих параметров описывается ход сечений только до 70 эВ, а далее до 800 эВ лежит область неразрешенных резонансов. В JENDL-3.3 область разрешенных резонансов распространена до 250 эВ, а область неразрешенных резонансов отсутствует. Резонансные

параметры в FOND-2.2 были взяты из работы Мухабхаба 1966 г.², а в JENDL3.3 приведены более поздние данные того же Мухабхаба³, сохранившиеся до 2003 г.⁴ Самым важным изменением явилось иное описание сечений в тепловой области: вместо резонанса при 0.034 эВ введено связанное состояние при 32.5 эВ, что существенно повлияло на тепловые сечения (особенно на сечение упругого рассеяния).

На рис. 1.4 и 1.5 приведены поведения полного сечения и сечения радиационного захвата в области разрешенных резонансов. Как видно, согласие обеих оценок вполне удовлетворительно (не считая некоторых смещений по энергии двух резонансов).

Однако, распространение области разрешенных резонансов до 250 эВ не является вполне оправданным. В самом деле, в интервале между 250 и 70 эВ лежит лишь 7 резонансов из 17 лежащих выше энергии связи нейтрона. Пропуск значительной части резонансов в этом интервале очевиден. Пропущенные резонансы даже при малой нейтронной ширине могут дать существенный вклад в радиационный захват и корректная оценка должна была бы учитывать этот вклад хотя бы в виде нерезонансной подложки. Другим очевидным недостатком новой оценки является отсутствие области неразрешенных резонансов. Устранение этих недостатков, однако, выходит за рамки настоящей работы (особенно с учетом того, что содержание эрбия-162 в естественной смеси мало).

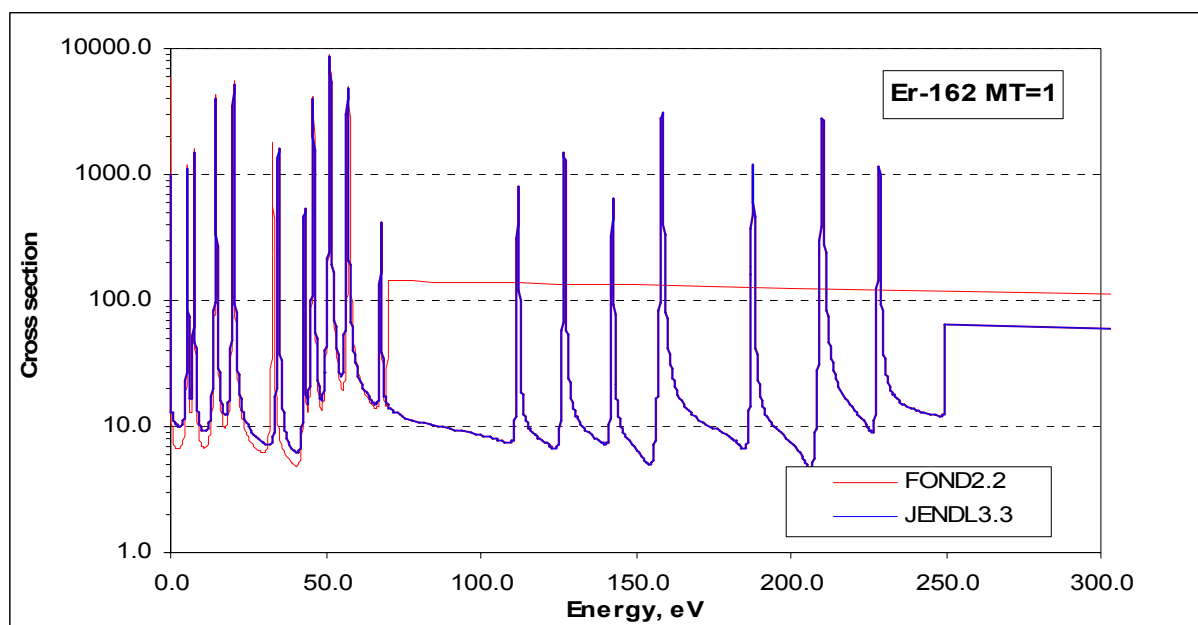


Рис.1. 4. Полное сечение в области разрешенных резонансов.

² BAPS 11,3,334,DB2

³ Neutron Cross Section: Vol.1, Neutron Resonance Parameters and thermal cross Section. Academic Press, 1984.

⁴ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Cross Sections, Resonance integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, IAEA, 2003.

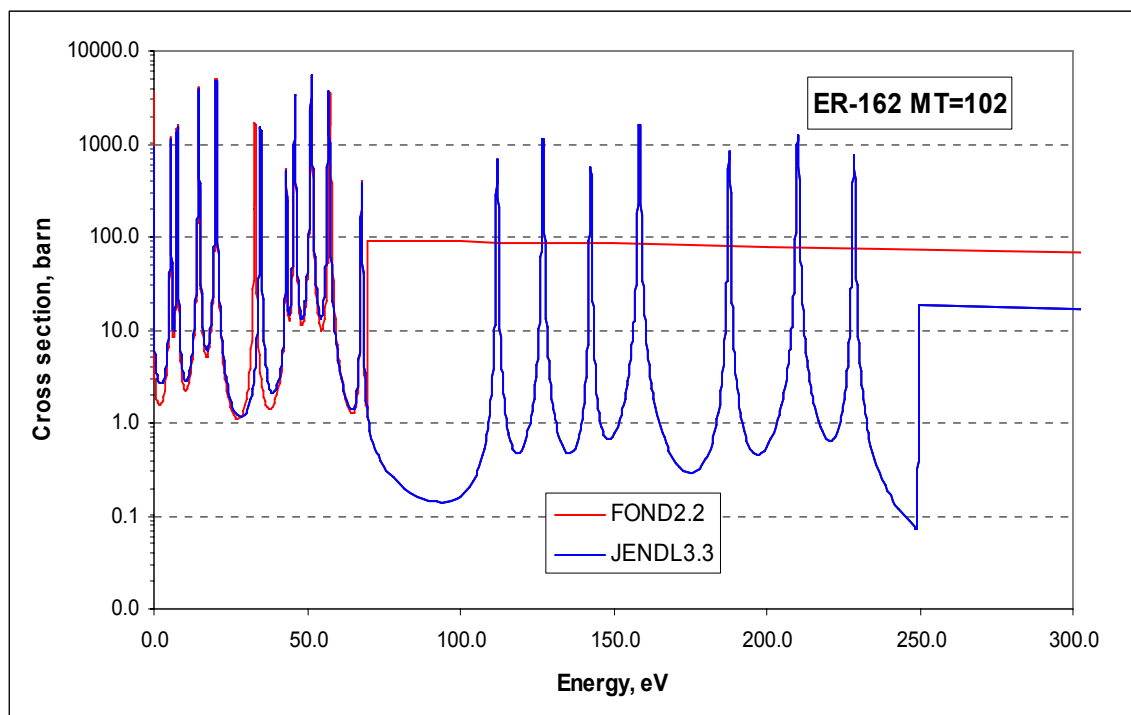


Рис. 1.5. Сечение захвата в области разрешенных резонансов.

4. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов.

На рис. 1.6 сравниваются энергетические поведения сечений основных реакций в этой области. Расхождения между ними сравнительно невелики. Сечение захвата, принятое в новой оценке, подтверждается экспериментальным результатом Трофимова (см. рис.6а). Сечение реакции $(n,2n)$ – целым рядом экспериментальных данных.

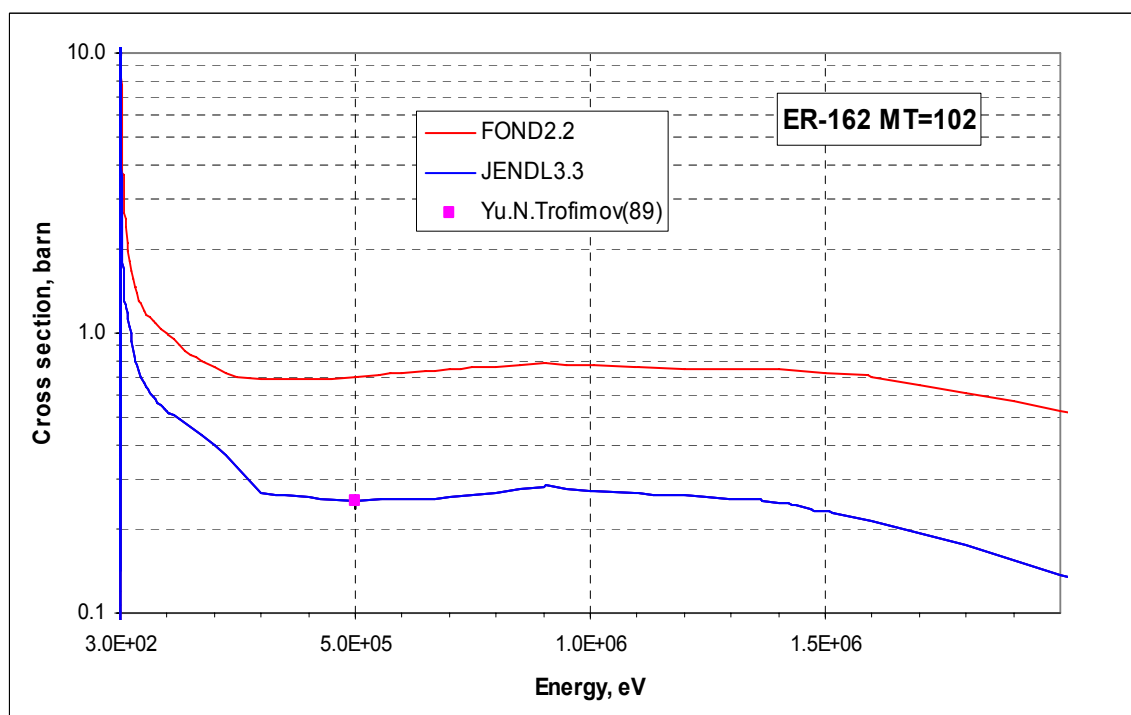


Рис. 1.6а. Сечение радиационного захвата вне резонансной области.

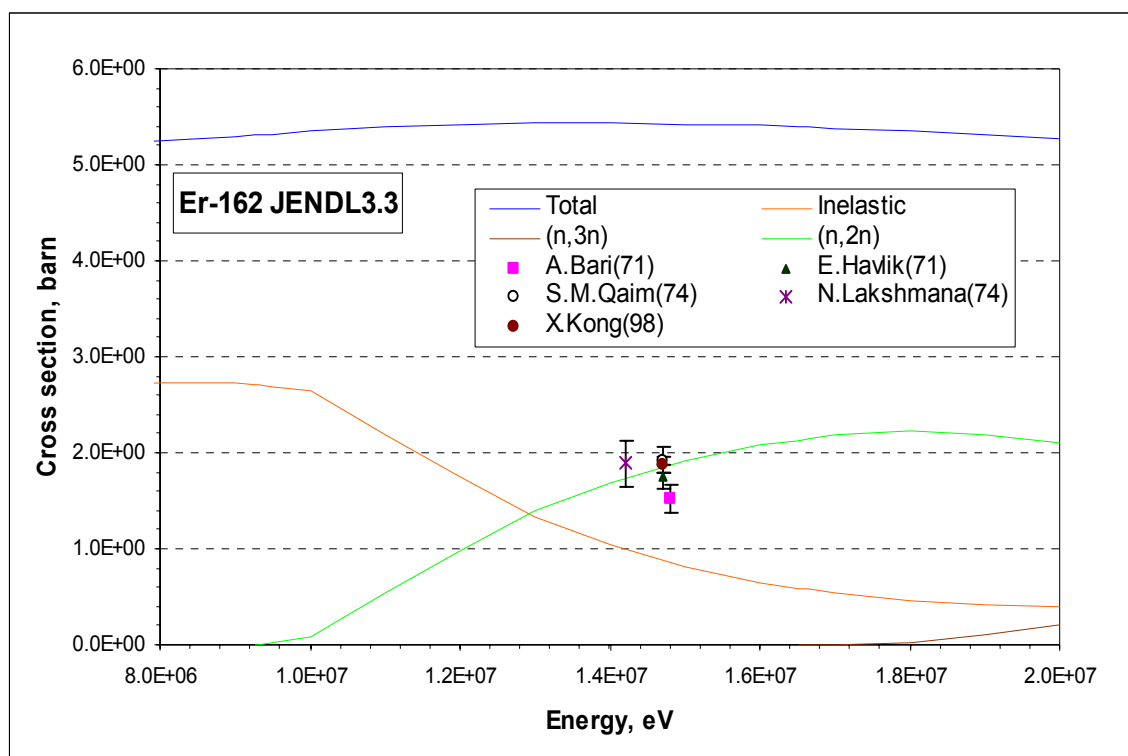


Рис.1.6б. Сечения вне резонансной области.

При описании неупругого рассеяния в новой оценке учтено возбуждение каждого из первых 17 известных уровней ядра-мишени. Начиная с энергии 18-го уровня принимается непрерывный спектр состояний ядра-мишени. В прежней оценке корректно учтено возбуждение лишь первых пяти уровней, а область континуума начинается лишь с 2.4 МэВ (см. табл.2), т.о. неупругое рассеяние в интервале 1.09 – 2.4 МэВ описывалось некорректно – возбуждением лишь двух уровней (на самом деле, как теперь известно, в этом интервале имеется около 30 уровней). Преимущество новой оценки очевидно.

Таблица 2.2. Схемы уровней эрбия-162, учитываемые при неупругом рассеянии.

№ уровня+50	Энергия, МэВ	
	JENDL3.3	FOND2.2
51	0.1020	0.1020
52	0.3295	0.330
53	0.667	0.6640
54	0.9007	0.9010
55	1.0019	1.0020
56	1.0871	1.0940
57	1.0968	2.2520
58	1.1280	2.3220
59	1.1710	
60	1.2863	
61	1.3521	
62	1.3567	
63	1.4123	
64	1.4204	
65	1.4299	
66	1.4597	

67	1.4691	
91	1.5000	2.385

5. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

6. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Фотонные данные есть только в JENDL3.3. Приводится следующая информация: неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени: в файле MF=12 для MT=51-67 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями; реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15. Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

7. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНДе целесообразно принять оценку A.K.M.Harun-ar-Rashid, M.Igashira, T.Ohsaki и K.Shibata (JENDL-3.3).

Принятые оцененные данные желательно откорректировать с учетом замечаний, сделанных в в разделе 3.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

Таблица 1.3

	Total	Elastic	Inelastic	(n,2n)	(n,3n)	(n, γ)	(n,p)	(n, α)
0.0253 эВ	59.288	30.192	0.000	0.000	0.000	29.096	0.000	0.000
	26.954	8.028	0.000	0.000	0.000	18.927	0.000	0.000
Резонансный интеграл	854.616	279.748	0.000	0.000	0.000	574.868	0.000	0.000
	693.985	242.797	0.000	0.000	0.000	451.188	0.000	0.000
Спектр деления ²³⁵ U	6.916	4.304	2.077	0.002	0.000	0.533	0.000	0.000
	6.745	4.803	1.758	0.001	0.000	0.182	0.000	0.000
14 МэВ	5.272	3.098	0.468	1.622	0.000	0.072	0.012	0.001
	5.435	2.689	1.047	1.683	0.000	0.002	0.009	0.003

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.3. Эрбий-164

1. Общие характеристики

$Z=68$

$A=164$

$A_w = 1.62521+2$

Содержание в естественной смеси: **1.61%**

Перечень нейтронных реакций

Для Er-164 существует две независимых оценки – старая оценка С.М.Захаровой и др. (1976г.), содержащаяся в библиотеках FOND-2.2 и БРОНД-2, и новая оценка Гарун-ар-Рашида и др. (2000г.), принятая в современных зарубежных библиотеках (ENDF/B-VII, JENDL-3.3, JEFF-3.1).

Таблица 2.1

MT	Реакция	JENDL3.3	
		Q, МэВ	E _{порог.} , эВ
16	$(n,2n)^{163}\text{Er}$	-8.846370+6	8.900800+6
17	$(n,3n)^{162}\text{Er}$	-1.574770+7	1.584460+7
22	$(n,\alpha)^{160}\text{Dy}$	1.306910+6	
28	$(n,np)^{163}\text{Ho}$	-6.854030+6	6.896200+6
102	$(n,\gamma)^{165}\text{Er}$	6.649700+6	
103	$(n,p)^{164}\text{Ho}$	-2.306610+5	2.320800+5
104	$(n,d)^{163}\text{Ho}$	-4.629460+6	4.657950+6
105	$(n,t)^{162}\text{Ho}$	-6.778720+6	6.820430+6
107	$(n,\alpha)^{161}\text{Dy}$	7.760280+6	

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.2.1-2.2 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в тепловой области, рассчитанные по оцененным резонансным параметрам. При 0.0253 эВ полное сечение в новой оценке не согласуется с экспериментами В.П.Вертебного(1965) и Мухабхаба(67), поскольку отдает предпочтение измерениям сечения радиационного захвата и рассеяния. Эксперимент O.Glemset(70) точно лежит на кривой сечения. Два эксперимента В.П.Вертебного(1965 и 1975) для сечения упругого рассеяния практически совпадают и лежат ближе к новой оценке, полученной, естественно, с учетом результатов измерений нейтронных сечений в области разрешенных резонансов.

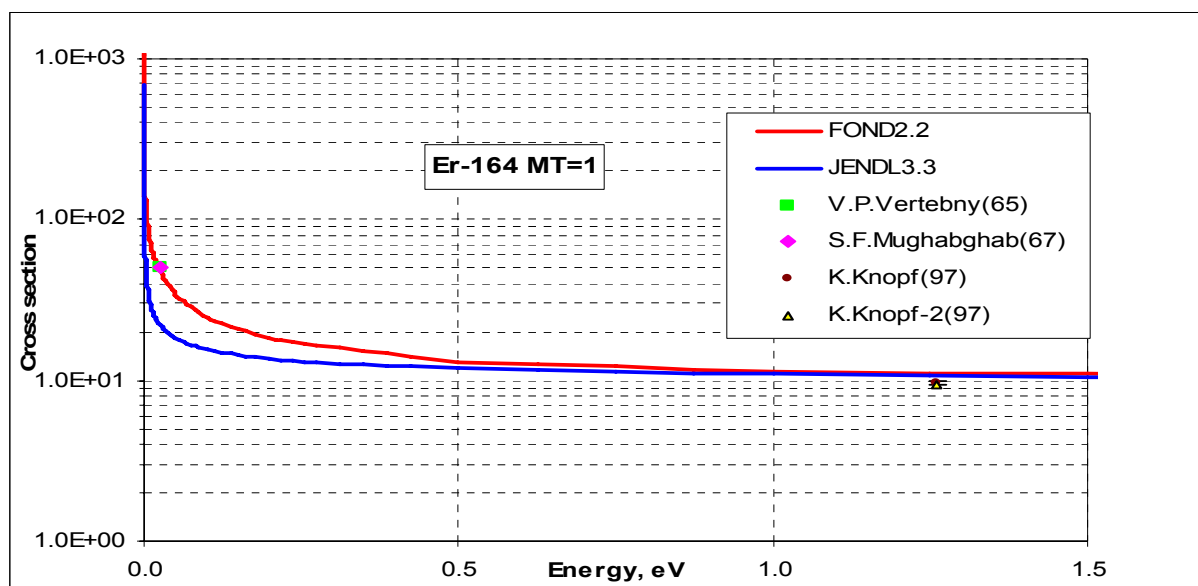


Рис.2.1. Полное сечение при низких энергиях

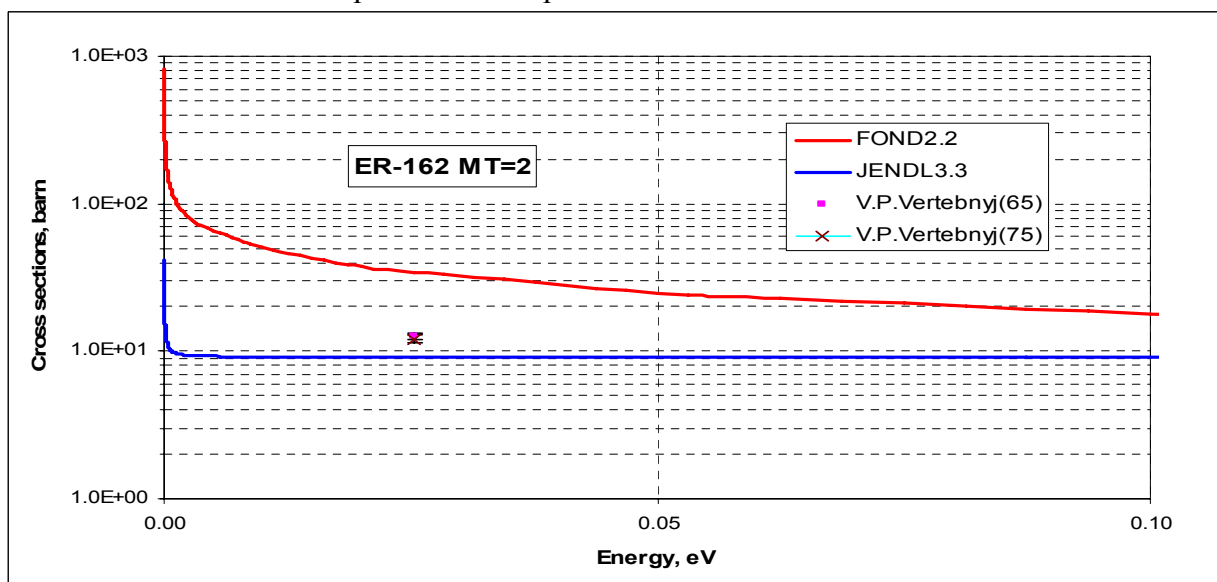


Рис.2.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

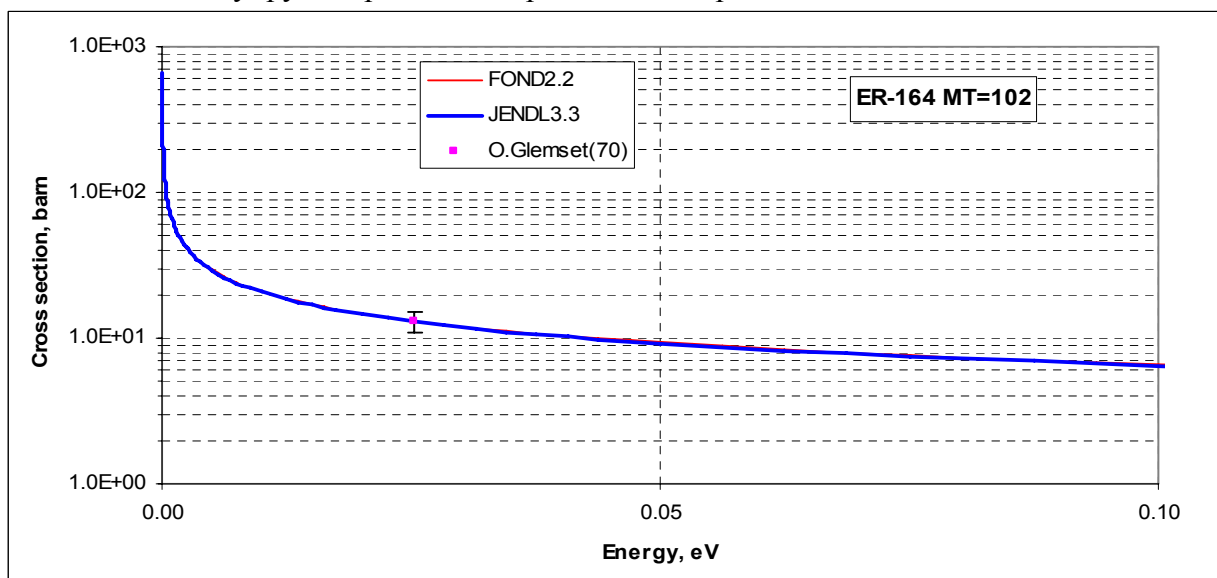


Рис.2.3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях

2. Область разрешенных резонансов

Область разрешенных резонансов в FOND2.2 простирается до 230 эВ; в JENDL3.3 - до 800 эВ. Резонансные параметры в FOND-2.2 были взяты из работы Мухабхаба 1966 г.⁵, а в JENDL3.3 приведены более поздние данные того же Мухабхаба⁶, сохранившиеся до 2003 г.⁷

На рис.6.4. и 6.5. представлены полное сечение и сечение радиационного захвата в области разрешенных резонансов. Экспериментальных данных, имеющиеся в этой области⁸, в EXFOR.

