

## 28. НИКЕЛЬ

Природный никель содержит четыре стабильных изотопа:

- $^{58}\text{Ni}$  - 68.077 %,
- $^{60}\text{Ni}$  - 26.223 %,
- $^{61}\text{Ni}$  - 1.140 %,
- $^{62}\text{Ni}$  - 3.634 %
- и  $^{64}\text{Ni}$  - 0.926 %.

Существует также ряд долгоживущих изотопов  $^{56}\text{Ni}$  ( $T_{1/2}=6.075$  д),  $^{57}\text{Ni}$  ( $T_{1/2}=35.6$  ч),  $^{59}\text{Ni}$  ( $T_{1/2}=7.6 \cdot 10^4$  лет),  $^{63}\text{Ni}$  ( $T_{1/2}=100.1$  лет) и  $^{66}\text{Ni}$  ( $T_{1/2}=54.6$  ч), данные для которых также представлены в библиотеке РОСФОНД.

### 28.1. Никель-56

Радиоактивен. ( $T_{1/2}=6.075$  д),.

Способ радиоактивного распада –  $\varepsilon + \beta$  распад в кобальт-56, который, в свою очередь испытывает такой же распад в железо-56 ( $T_{1/2}=77.26$  д).

#### Заключение

В РОСФОНД принять нейтронные данные из EAF-2003A (Forrest, Konecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=2856;
2. удален файл MF=8;
3. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложены по подсекциям и суммы занесены в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удален, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на никеле не образуется.

### 28.2. Никель-57

Радиоактивен.  $T_{1/2}=35.6$  часов.

Способ радиоактивного распада –  $\varepsilon + \beta$  распад в кобальт-57, который, в свою очередь, захватом орбитального электрона распадается в железо-57 ( $T_{1/2}=77.26$  д).

#### Заключение

В РОСФОНД принять нейтронные данные из EAF-2003A (Forrest, Konecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер МАТ=2857;
2. удален файл MF=8;
3. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложены по подсекциям и суммы занесены в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удален, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на никеле не образуется.

## 28.3. Никель-58

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ. Различные модификации, выполненные выше 20 МэВ, не комментируются.

Экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными кривыми, взяты из интерактивной библиотеки EXFOR-CINDA (Database and Retrieval System, version 1.80, June 2005).

### 1. Общие характеристики

**Z**=28

**A**=57.935 342 9 ± 0.000 000 7

**A<sub>wr</sub>**=57.437 650 5 ± 0.000 000 7

Содержание в естественной смеси: - 68.077%

#### Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	Е <sub>порог.</sub> , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	(n,n')	-1.4540	1.4793	Ni-58
16	(n,2n)	-12.2000	12.4124	Ni-57(35.6h)
22	(n,na)	-6.3980	6.5094	Fe-54
28	(n,np)	-8.1710	8.3134	Co-57(271.8d)
102	(n,γ)	9.0000	0.0000	Ni-59(7.6E4y)
103	(n,p)	0.4008	0.0000	Co-58(70.82d)
104	(n,d)	-5.9463	6.0498	Co-57(271.8d)
105	(n,t)	-11.0620	11.2550	Co-56(77.27d)
106	(n,He3)	-6.4779	6.5907	Fe-56
107	(n,a)	2.9010	0.0000	Fe-55(2.73y)
112	(n,pa)	-6.3134	6.4227	Mn-54(312.11d)

#### Схема уровней: (согласно оценке JEFF-3.1)

MT	LEVEL	ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	<b>0.0</b>		<b>0+</b>
51	1.4793		2+
52	2.5018		4+
53	2.8243		2+
54	2.9535		1+
55	2.9942		0+
56	3.0909		2+
57	3.3216		2+
58	3.4805		3+
91 (cont)	3.5813		

Радиоактивность: не радиоактивен.

## 2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность  $J^\pi = 0^+$ ;

2.2. Радиус рассеяния:  $R = 0.640 \cdot 10^{-12}$  см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Ниже рассматриваются пять оценок нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII betha1 version, BROND-2.2, FOND-2.2, JEFF-3.1 и JENDL-3.3. Короткая информация по каждой оценке представлена в **таблице 1**. По каждой оценке приводятся краткие пояснения.

### **ENDF/B**

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) содержит оценку ORNL, выполненную в 1989 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu.

Основные моменты:

Используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм THE HAUSER-FESHBACH.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от 1.E-5 эВ до 815 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены с помощью программы SAMMY при анализе данных экспериментов по пропусканию. В области энергий 450 – 812 кэВ в захват добавляется подложки (MF3, MT102) для согласования с усредненными экспериментальными данными команды S.M.Perey и др.

Полное сечение выше 812 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечения первых восьми уровней получены при помощи программы TNG, в которой учитывается вклад прямых процессов. Остальные уровни описаны с помощью программы DWUCK. Сечение континуума уровней получено при помощи TNG.

Сечение радиационного захвата выше 812 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечение реакции (n,2n) взято из оценки Павлика и Винклера. Сечение было слегка увеличено согласно расчетам по TNG.

Сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

В оценке используется оценка сечения неизвестной реакции (MT=5), которую надо добавлять к сумме парциальных сечений, чтобы получить полное сечение взаимодействия.

### **JEFF-3.1**

Главными исполнителями оценки являются S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (IRK) и A.Trkov (IJS).

Основные моменты оценки состоят в следующем:

В качестве стартовой версии оцененных данных взята оценка Ларсона и др. из Oak Ridge (ENDF/B-VI Revision 1)

Все нейтронные сечения выше резонансной области (812 кэВ) были переоценены и пополнены ковариационными матрицами. В качестве “priority” были отобраны следующие наборы данных:

MT1	EFF-2
MT16	IRDF-90 (evaluation Pavlik)(11)
MT22	ENDF-B/VI
MT28	EFF-2
MT51	EFF-2
MT52	EFF-2
MT53	EFF-2
MT54-58	EFF-2
MT91	ENDF-B-VI
MT102	EFF-2
MT103	evaluation Badikov (12)
MT104	ENDF-B/VI
MT105	JENDL-3
MT106	EFF-2
MT107	EFF-2
MT112	EFF-2

В дальнейшем оценка проводилась в три этапа:

На первом этапе были модифицированы все функции возбуждения на основе всей совокупности экспериментальных данных, имеющихся в библиотеке EXFOR.

На втором этапе была выполнена совместная оценка сечений, в результате которых получают альфа-частицы и дейтоны.

На третьем этапе проводилась оценка всех сечений от излишней информации.

В разделе ковариационных данных присутствует ковариационная матрица для процесса MT=854, до чего никто из других оценщиков не додумался.

### JENDL-3.3

В основе лежит оценка, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1990 году проведена модификация данных, а именно

- изменены энергии порогов в разделе mf=5 для реакций mt=16, 22 и 28;
- небольшая модификация данных проведена в разделе mf=12, mt=16, 91 и 102.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена. Изменения коснулись данных в следующих разделах

- (4,16-28), (4,91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (5,16-91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (12,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi;
- (15,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi.