Распространение области разрешенных резонансов до 800 эВ в оценке ENDF/B-VII не является вполне оправданным. В самом деле, в интервале между 800 и 230 эВ лежит лишь 6 резонансов из 17 лежащих выше энергии связи нейтрона. Пропуск значительной части резонансов в этом интервале очевиден. Пропущенные резонансы даже при малой нейтронной ширине могут дать существенный вклад в радиационный захват и корректная оценка должна была бы учитывать этот вклад хотя бы в виде нерезонансной подложки. Другим очевидным недостатком новой оценки является отсутствие области неразрешенных резонансов. Устранение этих недостатков, однако, выходит за рамки настоящей работы (особенно с учетом того, что содержание эрбия-162 в естественной смеси мало).

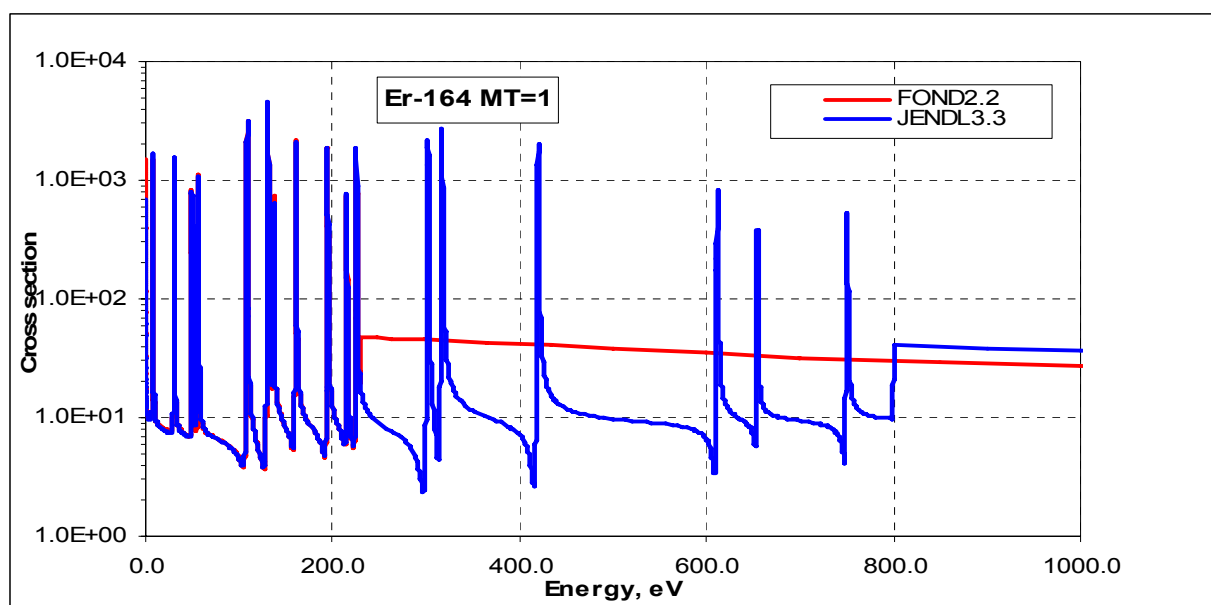


Рис.2.4. Полное сечение в области разрешенных резонансов.

⁵ BAPS 11,3,334,DB2

⁶ Neutron Cross Section: Vol.1, Neutron Resonance Parameters and thermal cross Section. Academic Press, 1984.

⁷ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Cross Sections, Resonance integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, IAEA, 2003.

⁸ Liou et al. Phys.Rev/C,5,974?1973.

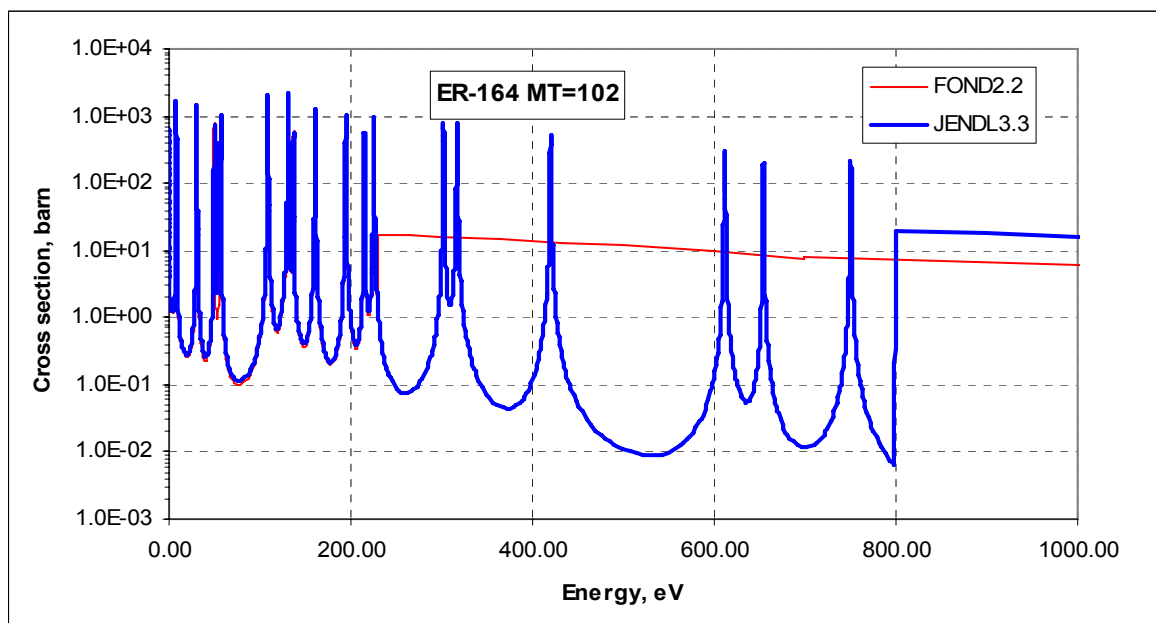


Рис.2.5. Сечение радиационного захвата в области разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов описана только в FOND-2.2 и то только от 230 до 700 кэВ. Средние резонансные параметры не зависят от энергии.

3. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечение оценивались на основе модельных расчетов. На рис.2.6.-2.7 сравниваются поведение полного сечения и сечения радиационного захвата с экспериментами. Видно, что новая оценка полного сечения JENDL3.3 ориентировалась на эксперимент А.Н.Демина(1977). Результат Ю.Н.Трофимова(1987) для сечения радиационного захвата при 1 МэВ лежит существенно ниже оцененных данных..

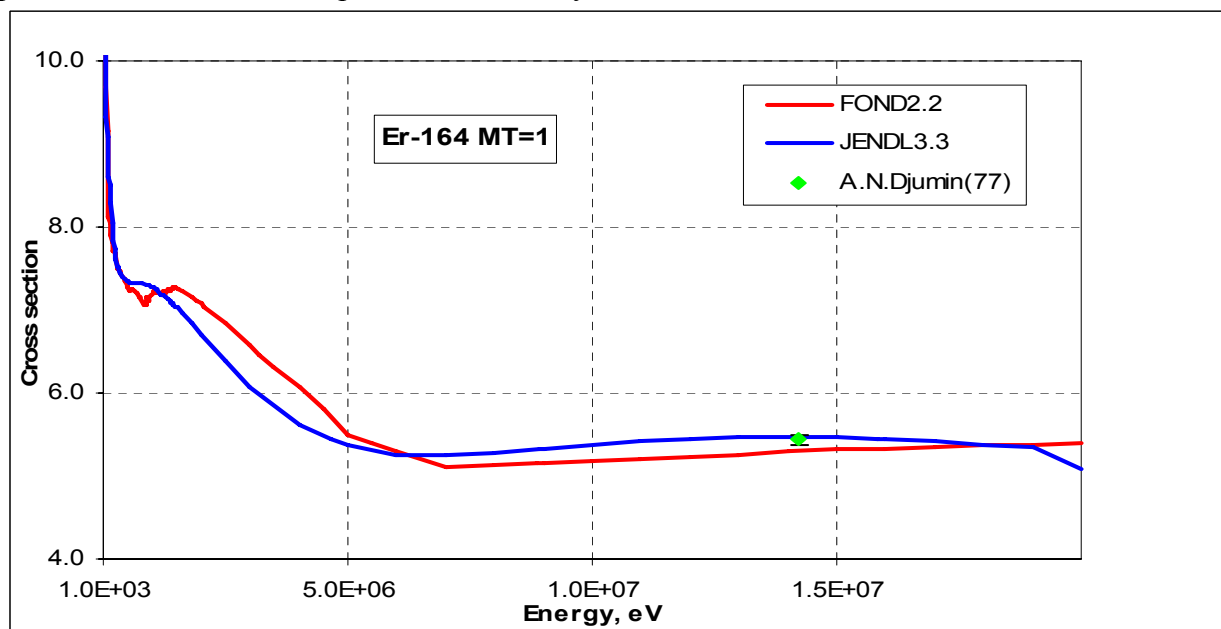


Рис.2.6. Полное сечение вне резонансной области

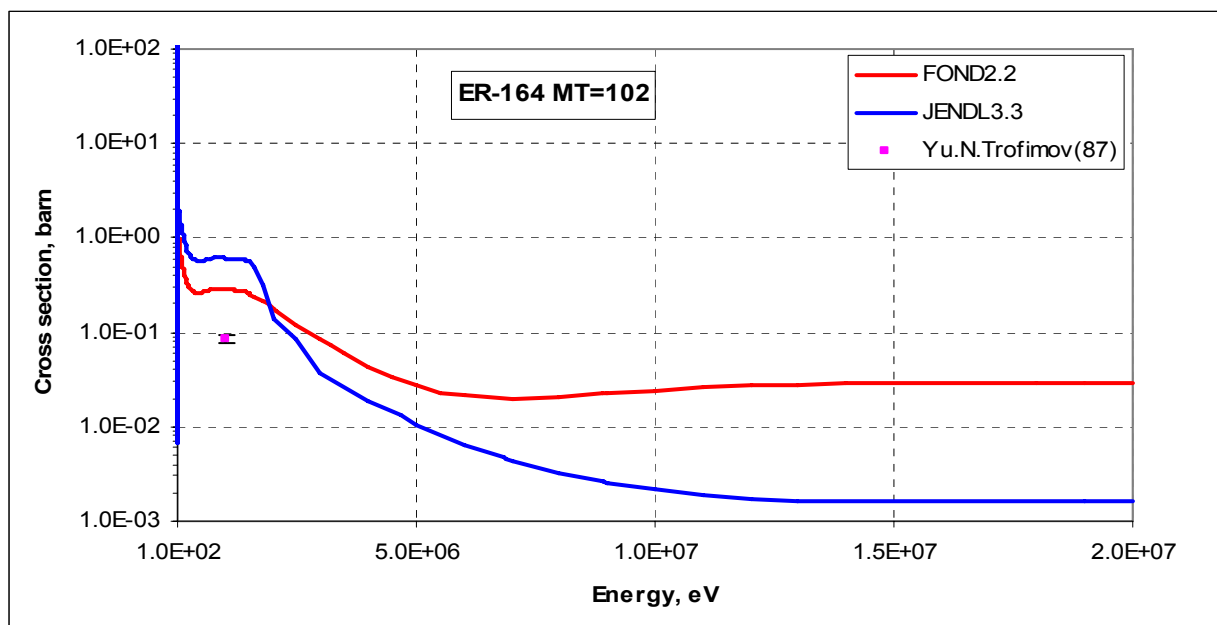


Рис.2.7. Сечение радиационного захвата вне резонансной области

Остальные основные реакции приводятся на рис. 2.8

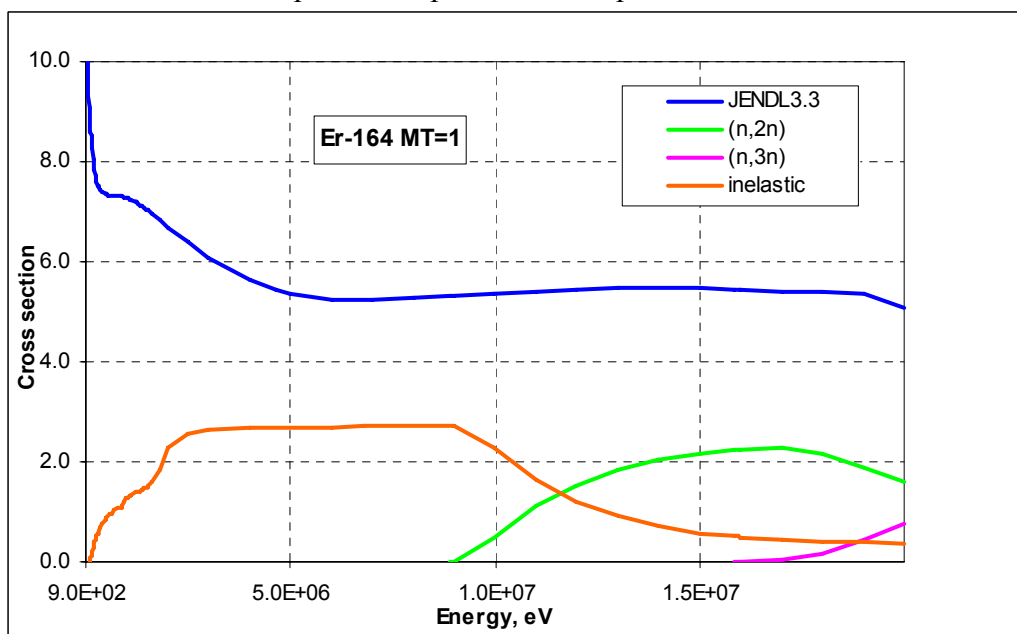


Рис.2.8. Сечения вне резонансной области

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:

неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:

в файле MF=12 для MT=51-66 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;

реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов –

множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: Несмотря на сомнения в корректности оценки сечения захвата быстрых нейтронов (см. выше раздел 5 и рис. 2.7), в РОСФОНД принимается оценка JENDL-3.2 (=ENDF/B-7), полнее учитывающая данные о резонансной структуре сечений.

Принятые оцененные данные желательно откорректировать с учетом замечаний, сделанных в в разделе 2.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

	Total	Elastic	Inelastic	(n,2n)	(n,3n)	(n, γ)	(n,p)	(n, α)
0.0253 эВ	47.4262	34.3034	0.0000	0.0000	0.0000	13.1228	0.0000	0.0000
	22.0902	9.1285	0.0000	0.0000	0.0000	12.9617	0.0000	0.0000
Резонансный интеграл	327.2890	182.6760	0.0054	0.0000	0.0000	144.6080	0.0000	0.0000
	340.9230	174.3130	0.0017	0.0000	0.0000	166.6090	0.0000	0.0000
Спектр деления ²³⁵ U	6.9420	4.8610	1.8751	0.0021	0.0000	0.2038	0.0000	0.0000
	6.7853	4.6716	1.7362	0.0027	0.0000	0.3748	0.0000	0.0000
14 МэВ	5.3000	3.4055	0.3560	1.5030	0.0000	0.0290	0.0060	0.0005
	5.4688	2.7112	0.7155	2.0304	0.0000	0.0016	0.0074	0.0015

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.4. Эрбий-166

1. Общие характеристики

1.1. $Z=68$

1.2. $A=166$

1.3. $A_w= 1.645050+2$

1.4. Содержание в естественной смеси: **33.61%**

1.5. Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-166 представлены в двух библиотеках FOND2.2(1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с коррекцией резонансных параметров. В таблице по нейтронным реакциям, исходя из вышесказанного, приводятся энергии реакций и их пороги.

Таблица 4.1

MT	Реакция	JENDL3.3	
		Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}, \text{эВ}$
16	$(n,2n)^{165}\text{Er}$	-8.475370+6	8.526890+6
17	$(n,3n)^{164}\text{Er}$	-1.512570+7	1.521760+7
22	$(n,\alpha)^{164}\text{Dy}$	8.309080+5	
28	$(n,np)^{165}\text{Ho}$	-7.316030+6	7.360500+6
32	$(n,nd)^{164}\text{Ho}$	-1.313180+7	1.321160+7
102	$(n,\gamma)^{167}\text{Er}$	6.436700+6	
103	$(n,p)^{166}\text{Ho}$	-1.071660+6	1.078170+6
104	$(n,d)^{165}\text{Ho}$	-5.091460+6	5.122410+6
105	$(n,t)^{164}\text{Ho}$	-6.873720+6	6.915500+6
107	$(n,\alpha)^{163}\text{Dy}$	7.102280+6	

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.4.1(аб), 4. 2 и 4.3 приведены оцененные полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в области низких энергий, а также соответствующие экспериментальные данные. Последние, как видно, весьма противоречивы. Результаты измерений сечения захвата различаются в разы; в то же время данные двух последних работ (Кнопфа и Данона) прекрасно согласуются между собой и оцененные кривые опираются, естественно, на них. Вероятной причиной разброса экспериментальных данных являлась неточность знания изотопного состава образца. Единственная точка при 1.26 эВ точно совпала с расчетным значением. В тепловой же точке похоже было отдано предпочтение экспериментам на захвате К.Кнопфа(1997) и У.Данона(1998). В ENDF/B-7 упругое рассеяние также точно совпала с измерением К.Кнопфа(1997).

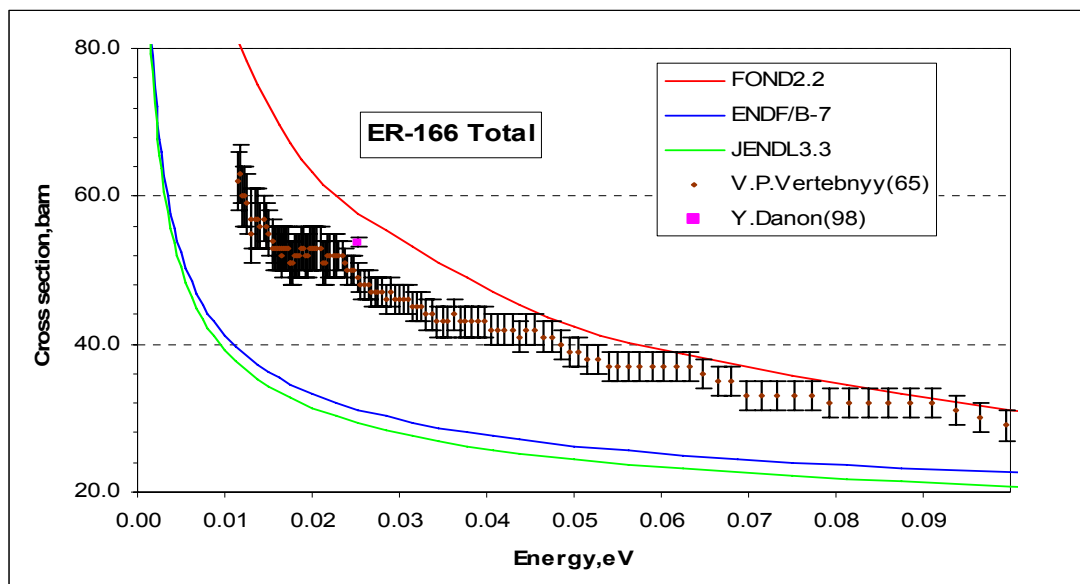


Рис.4.1.a Полное сечение Er-166 при низких энергиях.

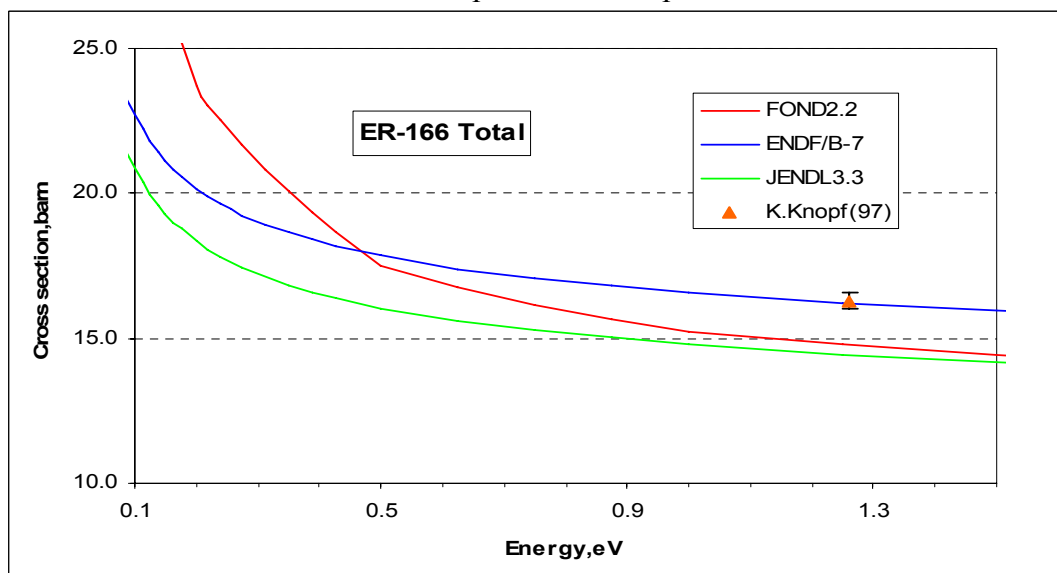


Рис. 4.1.b Полное сечение Er-166 при низких энергиях.

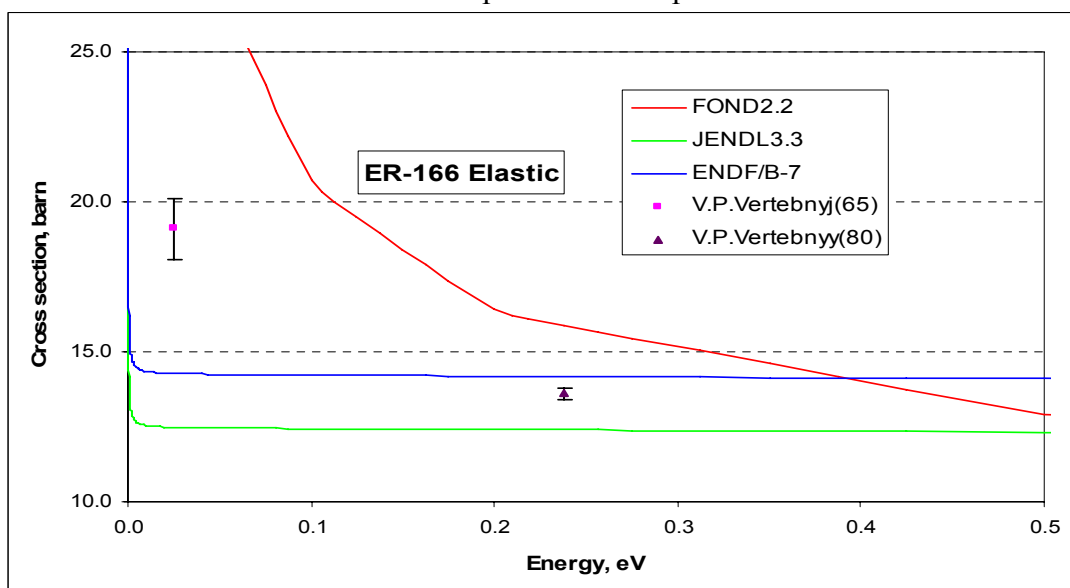


Рис. 4.2. Сечение упругого рассеяния Er-166 при низких энергиях

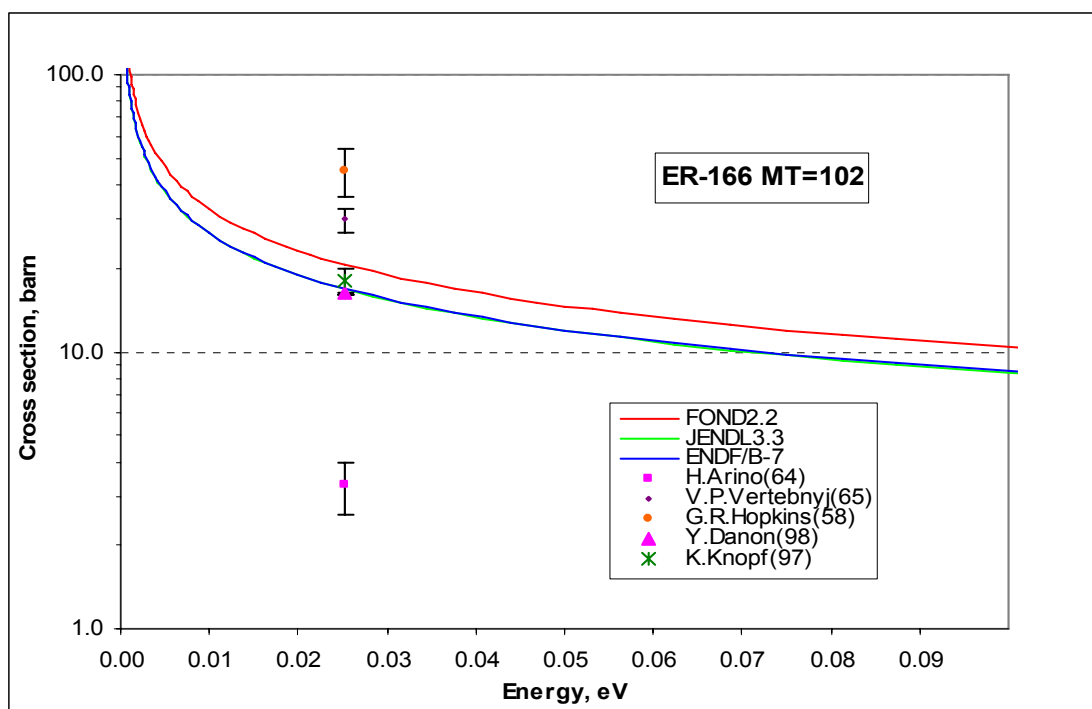


Рис. 4.3. Сечение радиационного захвата Er-166 при низких энергиях

В таблице 4.2 приводятся сечения при 0.0253эВ.

Таблица 3.2

	FOND2.2	JENDL3.3	ENDF/B-7
Elastic	37.1	12.448	14.236
Capture	20.6	16.765	16.872
Total		29.213	31.107

2. Резонансная область

Описание области разрешенных резонансов приводится в Таблице 4.2. Резонансные параметры в FOND-2.2 были взяты из работы Мухабхаба 1966 г.⁹, а в JENDL3.3 приведены более поздние данные того же Мухабхаба¹⁰, сохранившиеся до 2003 г.¹¹, а в ENDF/B-7 – приводятся уже новые данные Мухабхаба(2006г) для более широкой области энергий.

⁹ BAPS 11,3,334,DB2

¹⁰ Neutron Cross Section:Vol.1, Neutron Resonance Parameters and thermal cross Section. Academic Press, 1984.

¹¹ S.F.Mughabghab. Thermal Neutron Cross Sections, Resonance integrals and G-factors. INDC(NDS)-440, IAEA,2003.

Таблица 4.2

	FOND2.2	JENDL3.3	ENDF/B-7
Граница области разрешенных резонансов	4.2 кэВ	3.0 кэВ	5.0 кэВ
Авторы оценки	Мюллер(1960) Мухабхаб(1966)	Landolt-Boernstein(1998) Y.Danon(1998) Мухабхаб(1984)	Мухабхаб(2006)
Радиус рассеяния	0.767	0.8295	0.810
Количество разрешенных резонансов	175	78	174
Область нерешенных резонансов	4.2 ÷ 6 кэВ	нет	нет

На рис. 4.4а,б приведены поведения полного сечения в области разрешенных резонансов.

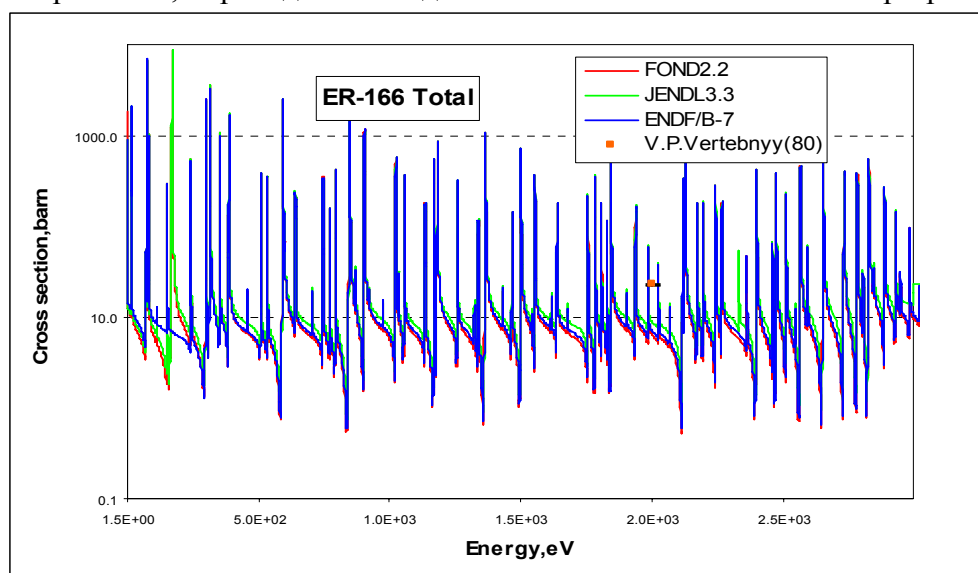


Рис. 4.4.а Полное сечение Er-166 до 3 кэВ

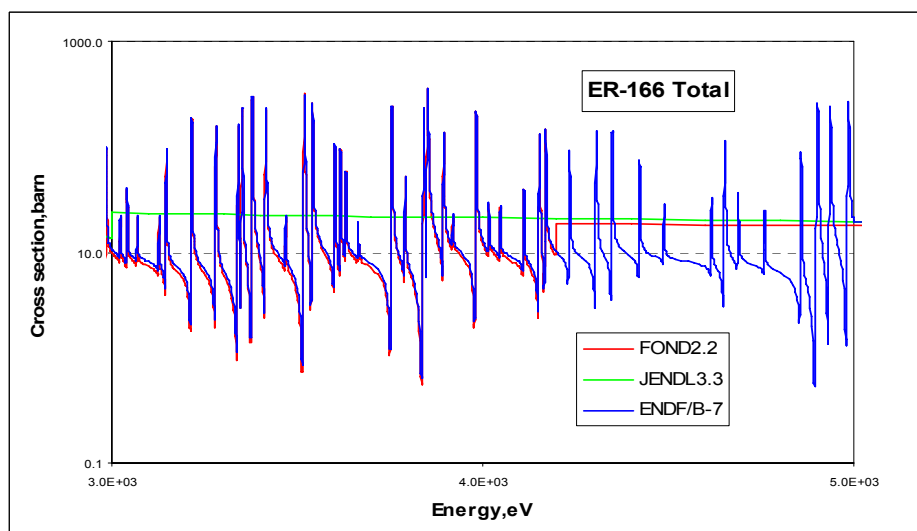


Рис. 4.4.б Полное сечение Er-166 до 5 кэВ

Первый рисунок полного сечения приведен до 3 кэВ – границы разрешенной резонансной области в JENDL3.3. При 2 кэВ есть экспериментальная точка В.П.Вертебного(1980). Следующий рисунок – до границы разрешенной резонансной области в ENDF/B-7. При 4.2 кэВ наблюдается граница и в FOND2.2.

Область неразрешенных резонансов описана только в FOND2.2 до 6 кэВ.

3.Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов. На рис.4.5 а,b приводится сравнение сечение захвата с экспериментальными данными. Начиная с 5 кэВ оценки JENDL3.3. и ENDF/B-7 совпадают.

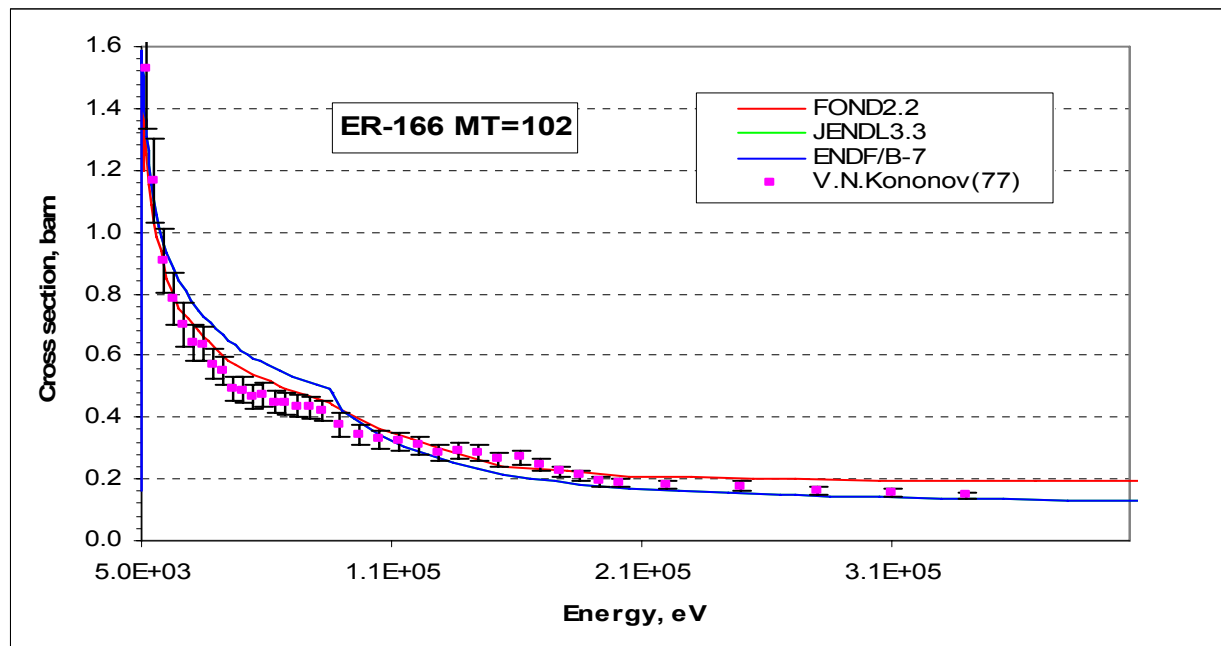


Рис. 4.5.а Сечение радиационного захвата вне резонансной области

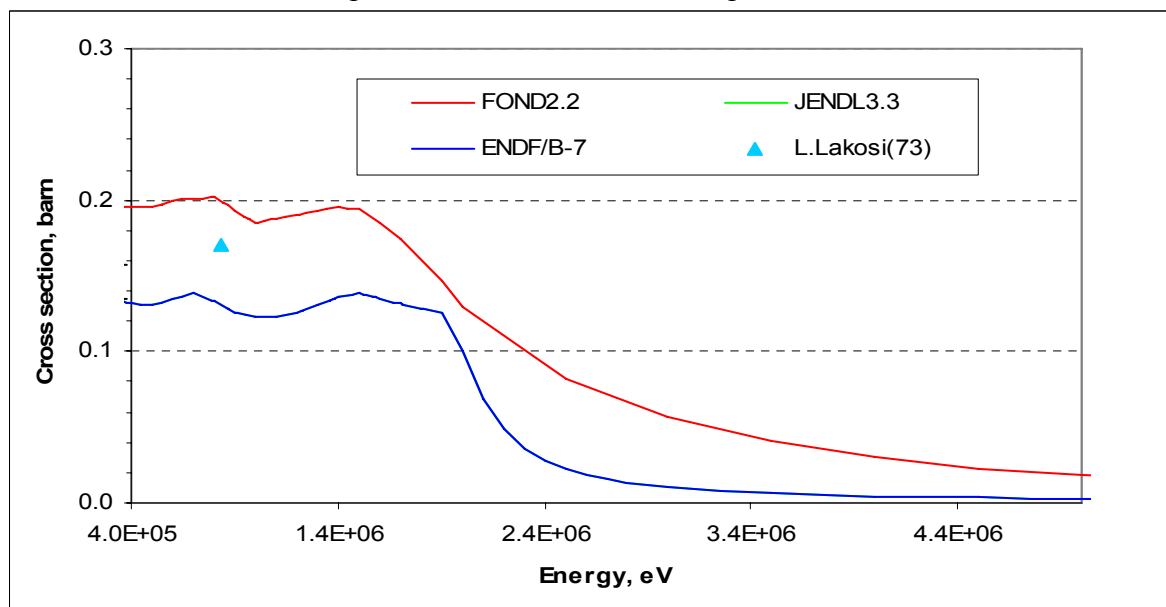


Рис. 4.5.б Сечение радиационного захвата вне резонансной области

Сечения, принятые в JENDL3.3 (ENDF/B-7), описывают экспериментальные данные отнюдь не идеально. Ясно, что результатам Кононова и Лакоси невозможно

удовлетворить одновременно. Однако поведение сечения захвата вблизи порога неупругого рассеяния, очевидно, можно было бы описать лучше, чем это сделано в последней оценке. В области сотен кэВ, оцененная кривая лежит ниже всех экспериментальных данных.

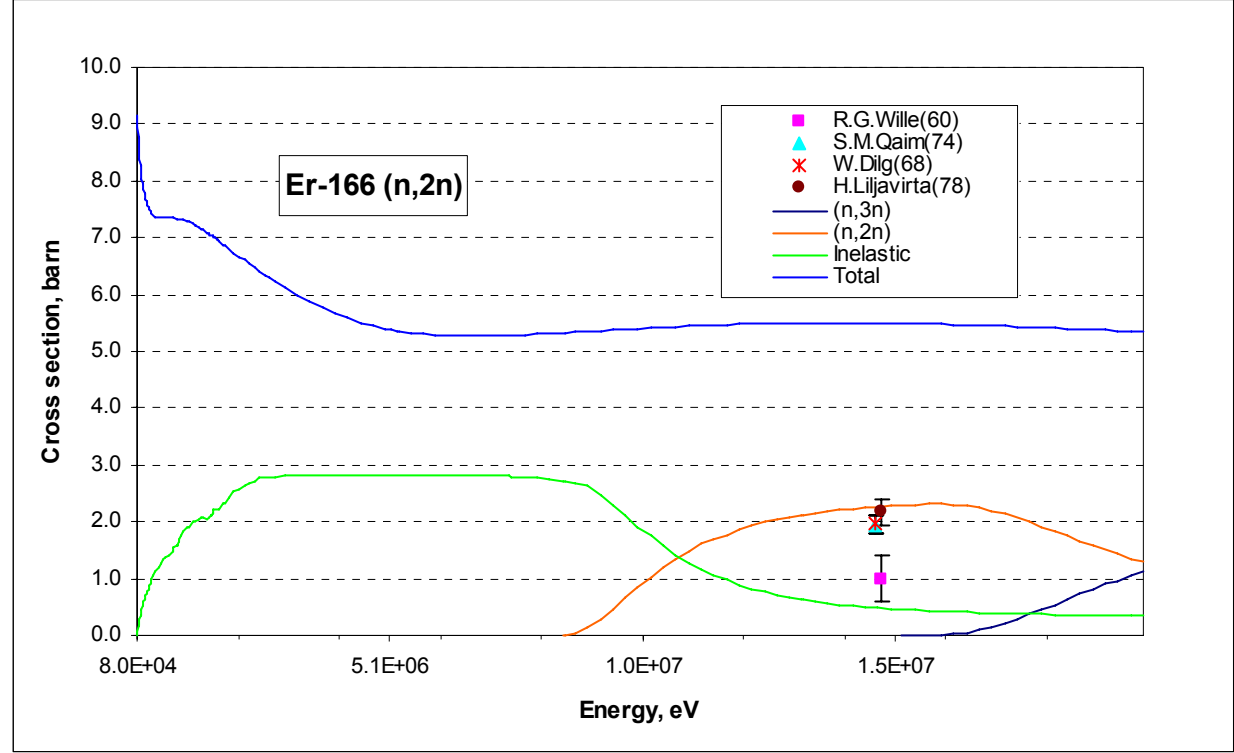


Рис. 4.6. Сечение вне резонансной области

На рис 4.6 приводятся с полным все остальные существенные реакции:

(n,2n),(n3n),неупругое рассеяние. Все экспериментальные данные относятся только к реакции (n,2n). Хорошее согласие со всеми экспериментом наблюдается при энергии 14 МэВ, кроме данных R.G.Wille(1960г).