В 2000 году данные переоценены N.Yamamuro (TIT) и скомпилированы K.Shibata (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

MF1	
MT1	сечение переоценено выше 557 кэВ;
MT2	переоценено с учетом баланса сечений;
MT16, 22, 28,	сечения вычислено с помощью SINCROS-II;
103, 104, 105,	сечения вычислено с помощью SINCROS-II;
106, 107, 111,	сечения вычислено с помощью SINCROS-II;
203, 204, 205,	сечения вычислено с помощью SINCROS-II;
206, 207	сечения вычислено с помощью SINCROS-II.
MF4, MT16, 22, 28, 91	исключены.
MF5, MT16, 22, 28, 91	исключены.

MF6

MT16, 22, 28, 91,      взяты из JENDL fusion file;

203, 204, 205,      взяты из JENDL fusion file;

206, 207              взяты из JENDL fusion file.

MF12, MT102 и MF15, MT102   пересмотрены.

В 2001 году были пересмотрены данные в области резонансных энергий. Параметры резонансных уровней для формализма Райха-Мура взяты из работы Perey (ORNL), т.е. те же, что и в оценке ENDF/B-VI.

В 2002 году для ковариационных матриц использованы результаты работы Shibata и Oh.

## **ФОНД-2.2**

Для Ni-58 после анализа имевшихся в то время (~2000 г) оцененных нейтронных данных в библиотеку ФОНД-2.2 включена оценка ORNL, выполненная в 1989 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu. Таким образом, нейтронные данные из ФОНД-2.2 совпадают с оценкой из библиотеки EMDF/B-VI ниже 20 МэВ.

## **БРОНД-2.2**

В основе лежит оценка для N-58, выполненная в 1985 году Блохиным А., Игнатиюком А. и др.

Основные моменты оценки:

В области резонансных энергий (от 1.E-5 эВ до 690 кэВ) сечения восстанавливаются с помощью двух псевдоизотопов, имеющих разные границы области разрешенных и неразрешенных резонансов. Первый псевдоизотоп содержит информацию о резонансных параметрах S-волны. Область разрешенных резонансов до 600 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов. Второй – содержит данные о резонансных параметрах Р- и D-волны. Область разрешенных резонансов до 200 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов.

В области разрешенных резонансов рекомендован формализм Брейта-Вигнера.

В области высоких энергий сечения и угловые распределения вычислены по оптической модели.

Сечения пороговых реакций рассчитывались с учетом предравновесного процесса.

## **ВЫВОДЫ:**

В области резонансных энергий имеется только одна современная оценка резонансных параметров, которая присутствует в четырех из пяти рассмотренных библиотек.

Различия библиотечных данных находятся в области энергий выше 1 МэВ, и главным образом, в оценке пороговых реакций.

В подтверждение этого в **таблице 2** приводятся некоторые интегральные характеристики, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY (version 6.13)

Таблица 1 – Общая информация об оцененных нейтронных данных для 28-Ni-58 из различных библиотек.

	ENDF/B-VIIb1	JENDL-3.3	BROND-2.2	FOND-2.2	JEFF-3.1
Оценка	EVAL-OCT89 D.C. Larson, C.M. Perey, D.M. Hetrick, and C.Y. Fu (ORNL)	EVAL-MAR87 S.Iijima, REV4-MAY00	EVAL-MAY85 A.I.BLOKNIN, A.V.IGNATYUK	EVAL-OCT89 D.C. Larson, C.M. Perey, D.M. Hetrick, and C.Y. Fu (ORNL)	EVAL-AUG99 S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (EJC)
MF=2	RRR 0-812 keV (RM)	RRR 0-812 keV (RM)	RRR 0-600 keV (MLBW) URR 600-690 keV	RRR 0-812 keV (RM)	RRR 0-812 keV (RM)
MF=3	MT=1,2,4, <b>5</b> ,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107	MT=1,2,4,16,22,28, 51- 65,91, 102,103,104,105,106, 107, <b>111</b> ,203,204,205	MT=1,2,4,16,22,28, 51-72,91, 102,103,107,251	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,105, 106,107, <b>112</b>
MF=4	MT=2	MT=2,51-65	MT=2, 16,22,28, 51-72,91	MT=2	MT=2
MF=5			MT=16,22,28, 51-72,91		
MF=6	MT= <b>5</b> ,16,22,28, 51-58,91,103,107	MT=16,22,28,91, 203,204,205,206,207		MT=16,22,28, 51-58,91,103,107	MT=16,22,28, 51-58,91,103,107
MF=12	MT=51-58,102	MT=16,22,28, 51-65,91,102,103,107		MT=51-58,102	MT=51-58,102
MF=14	MT=51-58,102	MT=16,22,28, 51-65,102,103,107		MT=51-58,102	MT=51-58,102
MF=15	MT=102	MT=16,22,28,91, 102,103,107		MT=102	MT=102
MF=33	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-65, 102,103,104,105,107		MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91, 102,103,104,107	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-58,91,102,103, 104,105,106,107, <b>112,854</b>
MF=34		MT=2			MT=2

Таблица 2 – Некоторые характеристики оцененных нейтронных данных для 28-Ni-58 из различных библиотек.

LIB	MT	Reaction	Sig(2200)	Sig(Ezero)	Avg-Sigma	G-fact	Res	Integ	Sig(Fiss)	Sig(E14)
ENDF/BVII	1	Total	2.96462E+01	2.95921E+01	3.2802E+01	1.11928	2.67529E+02	3.63862E+00	2.69053E+00	
BROND-2	1	Total	3.31142E+01	3.30603E+01	3.6726E+01	1.12192	3.29069E+02	4.47848E+00	2.66202E+00	
FOND-2.2	1	Total	2.96462E+01	2.95921E+01	3.2802E+01	1.11928	2.67551E+02	3.76791E+00	2.69053E+00	
JEFF-3.1	1	Total	2.96462E+01	2.95921E+01	3.2802E+01	1.11928	2.67530E+02	3.65187E+00	2.71483E+00	
JENDL-3.3	1	Total	2.96462E+01	2.95921E+01	3.2802E+01	1.11928	2.67528E+02	3.68488E+00	2.76128E+00	
ENDF/BVII	2	Elastic	2.50228E+01	2.50182E+01	2.8229E+01	1.14121	2.65359E+02	3.12274E+00	1.26674E+00	
BROND-2	2	Elastic	2.85724E+01	2.85672E+01	3.2233E+01	1.14121	3.26923E+02	3.97032E+00	1.32190E+00	
FOND-2.2	2	Elastic	2.50228E+01	2.50182E+01	2.8229E+01	1.14121	2.65382E+02	3.25203E+00	1.26674E+00	
JEFF-3.1	2	Elastic	2.50228E+01	2.50182E+01	2.8229E+01	1.14121	2.65360E+02	3.16236E+00	1.29648E+00	
JENDL-3.3	2	Elastic	2.50228E+01	2.50182E+01	2.8229E+01	1.14121	2.65358E+02	3.24328E+00	1.33921E+00	
ENDF/BVII	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	3.92440E-01	3.18626E-01	
BROND-2	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	3.88971E-01	2.76578E-01	
FOND-2.2	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	3.92440E-01	3.18626E-01	
JEFF-3.1	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	3.66864E-01	3.22280E-01	
JENDL-3.3	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	3.18321E-01	2.96603E-01	
ENDF/BVII	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	6.98002E-06	2.28810E-02	
BROND-2	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	6.14006E-06	2.25000E-02	
FOND-2.2	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	6.98002E-06	2.28810E-02	
JEFF-3.1	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	6.97460E-06	2.31210E-02	
JENDL-3.3	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	8.15035E-06	3.06470E-02	
ENDF/BVII	102	n,gamma	4.62345E+00	4.57393E+00	4.5732E+00	1.00060	2.16967E+00	6.59060E-03	4.79200E-04	
BROND-2	102	n,gamma	4.54172E+00	4.49308E+00	4.4923E+00	1.00060	2.14605E+00	8.91404E-03	1.04686E-03	
FOND-2.2	102	n,gamma	4.62345E+00	4.57393E+00	4.5732E+00	1.00060	2.16962E+00	6.59138E-03	4.79200E-04	
JEFF-3.1	102	n,gamma	4.62345E+00	4.57393E+00	4.5732E+00	1.00059	2.16968E+00	7.84684E-03	4.99540E-04	
JENDL-3.3	102	n,gamma	4.62345E+00	4.57393E+00	4.5732E+00	1.00060	2.16965E+00	8.82602E-03	5.39772E-05	
ENDF/BVII	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.06535E-01	3.74070E-01	
BROND-2	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.06580E-01	4.12000E-01	
FOND-2.2	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.06535E-01	3.74070E-01	
JEFF-3.1	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.08217E-01	3.93140E-01	
JENDL-3.3	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.06908E-01	3.29787E-01	