При новом описании оценки неупругого рассеяния учтено возбуждение каждого из 24 уровней, вместо 7 уровней ранее в FOND2.2.

Таблица 4.4 Схема уровней ER-166 при неупругом рассеянии

№ уровня	Энергия, МэВ	
	JENDL3.3	FOND2.2
51	0.0806	0.081
52	0.2650	0.265
53	0.5455	0.545
54	0.7859	0.787
55	0.8594	0.86
56	0.9112	0.957
57	0.9562	1.076
58	1.0753	
59	1.2160	
60	1.3496	
61	1.3760	
62	1.4582	
63	1.4599	
64	1.5134	
65	1.5284	

66	1.5557	
67	1.5722	
68	1.5962	
69	1.6624	
70	1.6658	
71	1.6788	
72	1.6923	
73	1.7031	
74	1.7870	

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Фотонные данные есть в JENDL3.3(ENDF/B7). Приводится следующая информация: неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени: в файле MF=12 для MT=51-74 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями; реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНД целесообразно принять оценка JENDL-3.3 (=ENDF/B-7), содержащую последние данные в резонансной области. Эту оценку при желательно уточнить: ввести область неразрешенных резонансов, позволяющую описать ход нейтронных сечений до порога неупругого рассеяния; пересмотреть оценку сечений выше этого порога, обеспечивающую стыковку на пороге и лучше согласующуюся с экспериментальными данными при более высоких энергиях.

В файл включены данные об образовании долгоживущего ($T_{1/2}=1200$ лет) изомера $^{166}\text{Ho}^m$ в реакции (n,p) на основе данных EAF-2003.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

	Total	Elastic	Inelastic	(n,2n)	(n,3n)	(n, γ)	(n,p)	(n, α)
0.0253 эВ	57.7329	37.1240	0.0000	0.0000	0.0000	20.6089	0.0000	0.0000
	31.1646	14.2796	0.0000	0.0000	0.0000	16.8849	0.0000	0.0000
Резонансный интеграл	352.6470	242.9210	0.0242	0.0000	0.0000	109.7020	0.0000	0.0000
	303.4590	205.8360	0.0161	0.0000	0.0000	97.6070	0.0000	0.0000
Спектр деления ^{235}U	6.8838	4.7182	2.0189	0.0029	0.0000	0.1438	0.0000	0.0000
	6.8141	4.6475	2.0671	0.0039	0.0000	0.0956	0.0000	0.0000
14 МэВ	5.2734	3.2292	0.3260	1.6940	0.0000	0.0190	0.0048	0.0004
	5.5021	2.7553	0.5357	2.2023	0.0000	0.0019	0.0054	0.0009

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.5. Эрбий-167

1. Общие характеристики

Z=68

A=167

Aw= 1.654980+2

Содержание в естественной смеси: **22.93%**

Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-167 представлены в двух библиотеках: FOND2.2 (BROND2,1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с коррекцией области разрешенных резонансов, поэтому на рисунках в этой области будут представлены три оценки. В таблице 4.1 по нейтронным реакциям приводятся энергии реакций (Q) и пороги из библиотек FOND2.2 и JENDL3.3(ENDF/B-7).

Таблица 4.1

MT	Реакция	JENDL3.3	
		Q, МэВ	E _{порог.} , эВ
16	(n,2n) ^{166}Er	-6.435370+6	6.474260+6
17	(n,3n) ^{165}Er	-1.491070+7	1.500080+7
22	(n, α) ^{163}Dy	6.669080+5	
28	(n,np) ^{166}Ho	-7.507030+6	7.552390+6
32	(n,nd) ^{165}Ho	-1.152680+7	1.159640+7
102	(n, γ) ^{168}Er	7.770700+6	
103	(n,p) ^{167}Ho	-2.246610+5	2.260180+5
104	(n,d) ^{166}Ho	-5.282460+6	5.314380+6
105	(n,t) ^{165}Ho	-5.268720+6	5.300560+6
107	(n, α) ^{164}Dy	8.325280+6	

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.1, 2 и 3 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния до 1 эВ. Для Er-167 важны два первых резонанса 0.46 и 0.584 эВ. Полное сечение в оценках JENDL3.3 и ENDF/B-7 проходит по точкам, полученным в

измерениях Н.В.Моллера, чего нельзя сказать про оценку ФОНД-2.2, в которой принята параметризация, выполненная самим Моллером. Единственный эксперимент В.П.Вертебного(1965) для упругого рассеяния существенно отличается от всех расчетных кривых сечения. Вполне возможно, что сечение упругого рассеяния даже в последней оценке, принятой в ENDF/B-VII, занижено. Однако, поскольку роль упругого рассеяния на эрбии-167 ничтожно мала, острая необходимость в переоценке отсутствует.

В таблице 4.2 приводятся сечения в тепловой точке.

Таблица 4.2

	FOND2.2	JENDL3.3	ENDF/B-7
Упругое рассеяние	26.8	1.335	2.4509
Радиационный захват	653.	642.274	649.00
Полное сечение		643.609	651.45

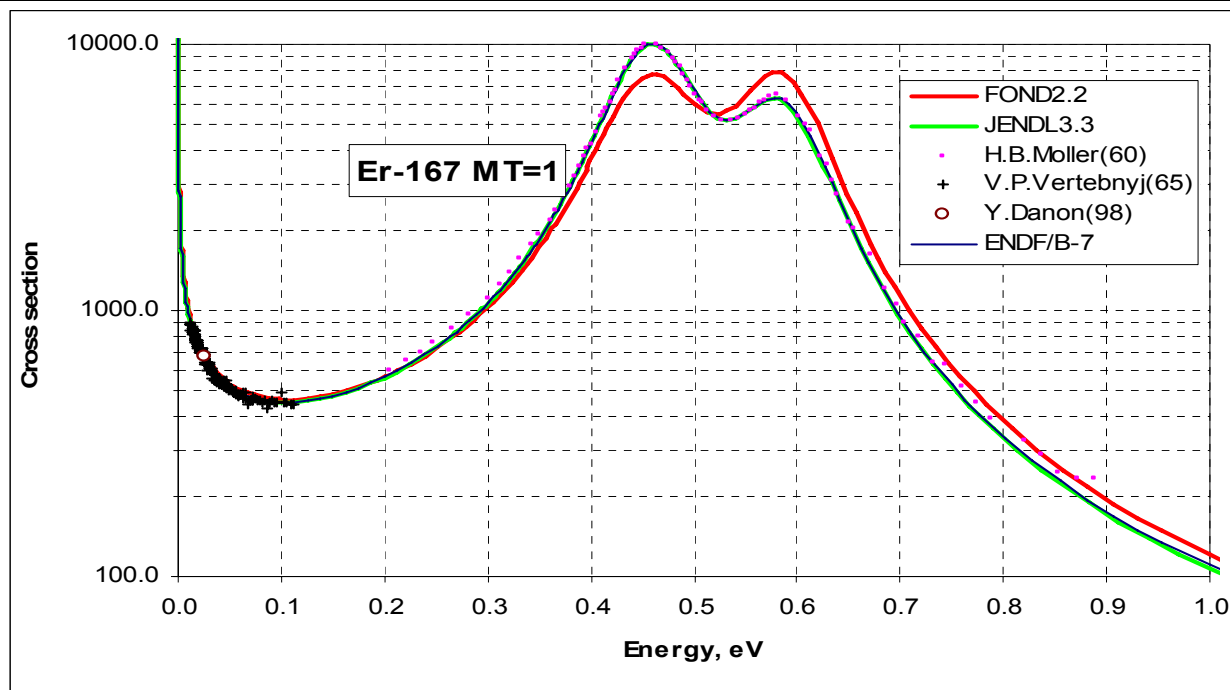


Рис.4.1 Полное сечение при низких энергиях

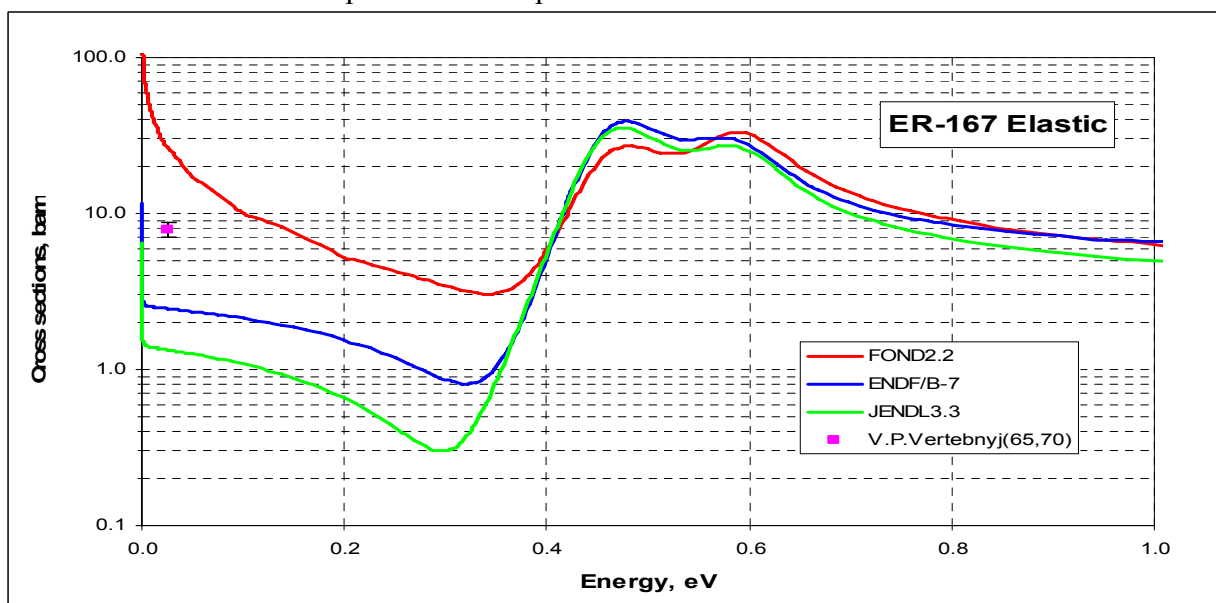


Рис.4.2 Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

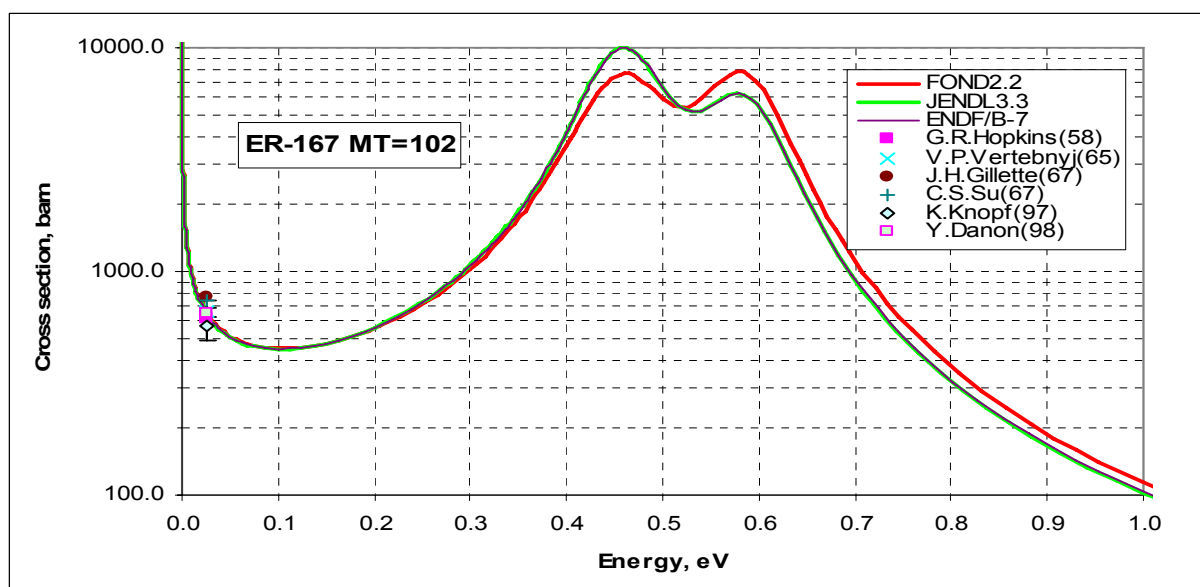


Рис.4.3 Сечение радиационного захвата при низких энергиях

3. Резонансная область

Область разрешенных резонансов представлена в библиотеках по-разному. Из таблицы 4.2 видно, что область разрешенных резонансов в FOND2.2 и JENDL3.3 практически совпадает 500 и 591 эВ, в ENDF/B-7 область разрешения тянется до 1.75 кэВ. Область неразрешенных резонансов в FOND2.2 тянется всего до 1 кэВ, в остальных библиотеках - до 10 keV.

Таблица 4.3

	FOND2.2	JENDL3.3	ENDF/B-7
Область разрешенных резонансов	1.0E-5 ÷ 0.5 кэВ	1.0E-5 ÷ 0.591 кэВ	1.0E-5 ÷ 1.75 кэВ
Оценка	Мюллер(1960) Мухабхаб(1966)	Landolt-Boernstein(1998) Y.Danon(1998) Мухабхаб(1984)	Мухабхаб(2006)
Радиус рассеяния	0.989	0.820	0.790
Количество разрешенных резонансов	272 (макс. энергия 1686 эВ)	124 (макс. энергия 590.1 эВ)	270 (макс. энергия 1686.4 эВ)
Область нерешенных резонансов	0.5 ÷ 1 кэВ	0.591 ÷ 10 кэВ	1.75 ÷ 10 кэВ

Выбор параметров в ENDF/B-7 был основан на последней оценке Мухабхаба, не учитывающей, видимо, каких-либо новых экспериментальных данных. Неясно, что позволило продлить область разрешенных резонансов до 1750 эВ. Максимальная энергия в работе H.I.Liou et al (EXFOR -10591001) равна 1689 эВ и резонанс с максимальной энергией обнаружен именно в этой работе. В интервале 1690-1775 эВ должно содержаться около 10 s-резонансов. Провал в сечении захвата отчетливо виден на рис. 4.4с. В новой оценке изменена параметризация сечений в тепловой области: введено связанное состояние при -23.6 эВ. Понижен также радиус рассеяния.

На рисунках 4.4(a,b,c) представлено полное сечение в резонансной области:

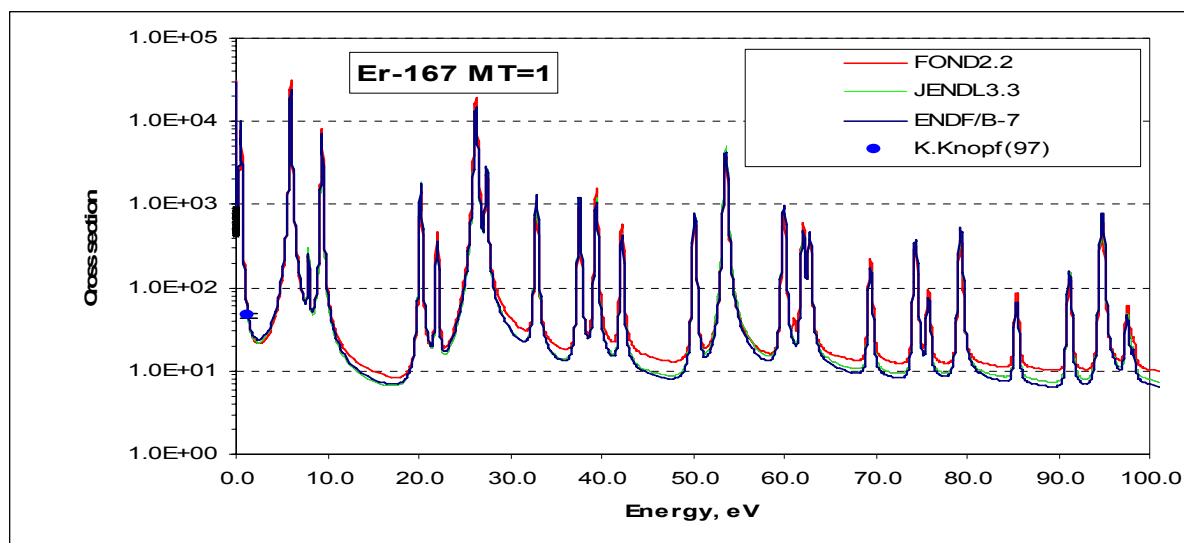


Рис.4.4а Полное сечение в области разрешенных резонансов

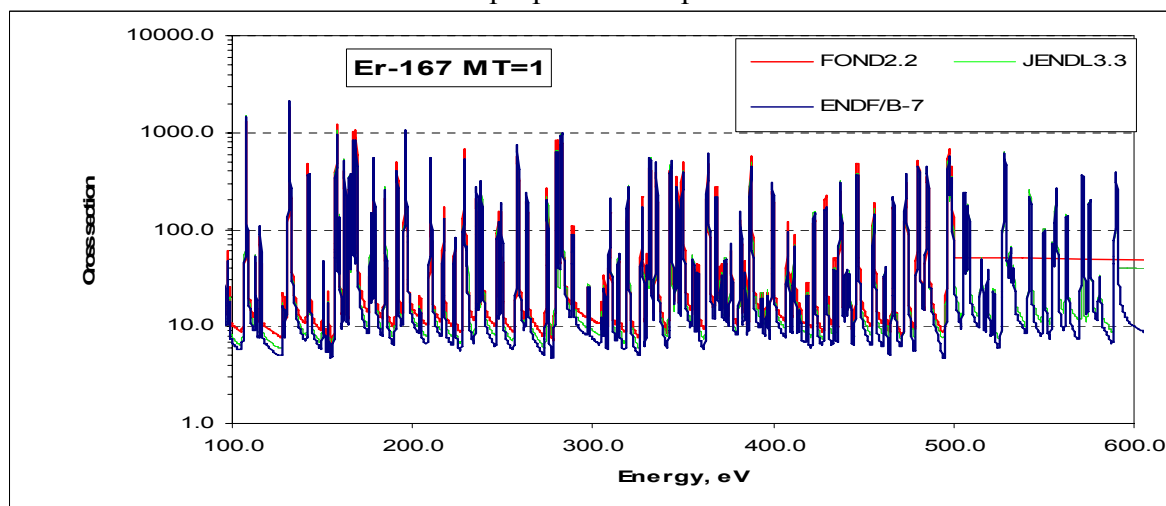


Рис.4.4b Полное сечение в области разрешенных резонансов

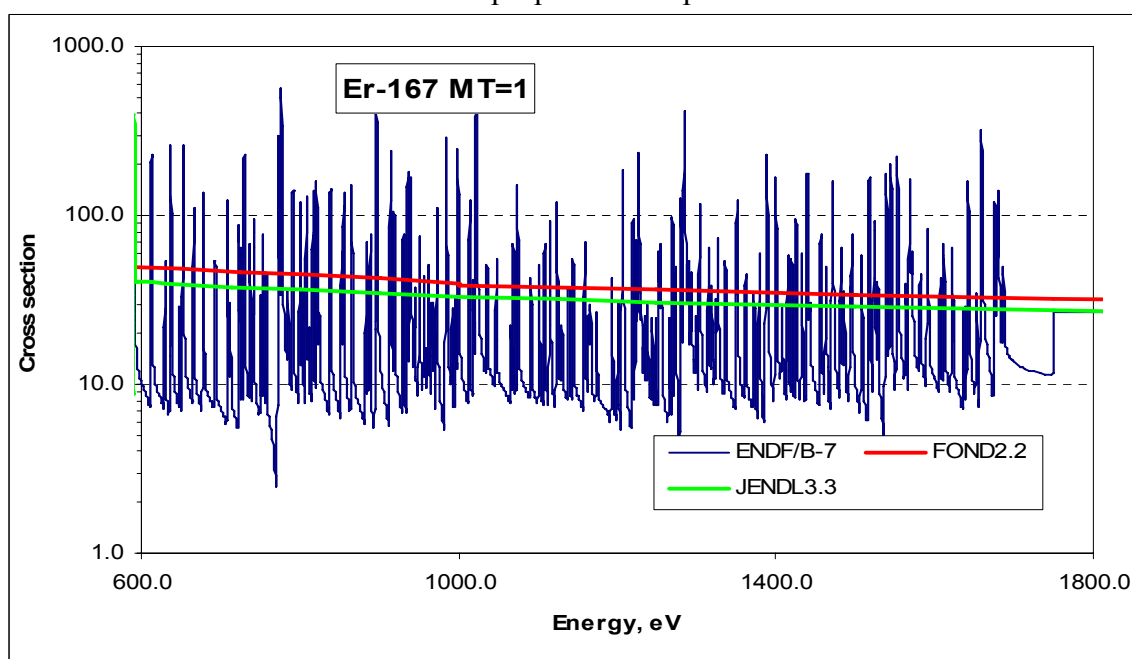


Рис.4.4с Полное сечение в области разрешенных резонансов

Из рис.4а видно, что в оценках приводятся разные резонансные параметры, данные JENDL3.3 ближе к ENDF/B-7. Далее до 500 и 591 эВ – картина сохраняется(рис 4.4в). После 1.75 кэВ оценка ENDF/B-7 совпадает с JENDL3.3.

Графики сечений радиационного захвата повторяют ситуации с полным сечением и здесь не приводятся.

Область неразрешенных резонансов: в FOND2.2 область неразрешенных резонансов представлена в формате, когда средние резонансные параметры зависят от энергии. В ENDF/B-7 использована оценка JENDL3.3, в которой средние параметры также не зависят от энергии.

Представляется целесообразным принять в РОСФОНД оценку из ENDF/B-VII, ограничив область разрешенных резонансов 1690 эВ.

3. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов. На рис.4.5а,b приводится сравнение сечения захвата с экспериментальными данными. Оценка JENDL3.3(=ENDF/B-7) проходит по данным двух экспериментов, которые проводились с разницей 20 лет – В.С. Шорин (1978) и А.К.Нарум(2001).

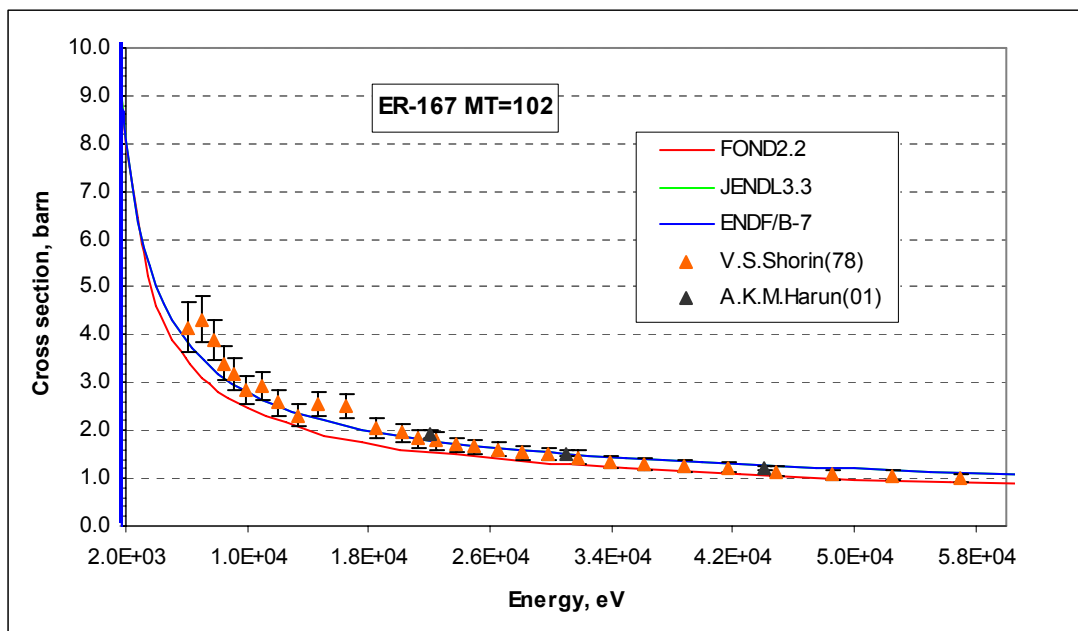


Рис.4.5а Сечение радиационного захвата вне резонансной области

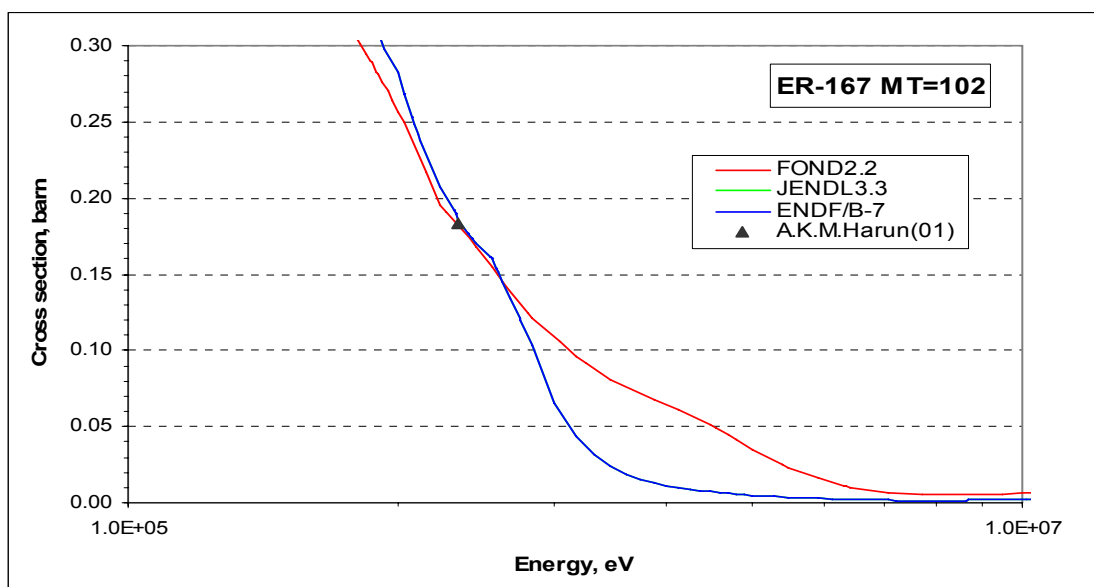


Рис.4.5b Сечение радиационного захвата вне резонансной области

На рис 4.6 приводятся, в сравнении с полным сечением, сечения всех остальных существенных реакций: $(n,2n)$, $(n,3n)$, неупругое рассеяние. Все экспериментальные данные относятся только к неупругому рассеянию. Приемлемое согласие с экспериментом наблюдается только при энергии 14 МэВ. Расхождение между экспериментальными и оцененными данными при более низких энергиях, вероятно, обусловлено недооценкой в эксперименте неупругого рассеяния с возбуждением низколежащих уровней эрбия. Первый уровень эрбия-167 имеет энергию 79 кэВ и рассеяние с возбуждением этого уровня при начальной энергии нейтронов порядка 1 МэВ нелегко отделить от упругого рассеяния.

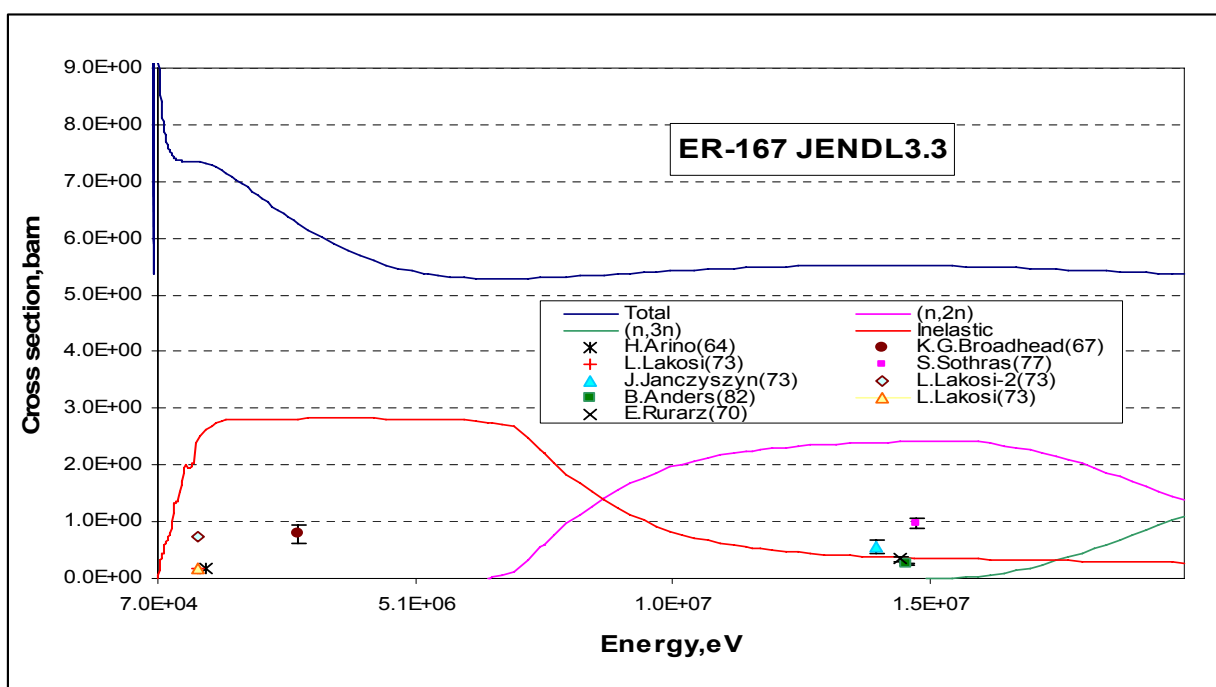


Рис.4.5b Сечение вне резонансной области

В новой оценке неупругого рассеяния учтено возбуждение каждого из 23 уровней (вместо 7 уровней, учитывавшихся в FOND2.2).

Таблица 4.4 Схема уровней ER-167 при неупругом рассеянии

№ уровня +50	Энергия, МэВ	
	JENDL3.3	FOND2.2
51	0.0793	0.0793
52	0.1780	0.1780
53	0.2078	0.2080
54	0.2649	0.2650
55	0.2816	0.2820
56	0.2949	0.2960
57	0.3466	0.3460
58	0.4133	
59	0.4300	
60	0.4344	
61	0.4420	
62	0.5315	
63	0.5358	
64	0.5738	
65	0.5874	
66	0.6408	
67	0.6452	
68	0.6624	
69	0.6679	
70	0.6833	
71	0.7110	
72	0.7111	
73	0.7453	

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

6. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:
 неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:
 в файле MF=12 для MT=51-73 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;
 реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

7. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНДе принимается оценка ENDF/B-7, с упомянутой выше коррекцией границы области разрешенных резонансов.

В файл включены данные об образовании долгоживущего ($T_{1/2}=1200$ лет) изомера $^{166}\text{Ho}^m$ в реакциях(n,d) и (n,n'p) на основе данных EAF-2003.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

	Total	Elastic	Inelastic	(n,2n)	(n,3n)	(n, γ)	(n,p)	(n, α)
0.0253 эВ	680.842	26.756	0	0	0	654.086	0	6.96E-05
	652.575	2.457	0	0	0	650.118	0	0
Резонансный интеграл	4000.140	602.899	0.100	0	0	3397.140	0	3.12E-05
	3495.420	493.890	0.030	0	0	3001.500	0	0
Спектр деления ^{235}U	6.865	4.543	2.197	0.013	5.17E-06	0.112	3.80E-06	4.50E-07
	6.832	4.320	2.401	0.017	7.44E-06	0.094	5.60E-06	5.07E-06
14 МэВ	5.300	3.226	0.126	1.934	0	0.007	6.00E-03	6.00E-04
	5.519	2.724	0.388	2.397	0	0.002	5.64E-03	1.70E-03

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.6. Эрбий-168

1. Общие характеристики

Z=68

A=168

Aw= 1.664870+2

Содержание в естественной смеси: **26.78%**

Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-166 представлены в двух библиотеках FOND2.2(1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с коррекцией резонансных параметров. В таблице по нейтронным реакциям приводятся энергии реакций и их пороги.

Таблица 6.1

MT	Реакция	JENDL3.3	
		Q, МэВ	Е _{порог.} , эВ
16	(n,2n) ^{165}Er	-7.771370+6	7.818050+6
17	(n,3n) ^{164}Er	1.420670+7	1.429200+7
22	(n, α) ^{164}Dy	5.539080+5	
28	(n,np) ^{165}Ho	7.996030+6	
32	(n,nd) ^{164}Ho	1.305380+7	1.313220+7
102	(n, γ) ^{167}Er	6.003700+6	
103	(n,p) ^{166}Ho	-1.936660+6	1.948290+6
104	(n,d) ^{165}Ho	-5.771460+6	5.806130+6
105	(n,t) ^{164}Ho	-6.795720+6	6.836540+6
107	(n, α) ^{163}Dy	6.270280+6	

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих реакций ($E_{\text{пор}} = Q \cdot (AWR + 1) / AWR$). В оценке JENDL3.3 набор нейтронных реакций представлен шире.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.6.1, 6.2 и 6.3 приведены оцененные полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния в области низких энергий, а также соответствующие экспериментальные данные. Последние, как видно, весьма противоречивы. Расчетные сечения радиационного захвата по всем оценкам точно одинаковы и все проходят через данные М.Такіуе(78). Сумма измеренных сечений захвата и рассеяния оказывается существенно ниже результатов измерений полного сечения и Вертебным и Мухабхабом. В то же время при 1.3 эВ, оцененная кривая лежит заметно выше результата Кнопфа. Данные Вертебного внутренне противоречивы: $\sigma_c + \sigma_s = 6.0 \text{ барн} + 13.1 \text{ барн} = 18.1 \text{ барн} \ll \sigma_t = 35 \text{ барн}$.

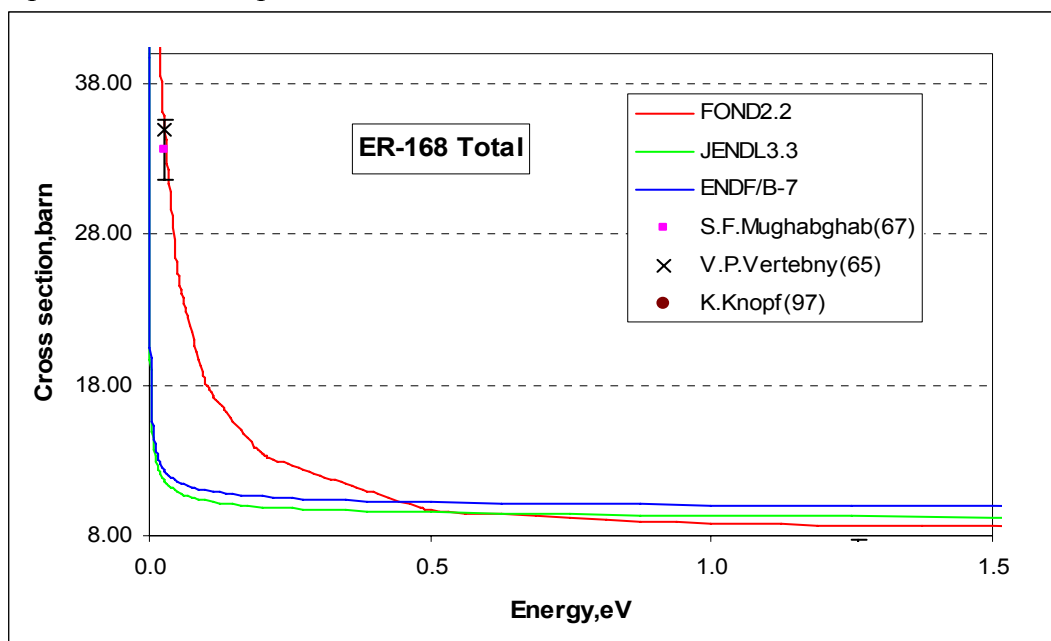


Рис.6.1 Полное сечение Er-168 при низких энергиях

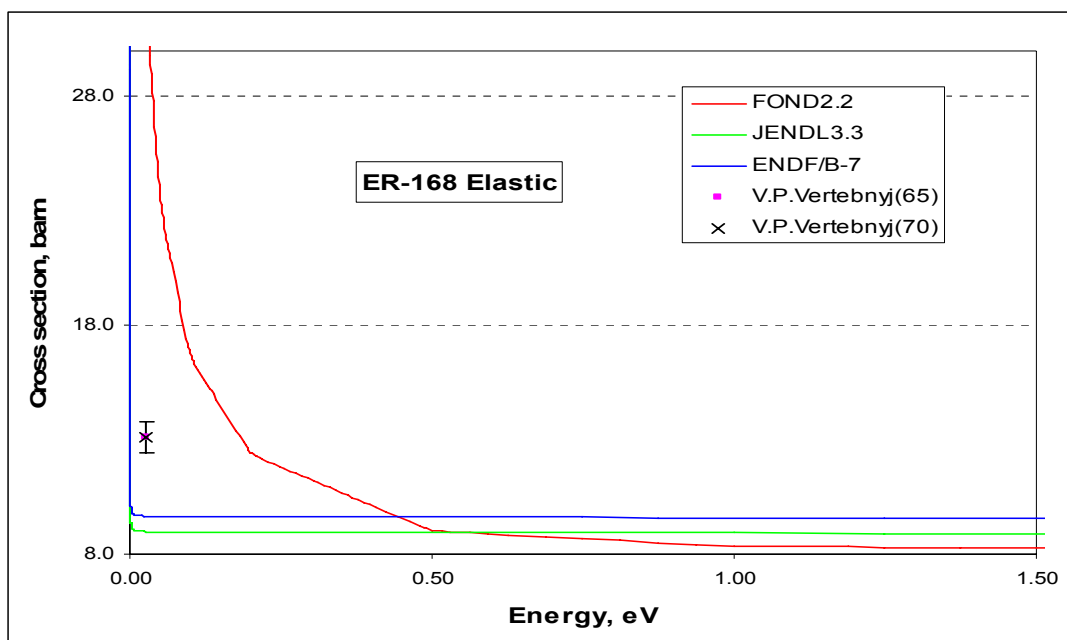


Рис.6.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

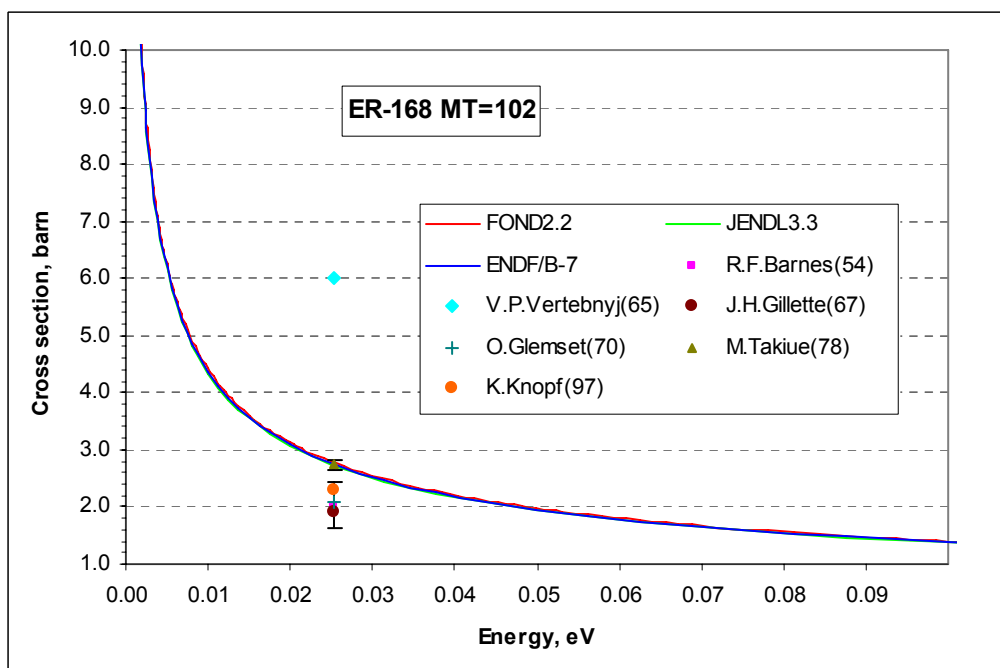


Рис.6.3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях

В таблице 6.2 приводятся оцененные сечения при 0.0253 эВ.

Таблица 6.2

	FOND2.2	JENDL3.3	ENDF/B-7
Elastic	33.2	8.957	9.6322
Capture	2.78	2.729	2.7412
Total		11.687	12.373
Res.integ.(capture)	38.5	38.311	37.1

Как видим, расхождения велики только в сечении рассеяния.

3. Резонансная область

Область разрешенных резонансов описана в оценках по-разному. В таблице 5.3 приводятся границы этой области. В ENDF/B-7 она равна 15 кэВ, т.е. намного выше, чем в предыдущих оценках.

На рис. 6.4а,б приводится полное сечение в области разрешенных резонансов. На них четко видны все границы.