Таблица 2 (продолжение) – Некоторые характеристики оцененных нейтронных данных для 28-Ni-58 из различных библиотек.

LIB	MT	Reaction	Sig(2200)	Sig(Ezero)	Avg-Sigma	G-fact	Res	Integ	Sig(Fiss)	Sig(E14)
ENDF/BVII	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.64616E-05	1.58610E-02	
FOND-2.2	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.64616E-05	1.58610E-02	
JEFF-3.1	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.56464E-05	1.56725E-02	
JENDL-3.3	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	6.84089E-06	8.18091E-03	
JEFF-3.1	105	n,t	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.58636E-07	7.10900E-06	
JENDL-3.3	105	n,t	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	7.20047E-09	1.63456E-06	
JEFF-3.1	106	n,He3	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	5.10608E-10	0.00000E+00	
JENDL-3.3	106	n,He3	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.30443E-08	2.50179E-05	
ENDF/BVII	107	n,alpha	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	9.94403E-03	1.12677E-01	
BROND-2	107	n,alpha	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	3.48729E-03	1.18000E-01	
FOND-2.2	107	n,alpha	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	9.94403E-03	1.12677E-01	
JEFF-3.1	107	n,alpha	7.03139E-15	7.18713E-15	1.5815E-14	2.27532	2.63879E-08	6.24124E-03	9.52400E-02	
JENDL-3.3	107	n,alpha	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	6.81305E-10	7.16269E-03	1.05847E-01	



### 3. Сечения нейтронных реакций

#### 3.1. Полное сечение

На рисунке 1 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 10 эВ -10 МэВ

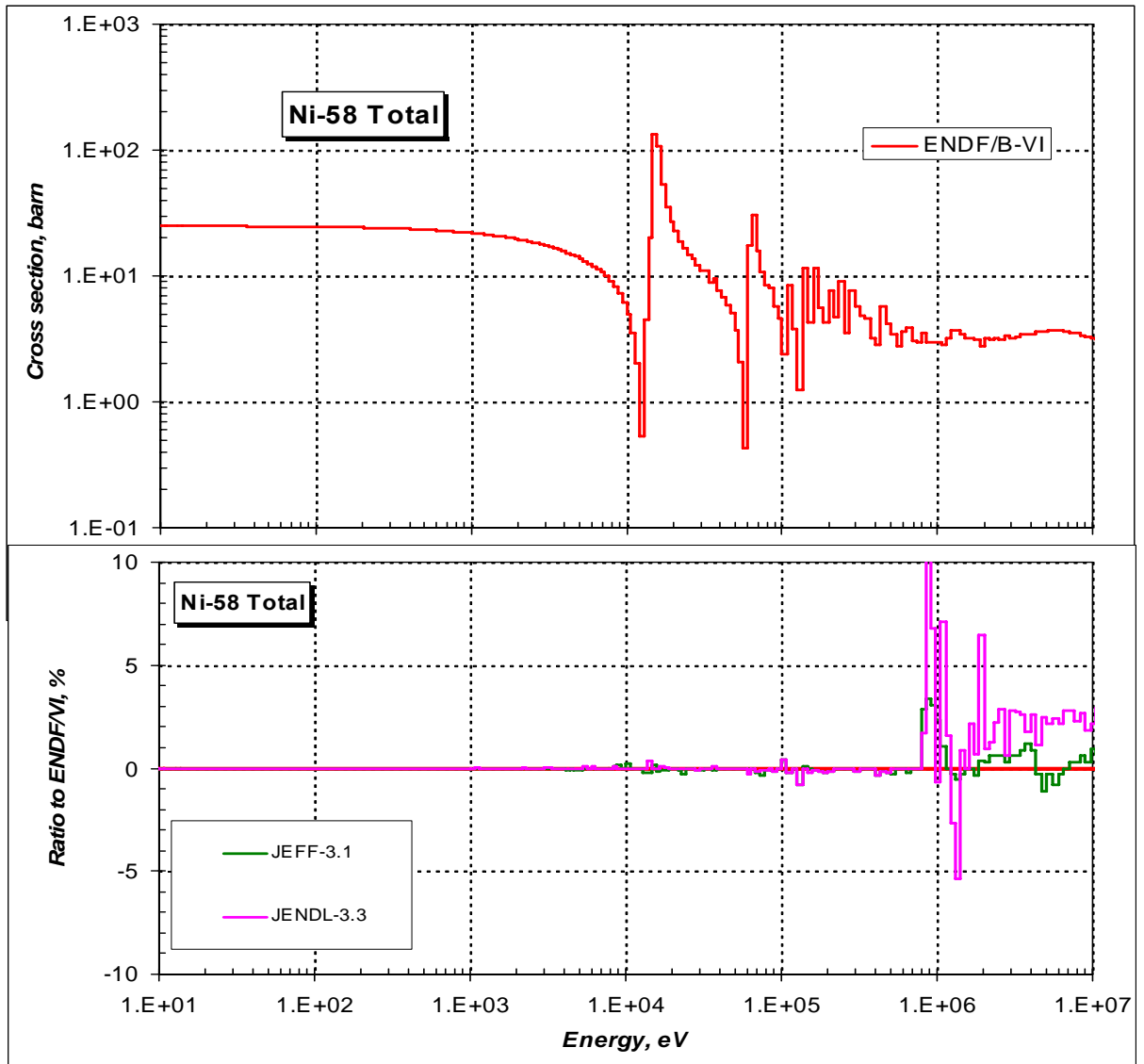


Рисунок 1 – Ход полного сечения Ni-58 в области энергий 10 эВ – 10 МэВ.