Таблица 6.2

	FOND2.2	JENDL3.3	ENDF/B-7
Граница области разрешенных резонансов	5.0 кэВ	3.5 кэВ	15.0 кэВ
Оценка	Лью(1970) Мухабхаб(1966)	Landolt-Boernstein(1998) Мухабхаб(1984)	Мухабхаб(2006)
Радиус рассеяния	0.767	0.760	0.780
Количество разрешенных резонансов	106(l=0)+24(l=1)	34+21	102+28
Область неразрешенных резонансов	5. ÷ 6 кэВ	нет	нет

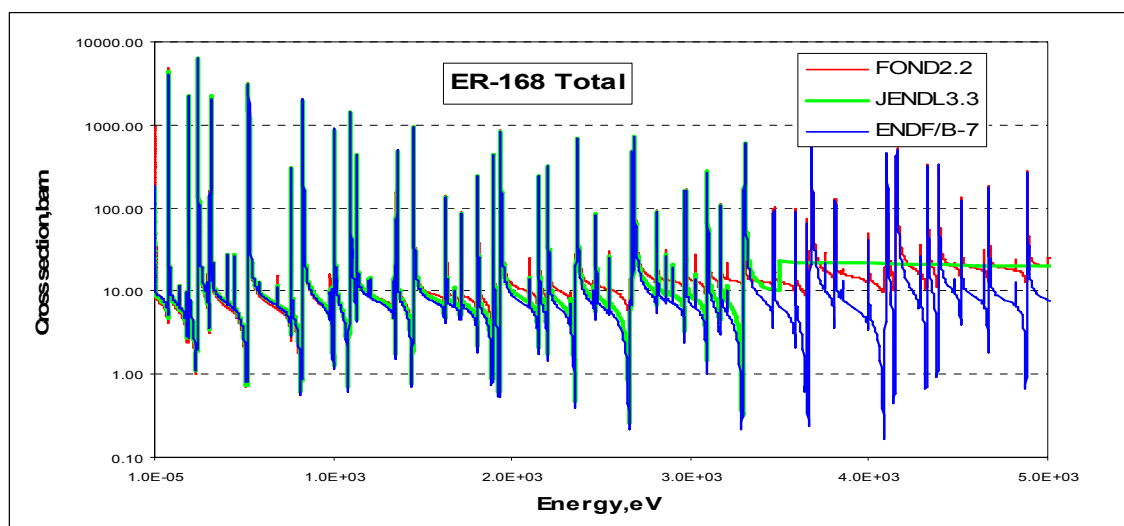


Рис.6.4а. Полное сечение в области разрешенных резонансов

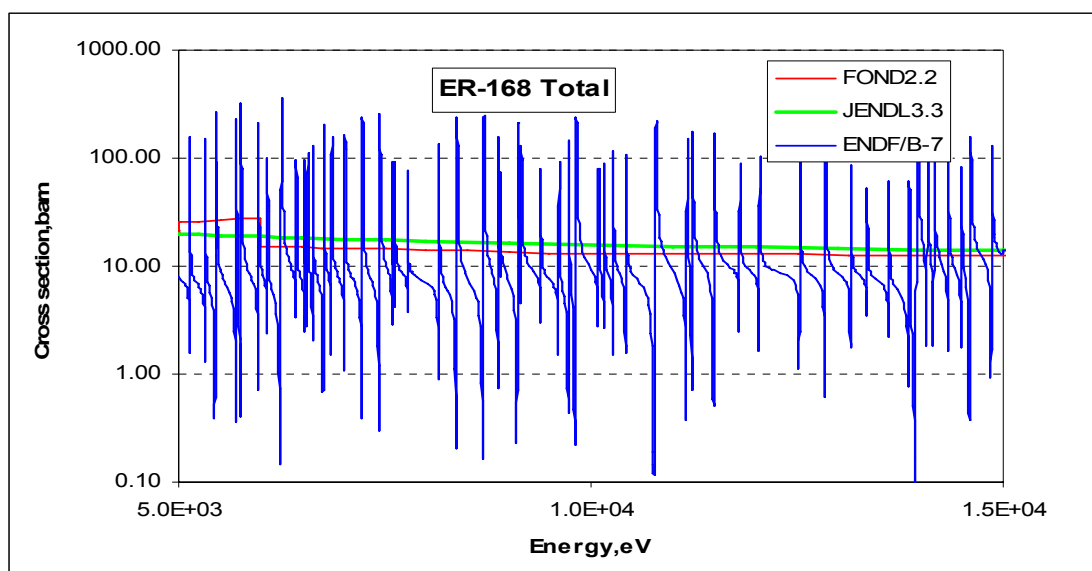


Рис.6.4б. Полное сечение в области разрешенных резонансов

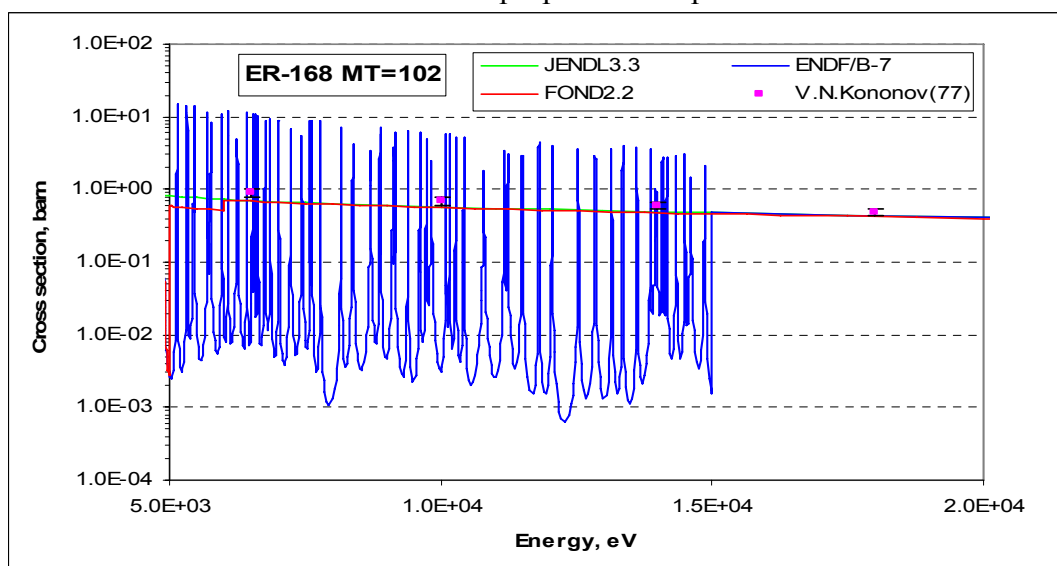


Рис.6.5. Сечение радиационного захвата в области разрешенных резонансов

Как видно из приведенных рисунков, вблизи границы разрешенных резонансов в новой оценке среднее сечение захвата существенно ниже, чем в предыдущих, что заставляет заподозрить пропуск значительной части резонансов. На рис. 6.6 приведены нарастающие суммы числа резонансов. Видно, что выше 5 кэВ пропуск s-резонансов становится существенным. Пропущены и все p-резонансы.

На рис.6.5 показано сечение радиационного захвата с 5 до 20 кэВ, где есть экспериментальные данные В.Н.Кононова (1977), начиная с 6.5 кэВ. В этой области наблюдается хорошее согласие с экспериментом оценок FOND2.2 и JENDL3.3. и резкое противоречие экспериментальным данным новой оценки.

Очевидно, оценка ENDF/B-VII выше 5 кэВ не может быть рекомендована в РОСФОНД.

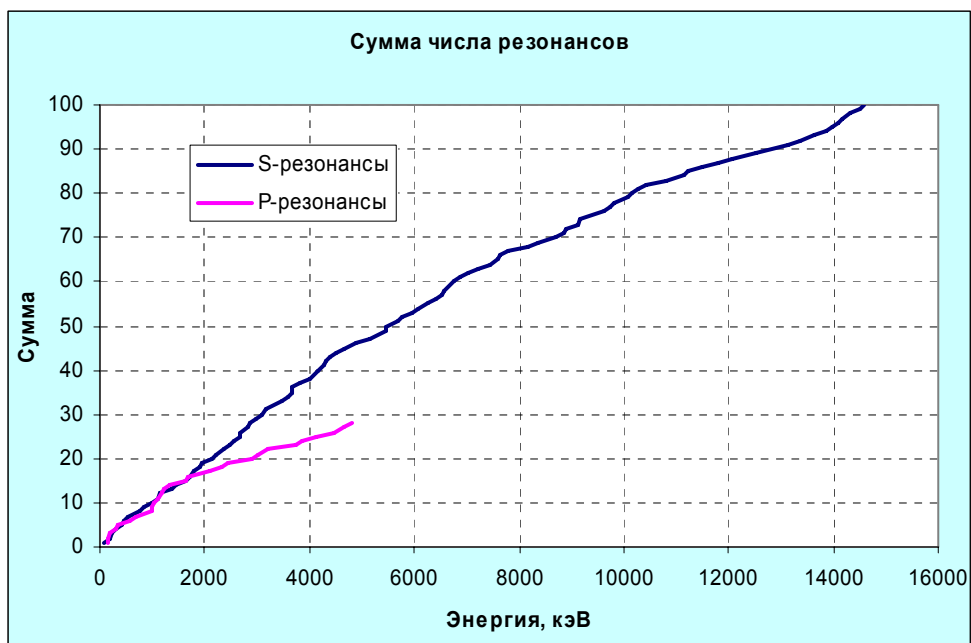


Рис.6.6. Нарастающие суммы числа резонансов (оценка ENDF/B-VII)

Область неразрешенных резонансов представлена только в FOND-2.2, где она простирается только до 6 кэВ (от 5 кэВ). Вводить столь узкую область неразрешенных резонансов в этой узкой области представляется нецелесообразным.

3. Сечение захвата вне резонансной области

В JENDL3.3 сечение радиационного захвата было получено на основе статистической модели и рассчитано по программе GNASH. В библиотеке ENDF/B-7 выше 1.5 кэВ без изменения взята оценка JENDL3.3. На рис. 6.7 а,b приводится продолжение экспериментальных данных В.Н.Кононова (1977). До 100 кэВ новая оценка с ними согласуется приемлемо, но при более высоких энергиях идет заметно ниже.

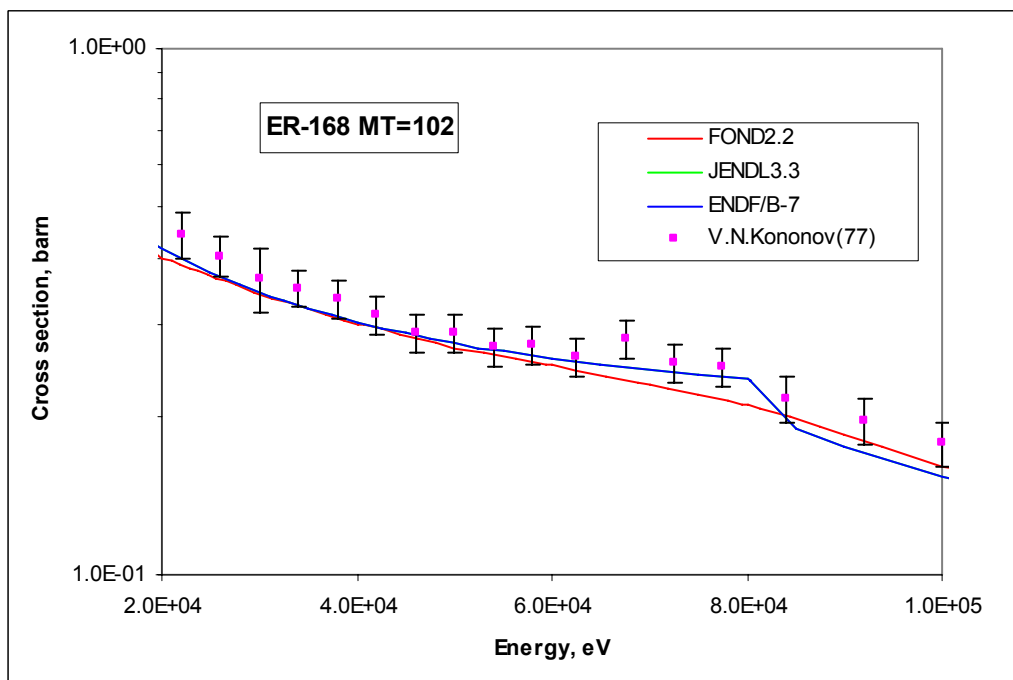


Рис.6.7а Сечение реакции (n, γ)

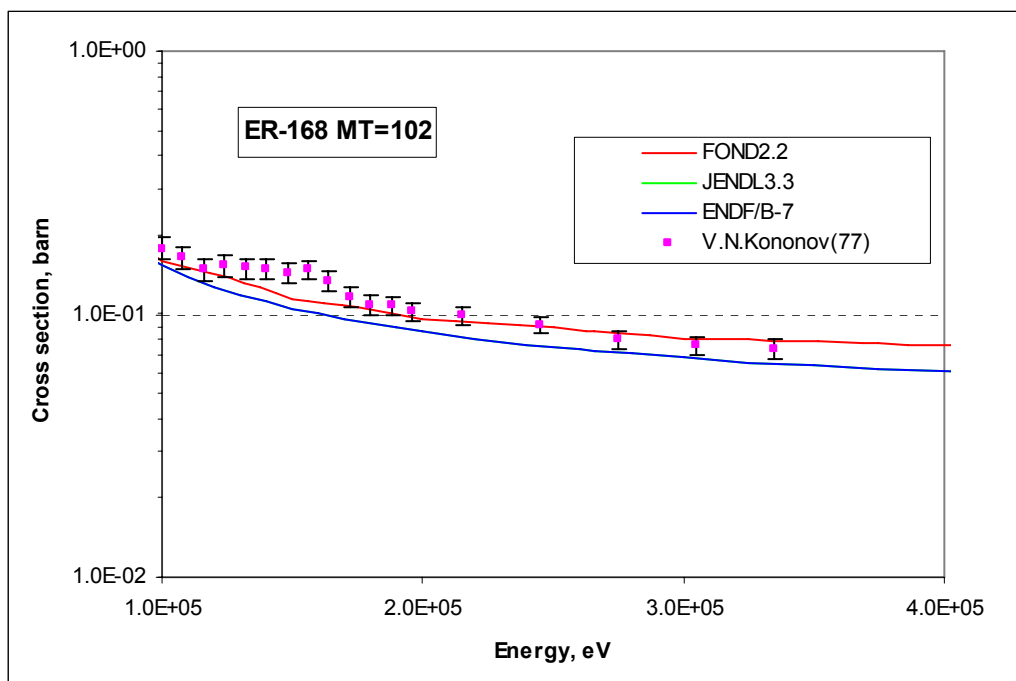


Рис.6.7b Сечение реакции (n,γ)

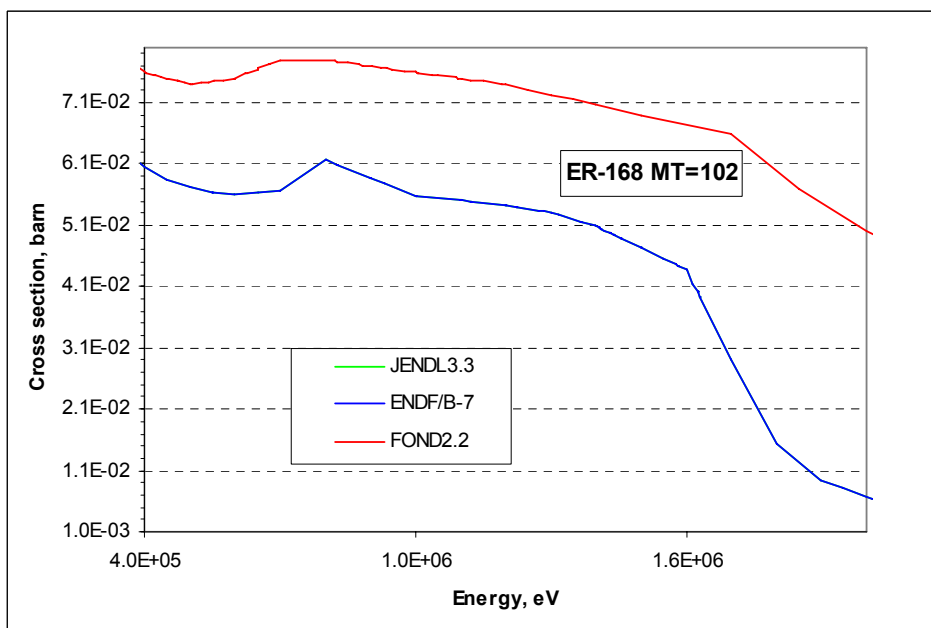


Рис.6.7с Сечение реакции (n,γ)

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:

неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:

в файле MF=12 для MT=51-79 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;

реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов –

множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНД целесообразно принять оценку JENDL-3.3, заменив резонансные параметры на те, что в ENDF/B-VII, но снизив границу области разрешенных резонансов до 5 кэВ.

В файл включить данные об образовании долгоживущего ($T_{1/2}=1200$ лет) изомера ^{166m}Ho в реакциях (n,t) и (n,n'd) на основе данных EAF-2003.

6.2. Авторы обоснования оцененных данных: Забродская С.В. Кощеев В.Н.

68.7. Эрбий-169.

Испытывает позитронный распад с периодом $T_{1/2}=9.4$ дн.

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

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

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

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. Из рисунка видно, что никаких изменений по сечению радиационного захвата не произошло.

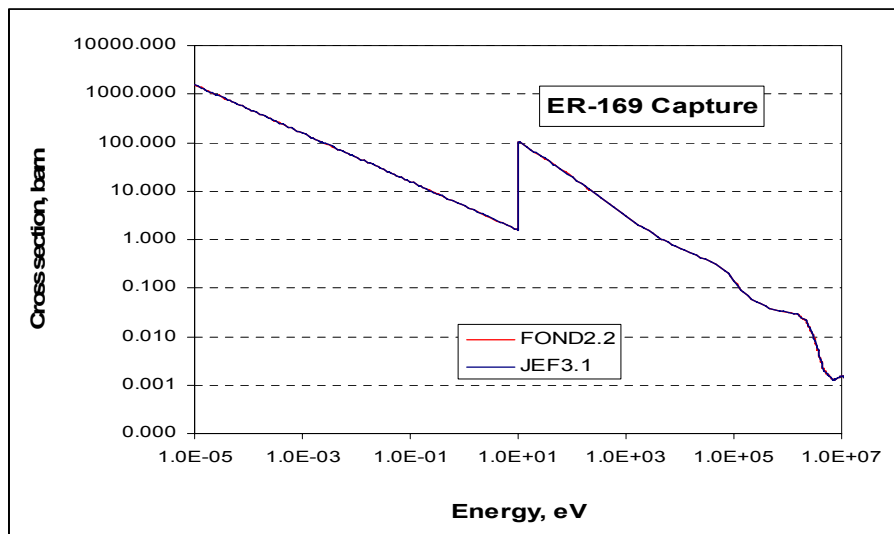


Рис.7.1. Сечение захвата

Заключение

В РОСФОНД принимается оценка Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 (JEFF-3.1).
Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов – 31.1 барн.

Автор отбора данных Забродская С.В.

68.8. Эрбий-170

1. Общие характеристики

Z=68

A=170

Aw= 1.68476+2

Содержание в естественной смеси: **14.93%**

Перечень нейтронных реакций

Независимые оценки Er-170 представлены в двух библиотеках: FOND2.2 (BROND2,1976) и JENDL3.3(2000), которая полностью перешла в библиотеку JEFF3.1. В библиотеке ENDF/B-7 также содержатся данные JENDL3.3, но с пересмотренной областью разрешенных резонансов. В таблице 4.1 по нейтронным реакциям приводятся энергии реакций (Q) и их пороги.

Таблица 8.1

MT	Реакция	JENDL3.3	
		Q, МэВ	Е _{порог.} , эВ
16	(n,2n) ¹⁶⁵ Er	-7.258370+6	7.301450+6
17	(n,3n) ¹⁶⁴ Er	-1.326170+7	1.334070+7
22	(n,nα) ¹⁶⁴ Dy	5.190800+4	
28	(n,np) ¹⁶⁵ Ho	-8.601030+6	8.652080+6
32	(n,nd) ¹⁶⁴ Ho	-1.297380+7	1.305080+7
102	(n,γ) ¹⁶⁷ Er	5.681700+6	
103	(n,p) ¹⁶⁶ Ho	-3.085660+6	3.103980+6
104	(n,d) ¹⁶⁵ Ho	-6.376450+6	6.414310+6
105	(n,t) ¹⁶⁴ Ho	-6.715720+6	6.755580+6
107	(n,α) ¹⁶³ Dy	5.469280+6	

Энергии нейтронных реакций, приведенные в файлах оцененных данных, удовлетворительно согласуются с порогами этих.

Радиоактивность: не радиоактивен

2. Область низких энергий

На рис.8.1,8. 2 и 8.3 приведены полное сечение, сечение радиационного захвата и сечение упругого рассеяния, а также соответствующие экспериментальные данные. Последние, как видно, весьма противоречивы. Сечение радиационного захвата в новой оценке проходит через результат Барнеса (1954г), оказавшийся посередине между весьма разбросанными данными более поздних измерений: разброс сечения от 4.3 барн(S.K.Mangal-1963) до 15 барна(K.Knopf-1997).

Полное сечение в прежней оценке опиралось на результат Вертебного (1965). Более поздний результат Батта (1980) лежит еще выше. Следует, однако, заметить, что данные Вертебного внутренне противоречивы: $\sigma_c + \sigma_s = 12 \text{ барн} + 15.9 \text{ барн} = 17.9 \text{ барн} \ll \sigma_t = 45.0 \text{ барн}$. Это противоречие (обусловленное, вероятно, неточностью знания изотопного состава образца) явилось, видимо, одним из главных оснований того, что эти данные в новой оценке были проигнорированы.

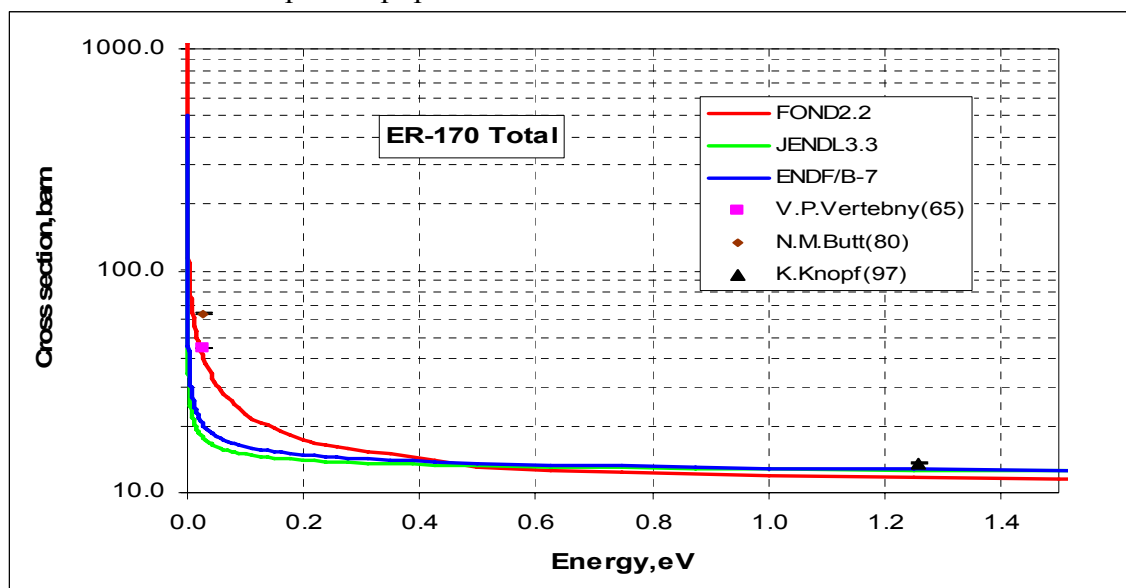


Рис. 8.1. Полное сечение при низких энергиях.