Из рисунка 1 видно, что в резонансной области энергий ~ до 800 кэВ различий в сечениях нет. Они появляются выше 800 кэВ.

Ниже, на рисунке 2 показан аналогичный ход полного сечения в области энергии 100 кэВ -10 МэВ.

Отметим, что сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривались, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

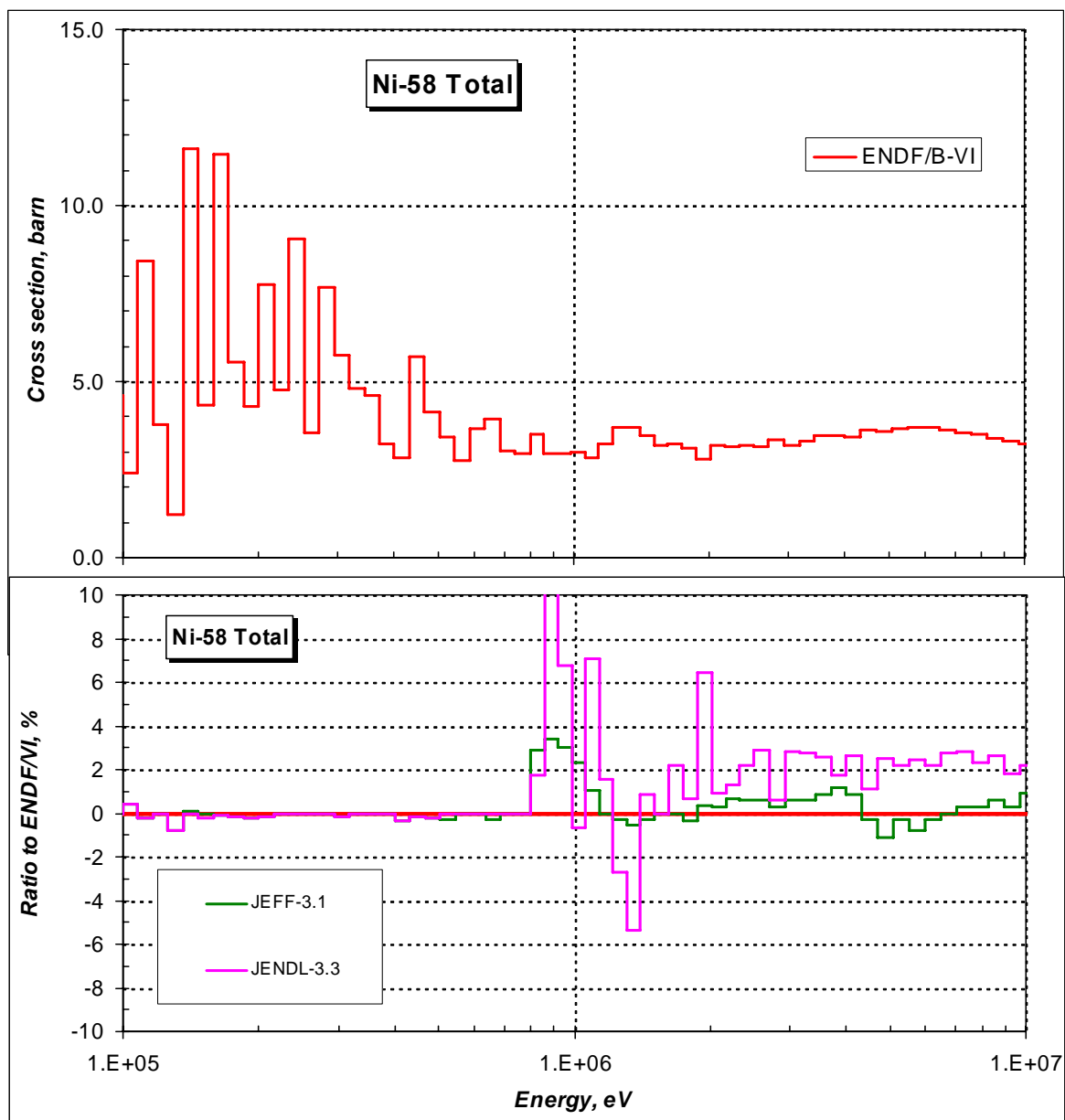


Рисунок 2 – Ход полного сечения Ni-58 в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

Из представленной на рисунке 2 информации видно, что различия между JEFF-3.1 и ENDF/B-VI носят не принципиальный характер. В тоже время, различия между JENDL-3.3 и ENDF/B-VI систематически различаются на  $\sim 2\%$ .

На рисунках 3-4 сравнивается ход сечения из ENDF/B-VI и JENDL-3.3 с имеющимися в этой области энергий экспериментальными данными. Видно, что оценка ENDF/B-VI лучше согласуется с экспериментальными данными, чем оценка JENDL-3.3.

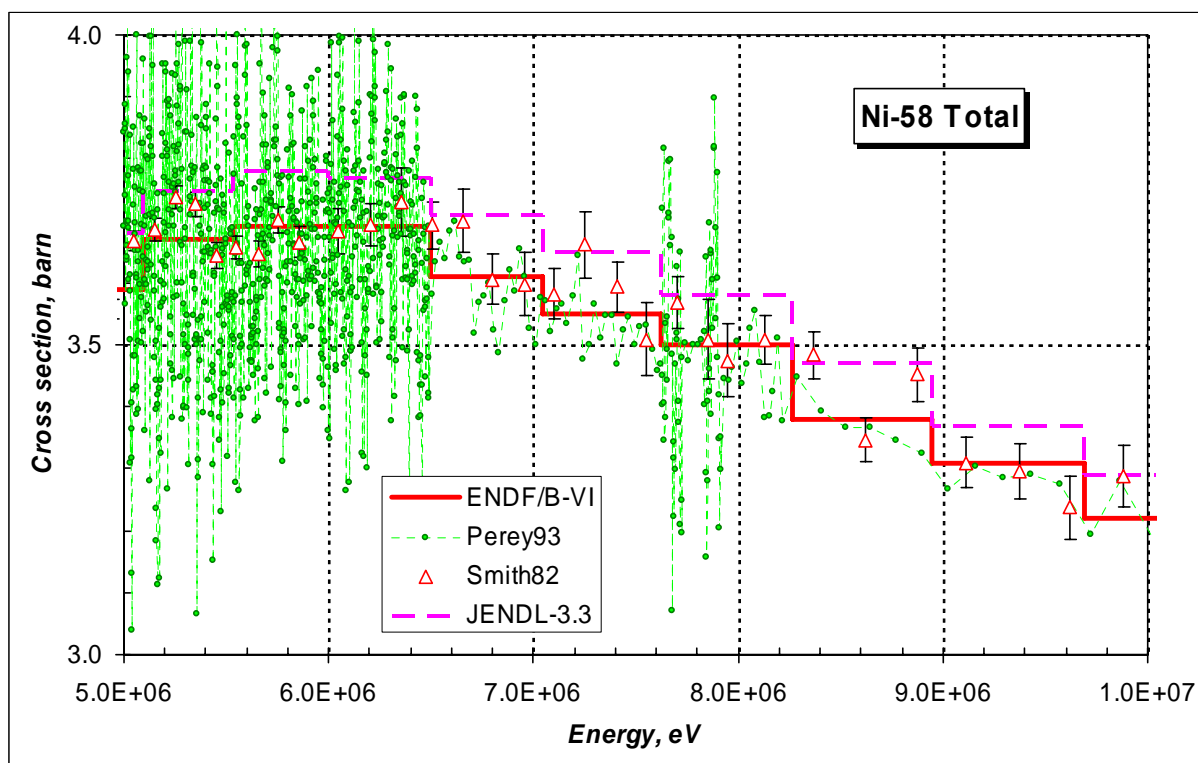


Рисунок 3 – Сравнение полного сечения Ni-58 в области энергий 5 – 10 МэВ.

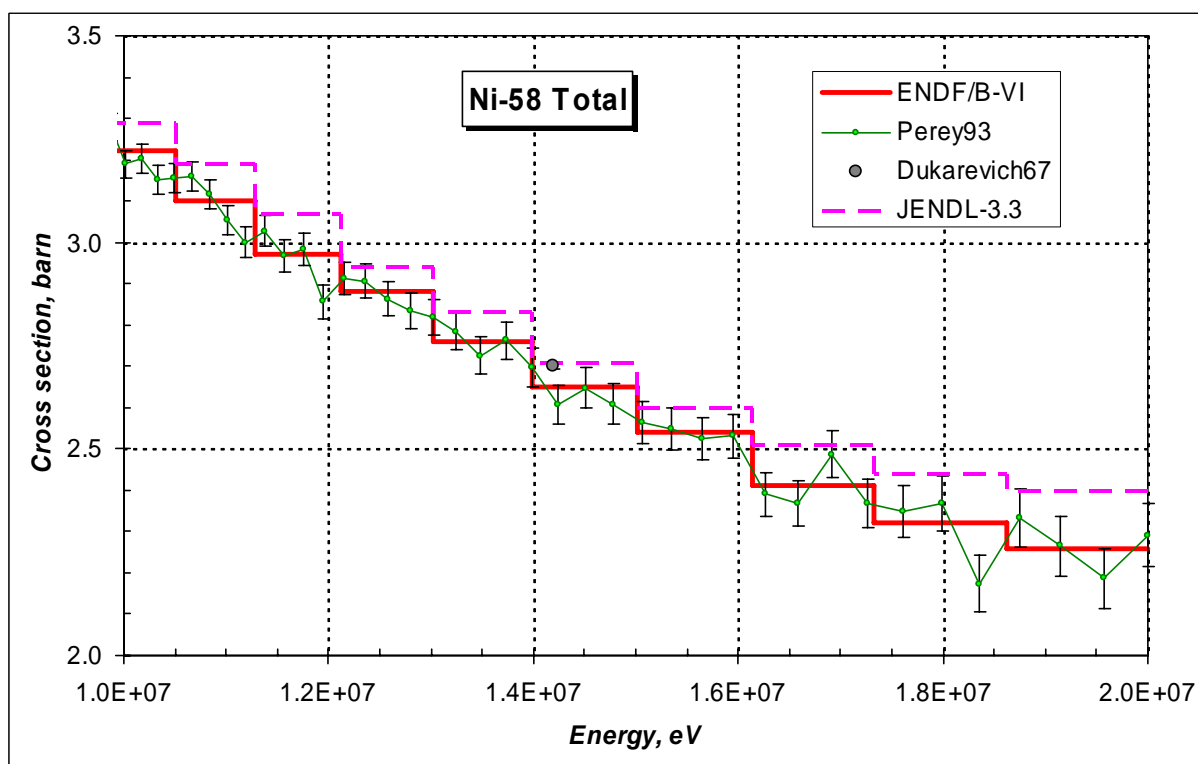


Рисунок 4 – Сравнение полного сечения Ni-58 в области энергий 10 – 20 МэВ.

### 3.2. Сечение упругого рассеяния

На рисунке 5 показан энергетический ход сечения упругого рассеяния нейтронов из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 100 кэВ -10 МэВ, где, как было видно выше, различия в оценках максимальны.

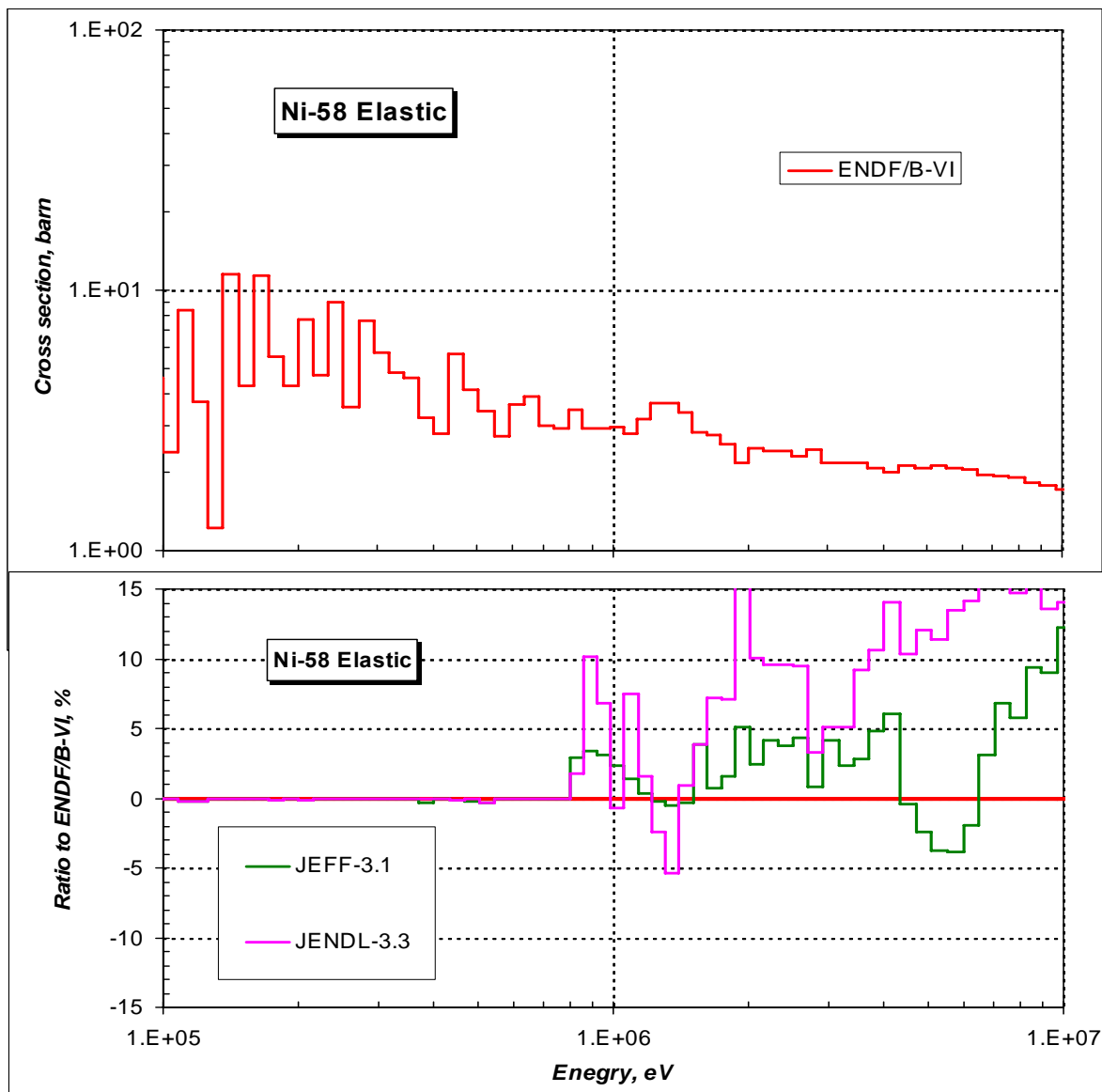


Рисунок 5 – Ход сечения упругого рассеяния области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