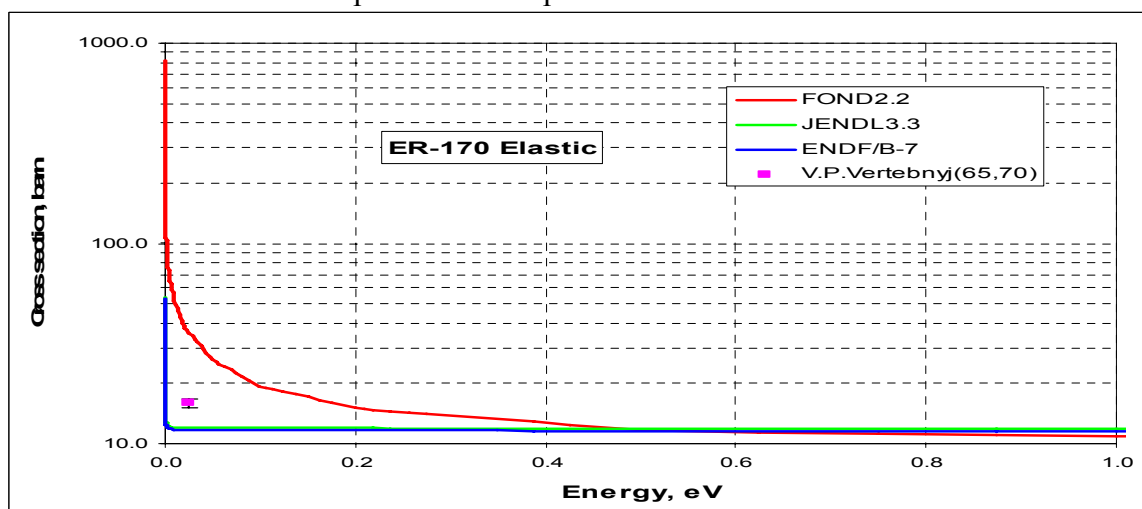


Рис. 8.2. Сечение упругого рассеяния при низких энергиях

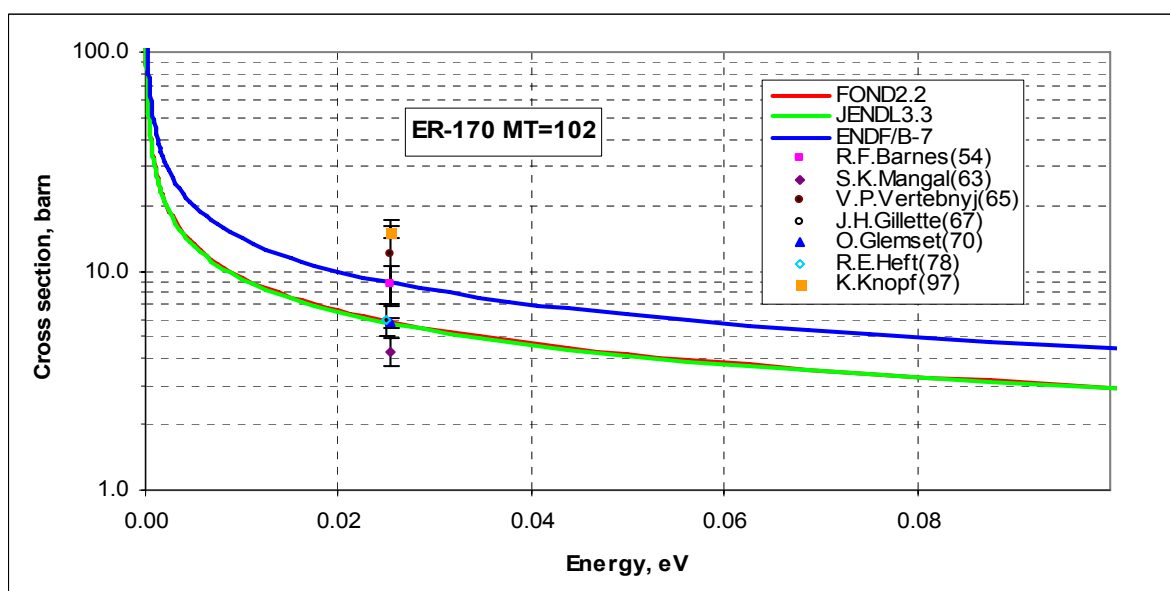


Рис. 8.3. Сечение радиационного захвата при низких энергиях.

2. Резонансная область

Область разрешенных резонансов во всех оценках определена по-разному. В Таблице 6.2 приводятся границы области. Распространение области разрешенных резонансов до 5 кэВ в новой оценке в данном случае представляется достаточно оправданным: в интервале до 3 кэВ лежит 20 резонансов; в интервале от 3 до 5 кэВ – 11 резонансов, т.е. плотность уровней хотя и снижена, но лишь на 17%, что не слишком превышает статистическую погрешность ($\pm 10\%$). Все зарегистрированные р-резонансы (числом 31) лежат ниже 4.3 кэВ. По статистике в интервале 4.3-5 кэВ может лежать лишь 2-3 слабых р-резонанса. В целом, все возможно пропущенные интервале 3 – 5 кэВ резонансы могли бы дать вклад в среднее по этому интервалу сечению захвата, не превышающий первых процентов.

Таблица 8.2

	FOND2.2	JENDL3.3	ENDF/B-7
Граница области разрешенных резонансов	4.7 кэВ	3.0 кэВ	5.0 кэВ
Оценка	Мухабхаб(1966)	Landolt-Boernstein(1998) Мухабхаб(1984)	Мухабхаб(2006)
Радиус рассеяния	0.840	0.800	0.820
Количество разрешенных резонансов	126	42	126
Область неразрешенных резонансов	4.7 ÷ 6 кэВ	нет	5.0 ÷ 79.147 кэВ

На рис.8.4, 8.5 приведены поведения полного сечения и сечения радиационного захвата в области разрешенных резонансов. Измерений сечения захвата в этой области не проводились. На рисунках четко видны границы области разрешения резонансов для JENDL3.3 – 3 кэВ, FOND2.2 - 4.7 кэВ, ENDF/B-7 – 5 кэВ.

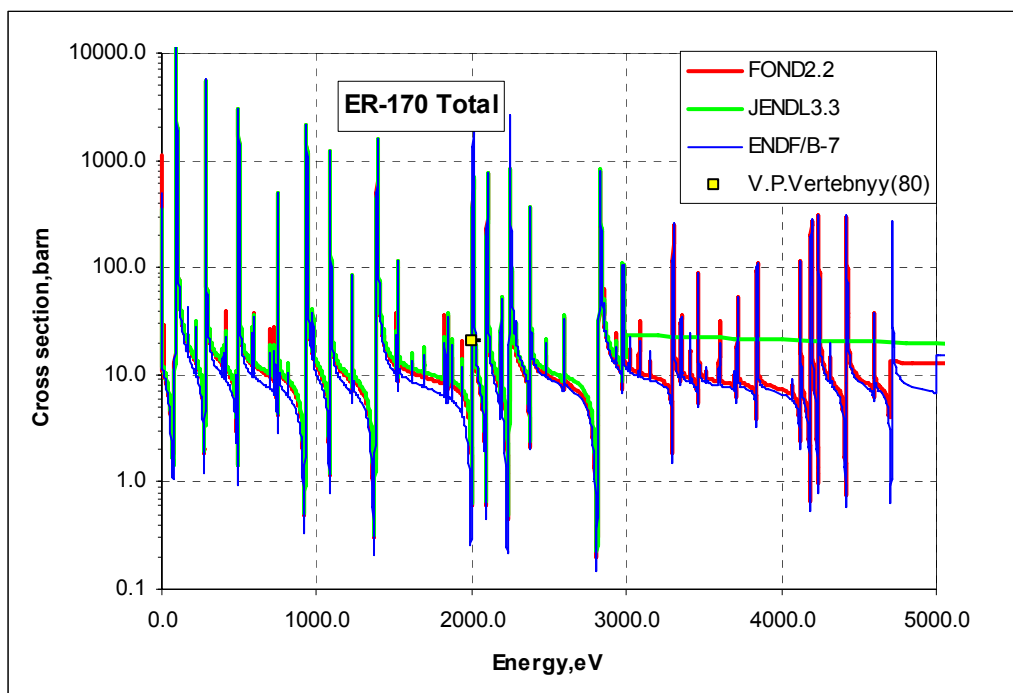


Рис. 8.4. Полное сечение в области разрешенных резонансов.

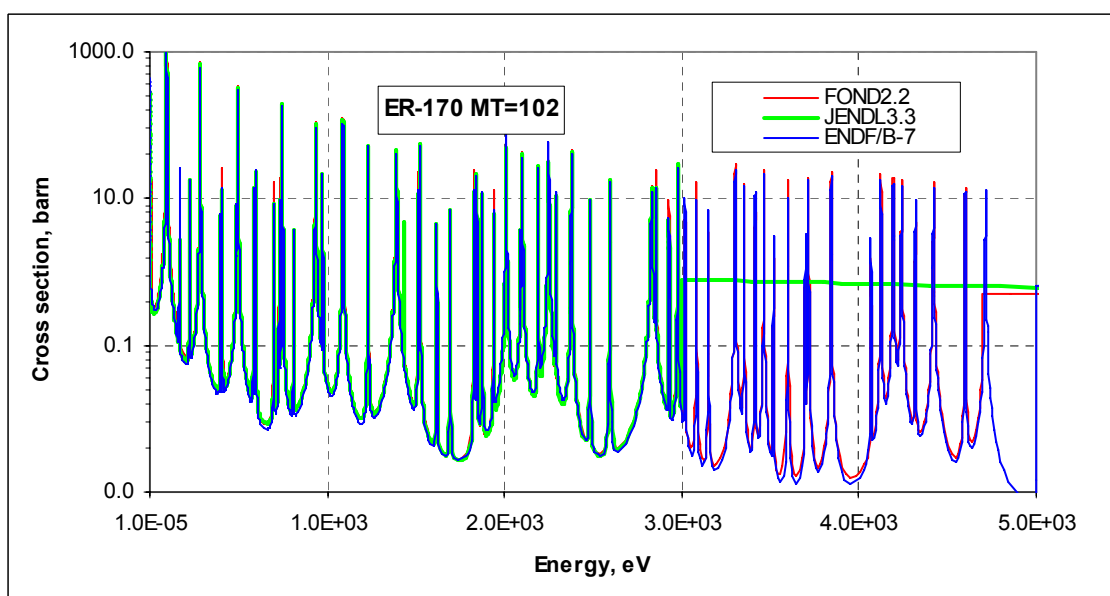


Рис. 8.5. Сечение захвата в области разрешенных резонансов.

Область неразрешенных резонансов простирается в FOND2.2 только до 6 кэВ; в ENDF/B-7 - до 79.147 кэВ. Средние резонансные параметры зависят от энергии. На рис.8.6, 8.7 приведены поведения полного сечения и сечения радиационного захвата в области неразрешенных резонансов.

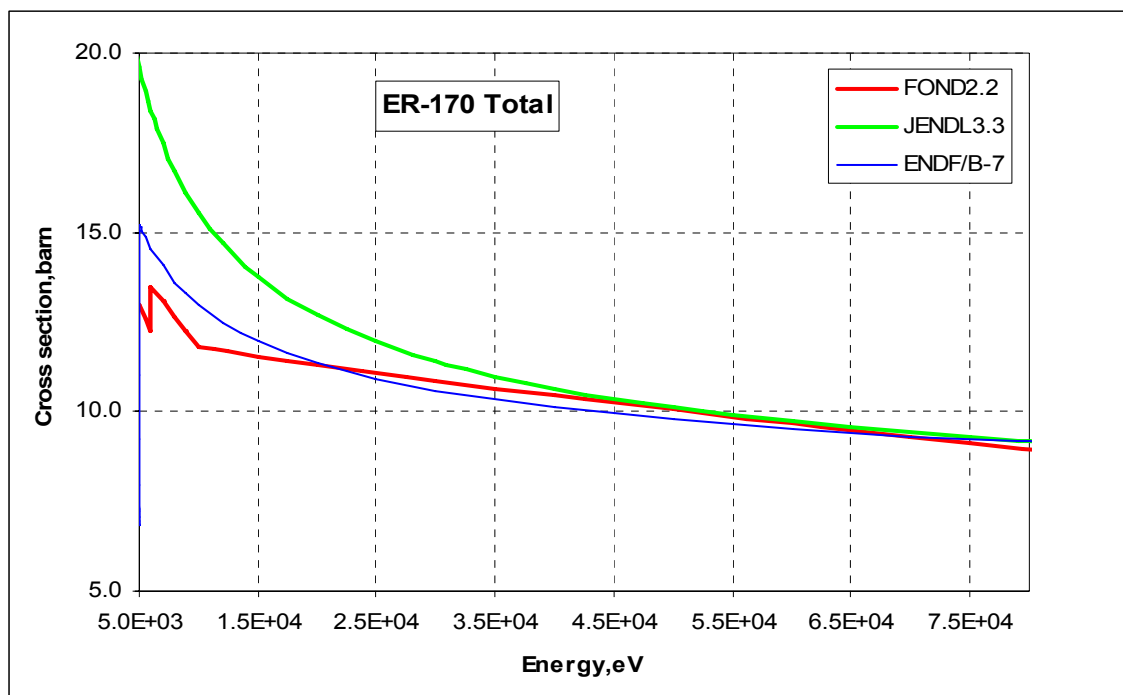


Рис. 8.6. Полное сечение в области неразрешенных резонансов.

Для сечения захвата в EXFORе оказалось много экспериментов в области неразрешенных резонансов. Новые оценки, как видно, опирались, главным образом, на результаты экспериментов В.Н.Кононова(1977) и J.Best(2001).

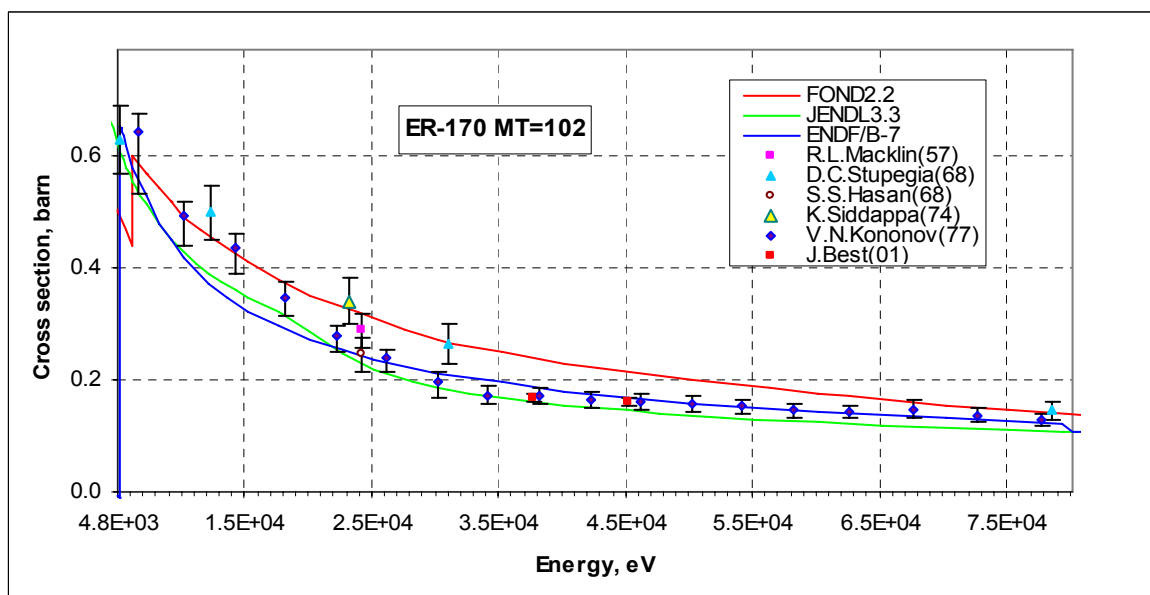


Рис. 8.7. Сечение захвата в области неразрешенных резонансов.

3. Сечения вне резонансной области

Вне резонансной области сечения оценивались на основе модельных расчетов. Ниже приведены рисунки только по сечению радиационного захвата в этой области, для которого имеются экспериментальные данные. Данные D.C.Stupegia(1998) и В.Н.Кононова(1977) продолжают из области неразрешенных резонансов; к ним в

рассматриваемом энергетическом интервале добавляются данные еще двух экспериментов. Данные Ю.Н.Трофимова(87) согласуются с новой оценкой, G.Peto(67) – с FOND2.2.

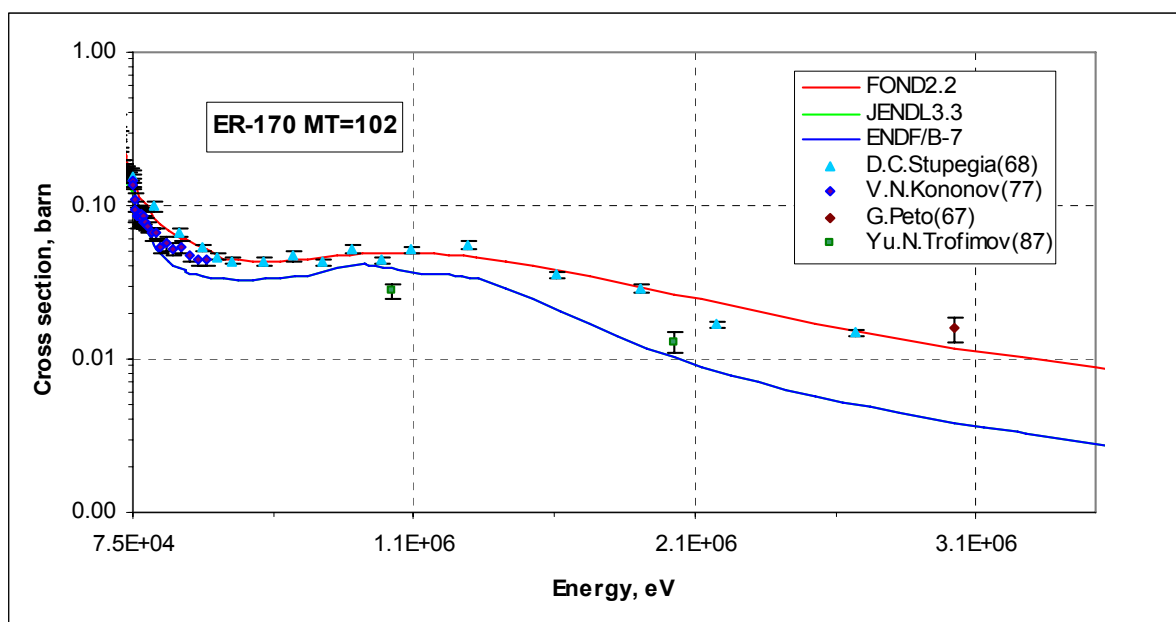


Рис. 8.8. Сечение захвата вне резонансной области.

В области 14 МэВ оба эксперимента J.Vuletin(1974) и M.Valkonen(1976) подтверждают преимущество новой оценки.

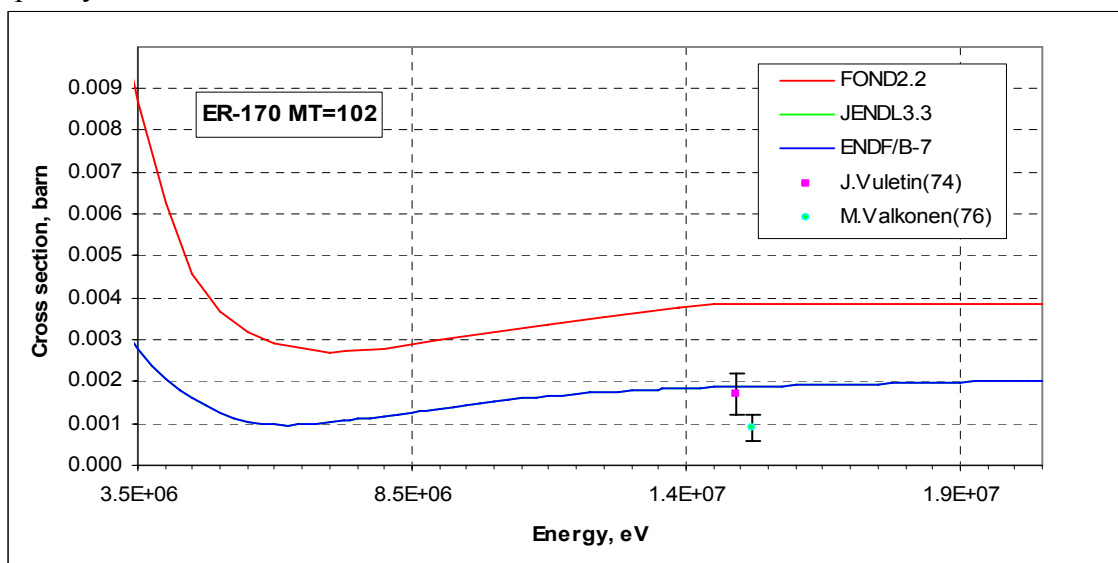


Рис. 6.9. Сечение захвата вне резонансной области.