Из рисунка видно, что различия между оценками ENDF/B-VI и JEFF-3.1 составляют ~ 5%, а между ENDF/B-VI и JENDL-3.3 ~ 10-15 %. Различия в оценке сечения возрастают с ростом энергии.

На рисунках 6-7 показано сравнение рассматриваемых оценок с имеющимися в нашем распоряжении экспериментальными данными из библиотеки EXFOR. На рисунке 6 сравнение дано в области энергий 1-15 МэВ, а на рисунке 7 – в более узкой энергетической области 1 – 5 МэВ.

Из представленного сравнения видно, что наилучшее согласие с экспериментальными данными имеет оценка ENDF/B-VI, но и она выше 7 МэВ лежит несколько выше экспериментальных данных Guss(1985).

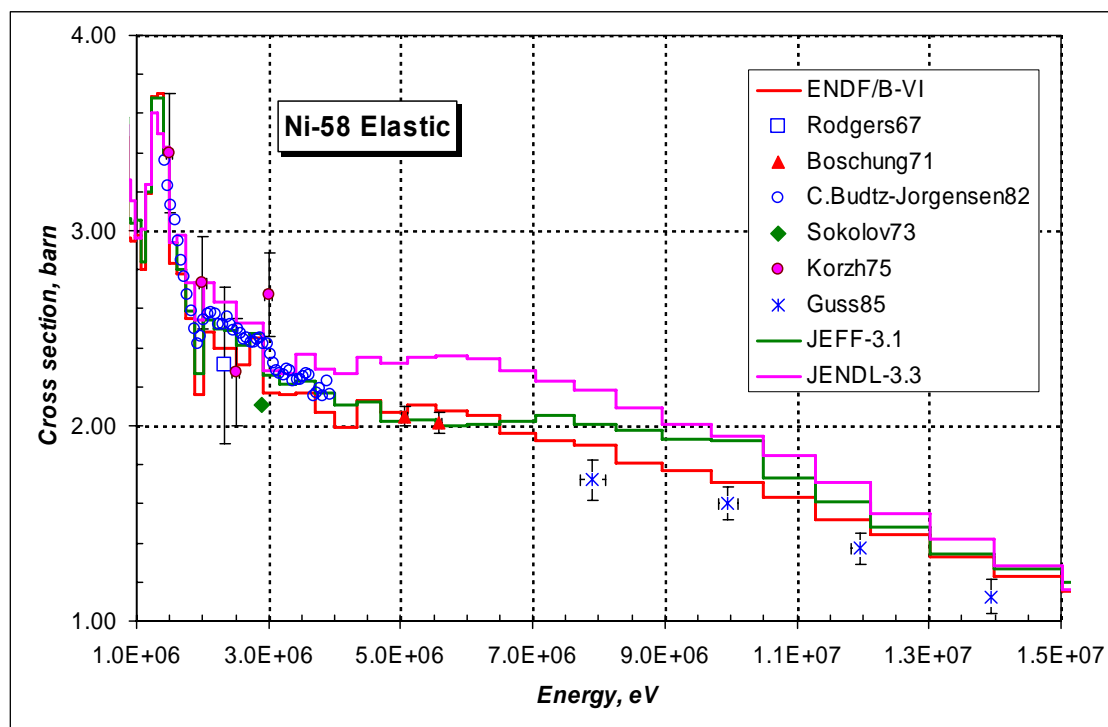


Рисунок 6 – Сравнение сечения упругого рассеяния в области энергий 1 – 15 МэВ.

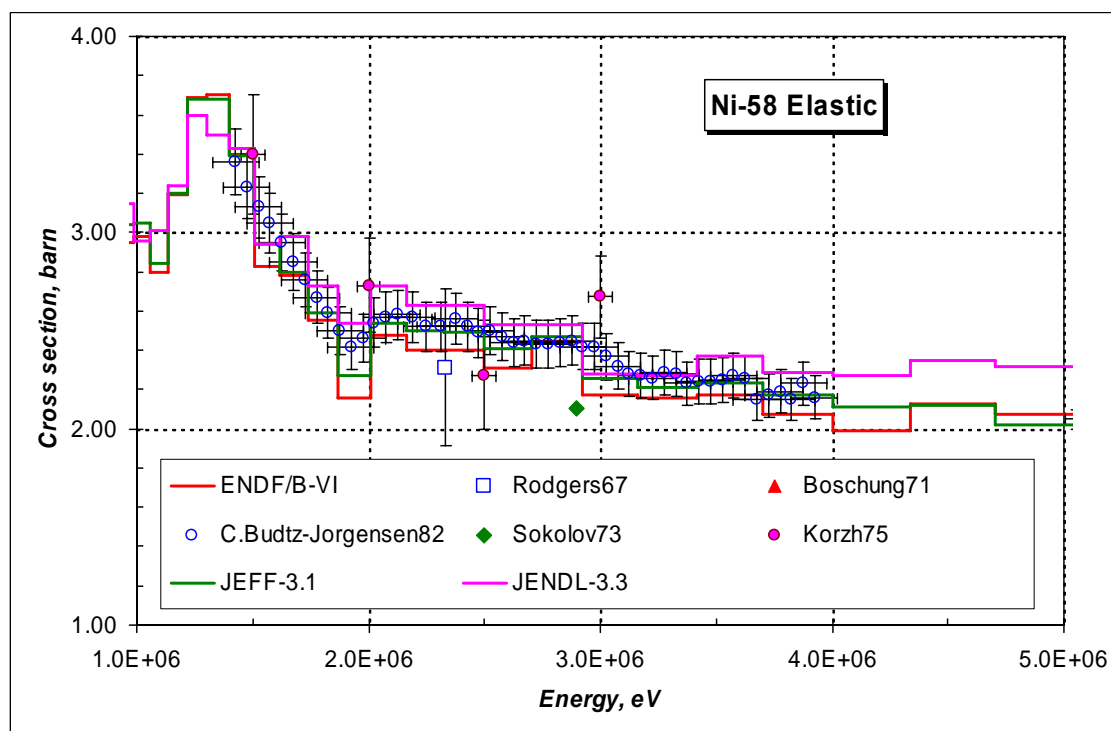


Рисунок 7 – Сравнение сечения упругого рассеяния в области энергий 1 – 5 МэВ.

### 3.3. Сечение радиационного захвата

Сечение радиационного захвата, как и полное сечение, различается в области энергий выше 800 кэВ. Сравнение сечения радиационного захвата с экспериментальными данными показано на рисунке 8.

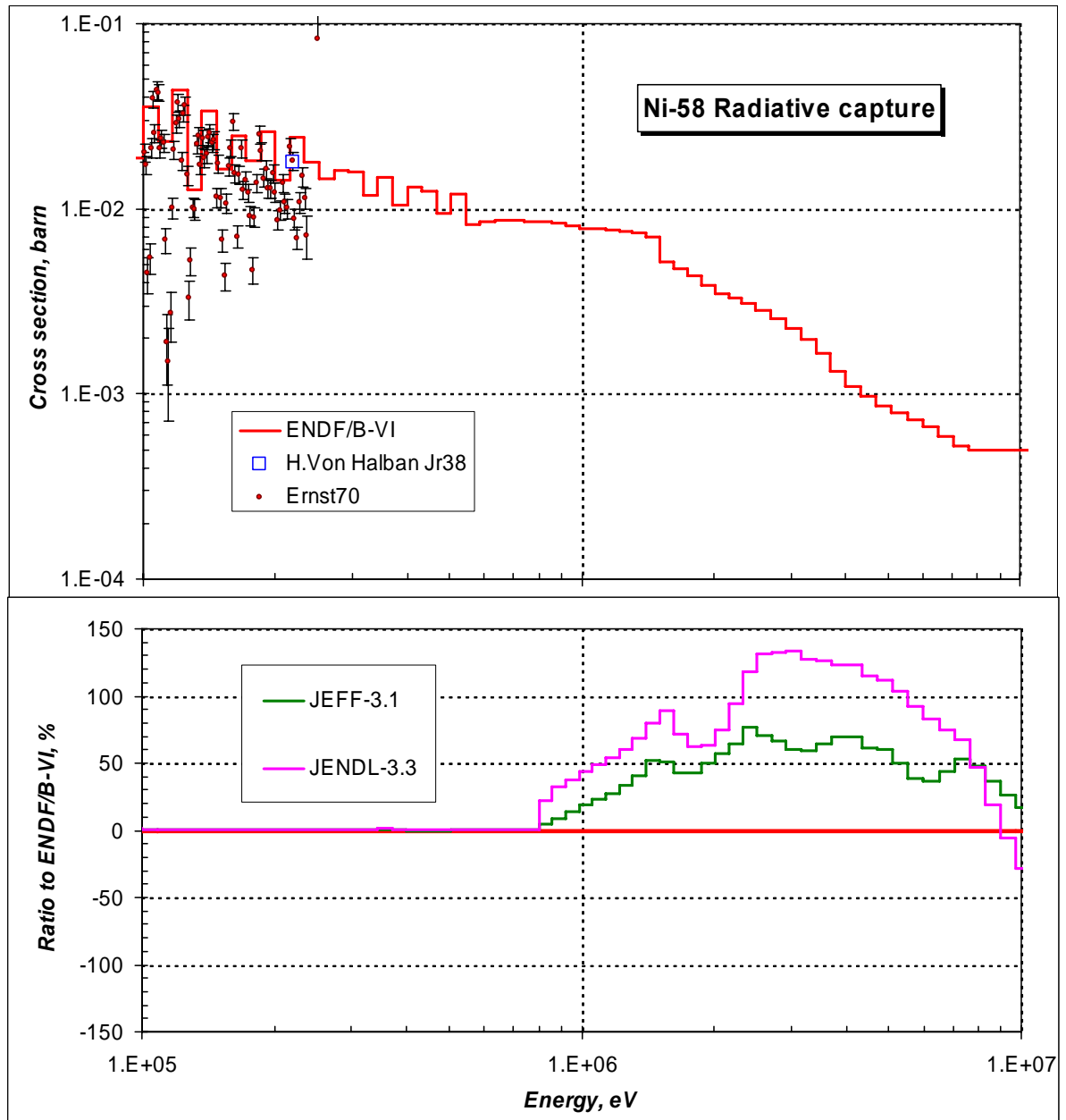


Рисунок 8 – Ход сечения захвата в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

Из рисунка видно, что различие в сечениях между оценками находится в области энергий, где экспериментальные данные отсутствуют. Т.е. различия в сечениях обусловлены результатами расчетов. При этом сами сечения на порядок уменьшаются.

### 3.4. Сечение неупругого рассеяния

Сравнение различных оценок приведено на рисунке 9. Видно, что в отличие от ENDF/B-VI и JENDL-3.3, сечение неупругого рассеяния в JEFF-3.1 носит ярко выраженный резонансный характер. Соответствие резонансной структуры, наблюдаемой в полном сечении и в сечении неупругого рассеяния для оценки JEFF-3.1, показано на рисунке 10.

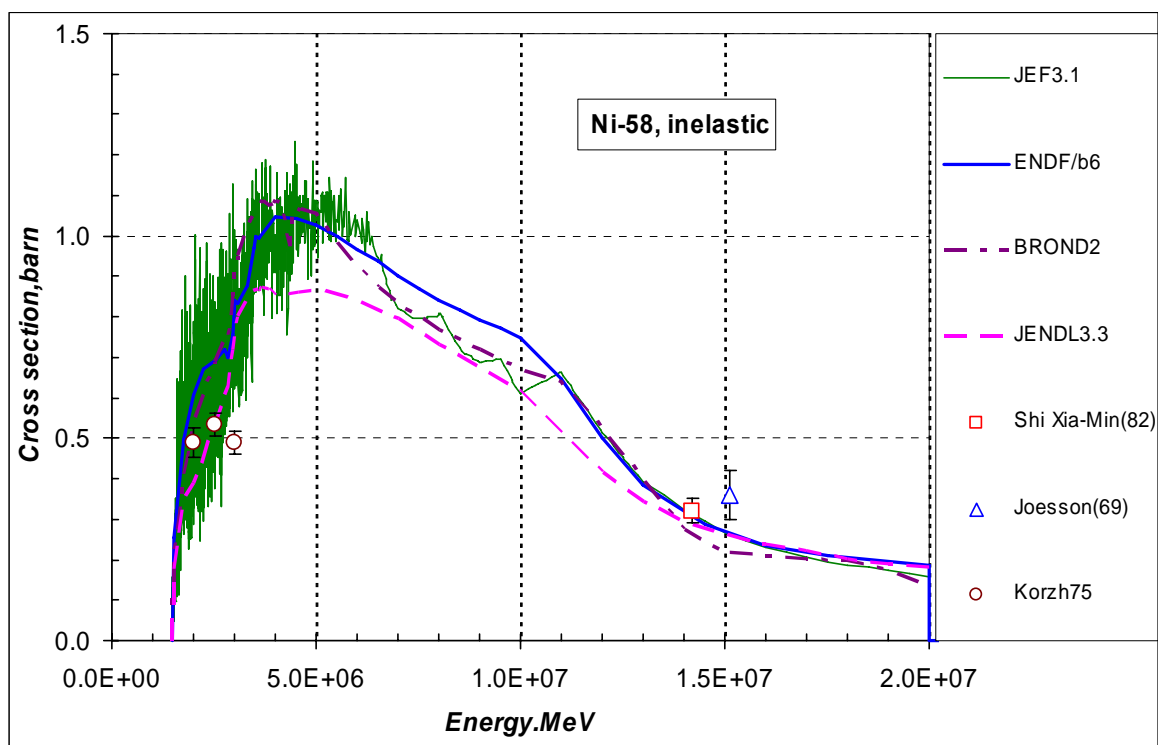


Рисунок 9 – Сечение неупругого рассеяния на Ni-58.