На рис.8.10 приведены все остальные важные реакции из новой оценки

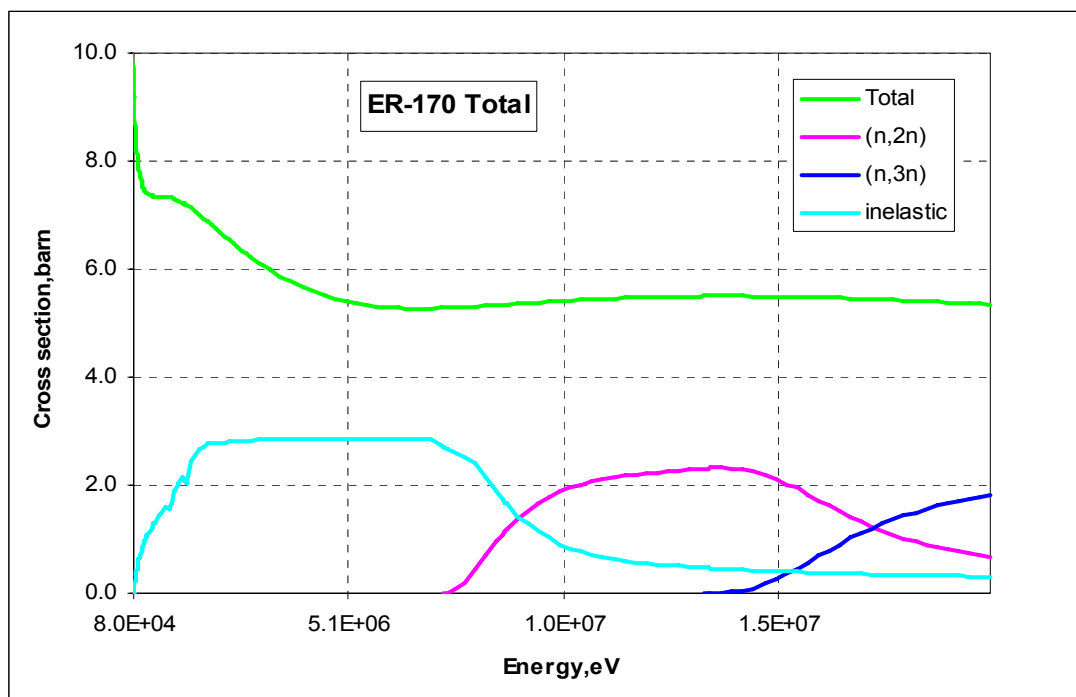


Рис. 8.10. Сечение нейтронных реакций вне резонансной области.

4. Энерго-угловые распределения вторичных нейтронов

Экспериментальных данных в EXFOR нет. В обеих оценках энергетические распределения считаются не зависящими от угловых (данные для всех реакций с вылетом вторичных нейтронов приводятся в файлах MF=4 (угловые распределения) и MF=5 (энергетические распределения для реакций с возбуждением непрерывного спектра состояний ядер-продуктов). Угловые распределения нейтронов, испускаемых в реакциях с возбуждением непрерывного спектра ядер-продуктов (MT=16,17, 22, 28), кроме неупругого рассеяния приняты изотропными в лабораторной системе координат. Угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния рассчитывались по программе CASTY.

5. Образование фотонов в нейтронных реакциях

В JENDL3.3 (ENDF/B7) приводится следующая информация:

неупругое рассеяние с возбуждением дискретных уровней ядра-мишени:

в файле MF=12 для MT=51-64 приведены вероятности испускания дискретных квантов, соответствующих переходам между уровнями;

реакции с возбуждением непрерывного спектра уровней ядер-продуктов – множественности и непрерывные спектры фотонов, рассчитанные по статистической модели (по программе EGNASH), заданные в соответствующих секциях файлов MF=12 MF=15.

Угловые распределения фотонов во всех случаях приняты изотропными.

6. Заключение

6.1. Вывод: В РОСФОНДе принимается оценка ENDF/B-7.

Сечения основных реакций на интегральных спектрах приведены в нижеследующей таблице **жирным шрифтом** сравнении с данными, полученными на основе библиотеки ФОНД-2.2 (обычным синим шрифтом)

	Total	Elastic	Inelastic	(n,2n)	(n,3n)	(n, γ)	(n,p)	(n, α)
0.0253 эВ	41.6041	35.7468	0.0000	0.0000	0.0000	5.8573	0.0000	0.0000
	20.5605	11.7027	0.0000	0.0000	0.0000	8.8578	0.0000	0.0000
Резонансный Интеграл	604.8500	546.2870	0.0414	0.0000	0.0000	58.5207	0.0000	0.0000
	596.9090	555.1160	0.0205	0.0000	0.0000	41.7726	0.0000	0.0000
Спектр деления ^{235}U	7.0252	5.1441	1.8386	0.0076	0.0000	0.0349	0.0000	0.0000
	6.8077	4.5966	2.1765	0.0114	0.0001	0.0231	0.0000	0.0000
14 МэВ	5.2738	3.4364	0.1640	1.6630	0.0040	0.0039	0.0020	0.0006
	5.5020	2.7215	0.4392	2.3094	0.0278	0.0019	0.0019	0.0002

6.2. Автор обоснования оцененных данных: Забродская С.В.

68.9. Эрбий-172.

Испытывает позитронный распад в с периодом $T_{1/2}=49$ ч.

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

В других библиотеках оцененные данные отсутствуют.

Оценка содержит данные только о сечениях нейтронных реакций (MT=16,17,22,32,33,102,103,105,106,107,111). Данные о полном сечении, о сечениях упругого и неупругого рассеяния и об энерго-угловых распределениях вторичных нейтронов отсутствуют.

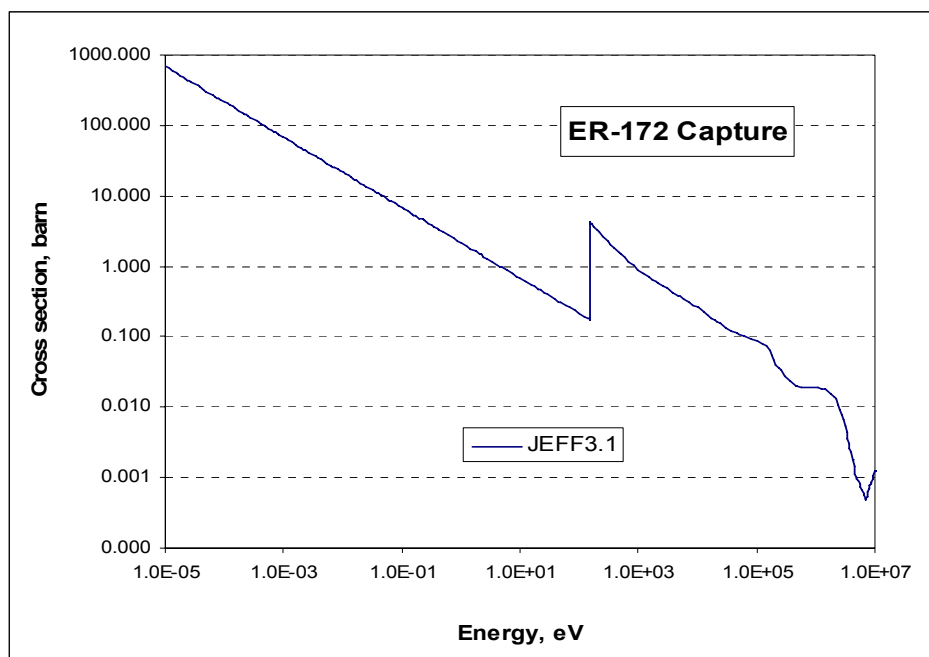


Рис9.1.Сечение захвата

Заключение

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

Файлы MF=8 и MF=10 исключены. Сечение захвата тепловых нейтронов – 13.54 барн.

Автор отбора данных Забродская С.В.

68.11. Эрбий природный

Включать в РОСФОНД файл данных для натурального эрбия не предполагается. Задача настоящего параграфа состоит в валидации принятых в РОСФОНД оцененных нейтронных данных для стабильных изотопов диспрозия путем сравнения следующих из этих оценок нейтронных сечений для натурального диспрозия с результатами непосредственных измерений.

С этой целью на основе оцененных нейтронных данных, принятых в РОСФОНД, были рассчитаны 299-групповые константы для каждого стабильного изотопа, которые затем были свернуты с весом концентраций изотопов в естественной смеси в 299-групповые константы для природного диспрозия. Полученные таким образом 299-групповые сечения ниже сравниваются с имеющимися для природного диспрозия экспериментальными данными.

На рис.11.1 и 11.2 Приведены оцененные и экспериментальные данные по полному сечению природного диспрозия и по сечению захвата при низких энергиях.

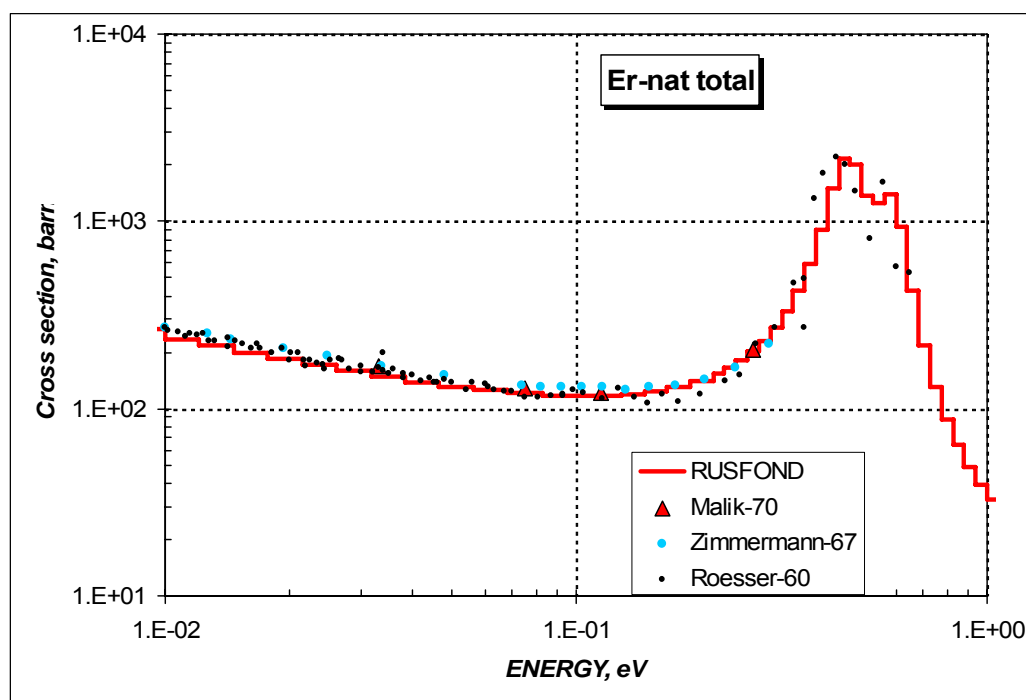


Рис.11.1 Полное сечение эрбия при низких энергиях

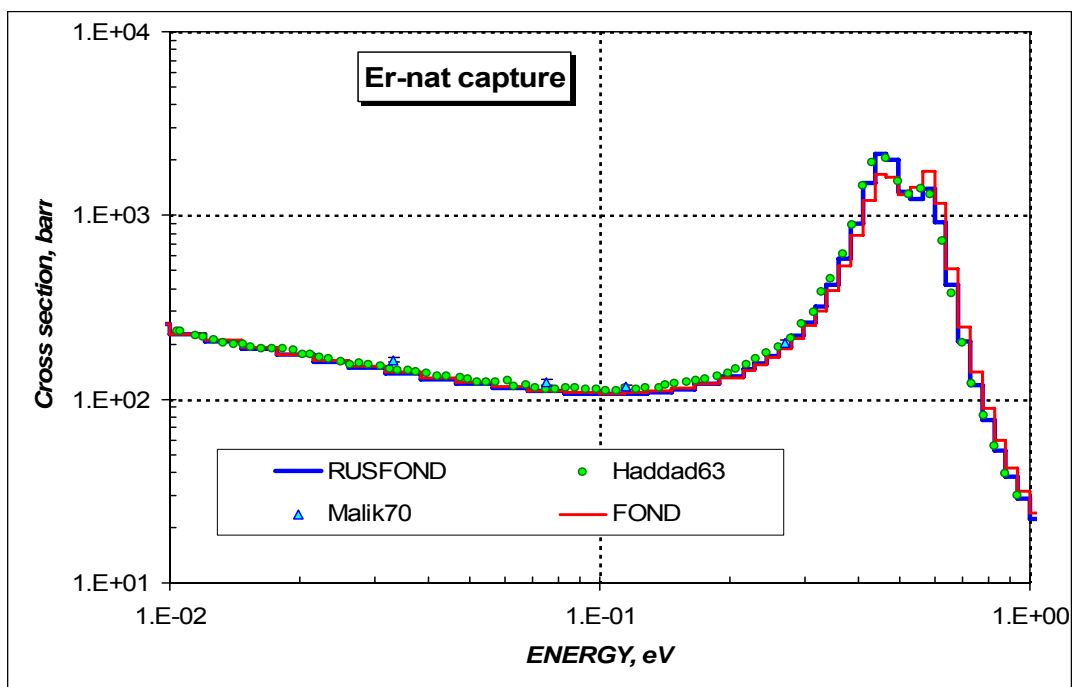


Рис. 11.2. Сечение захвата эрбия при низких энергиях.

Как видно, согласие оцененных и экспериментальных данных в этой области энергий не оставляет желать лучшего.

На рис. 11.3 и 11.4 приведены полное сечение и сечение радиационного захвата вне резонансной области в сравнении с экспериментальными данными для природного эрбия.

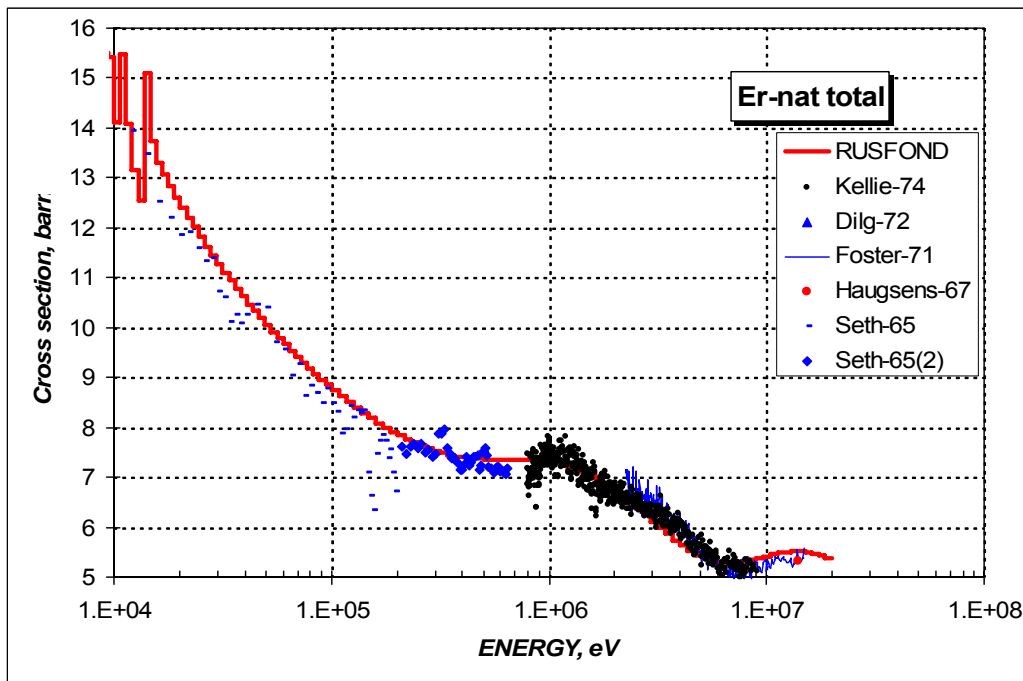


Рис.11.3. Полное сечение эрбия вне резонансной области

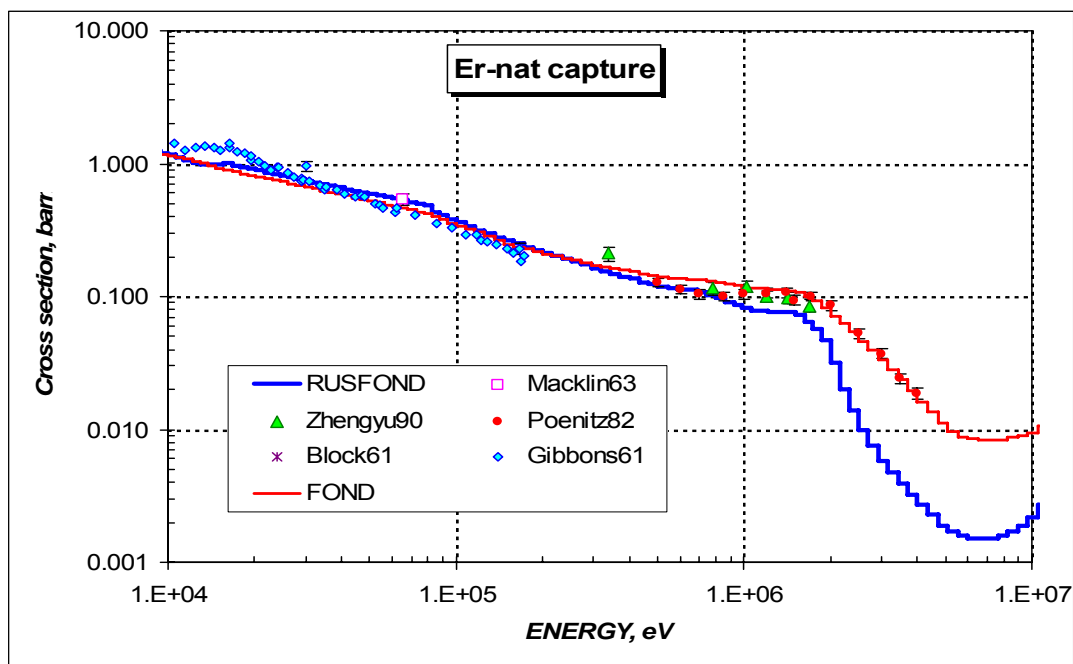


Рис. 11.4. Сечение радиационного захвата вне резонансной области.

Как видно, в области быстрых нейтронов, расхождения между свернутыми оцененными сечениями захвата для изотопов отличаются от экспериментальных данных для природного диспрозия в среднем на $\pm 20\%$. Это выходит за пределы погрешностей экспериментальных данных, приведенных на рис. 11.4. Расхождение может быть устранено путем переоценки сечений захвата для основных “вкладчиков” в сечение захвата природного диспрозия в рассматриваемой области энергии – эрбия-166 и эрбия-167, сечения захвата для которых в области быстрых нейтронов слабо обоснованы экспериментальными данными (см. разделы 63.4 и 63.5). Такая переоценка выходит, однако, за рамки настоящей работы и мы здесь лишь ограничимся констатацией факта расхождений, ограничивающих точность данных по сечению захвата быстрых нейтронов на природном диспрозии, примерно, 20%.

На рис. 11.5 проводится сравнение оцененных данных по сечению неупругого рассеяния между собой и с единственным имеющимся в базе данных EXFOR экспериментом. Преимущество новой оценки очевидно.

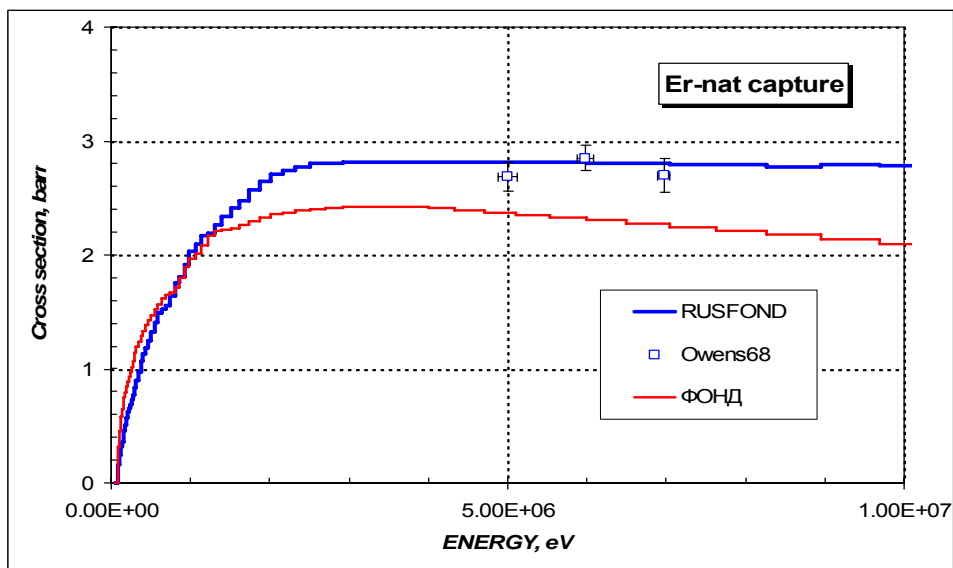


Рис.11.5. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на эрбии.

Заключение.

Принятые в РОСФОНД оцененные нейтронные данные о сечении захвата для изотопов эрбия в области быстрых нейтронов (выше 10 кэВ) не вполне согласуются с результатами экспериментов для природного эрбия. Улучшение согласия путем переоценки сечений захвата для изотопов возможно и в будущем желательно такую переоценку выполнить. Полное сечение и сечение неупругого рассеяния для природного эрбия в этой области согласуются с экспериментальными данными для природного эрбия удовлетворительно. В области низких энергий экспериментальные данные для природного эрбия убедительно подтверждают корректность оценки данных для основных стабильных изотопов.

Авторы заключения – В.Н. Кошечев, М.Н. Николаев.