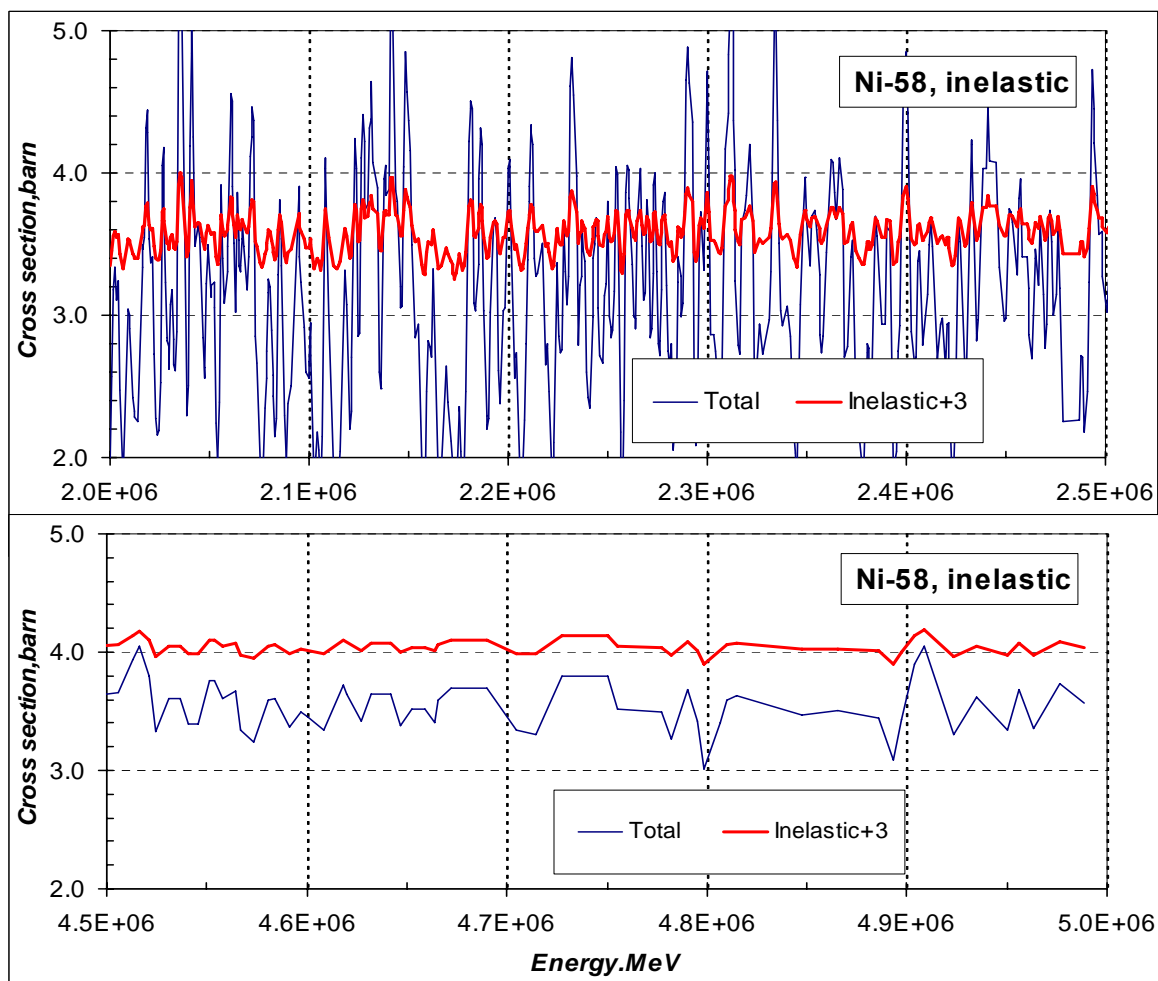


Рисунок 10 – Структура полного сечения и сечения неупругого рассеяния.

Из рисунка 10 видно, что структура неупругого рассеяния в JEFF-3.1 коррелирует со структурой полного сечения. Следует отметить, что оценка JENDL-3.3 имеет наиболее низкие значения сечения неупругого рассеяния в области энергий до 10 МэВ.

### 3.5. Сечение реакции $(n,2n)$

На рисунке 11 показано сравнение реакции  $(n,2n)$  оцененных и экспериментальных данных.

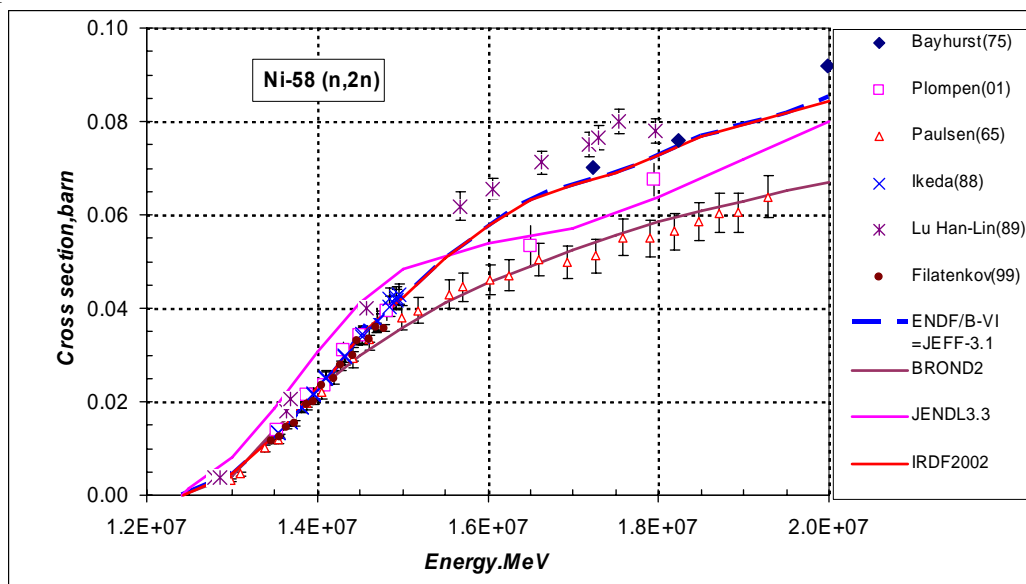


Рисунок 11 – Сечение реакции  $(n,2n)$  на Ni-58.

Из представленного на рисунке 11 сравнения видно, что связка ENDF/B-VI – JEFF-3.3 – IRDF-2002 наиболее согласована с совокупным набором экспериментальных микроданных.

### 3.6. Сечения реакций образования протонов $(n,p)$ и $(n,np)$

На рисунках 12 – 13 показано сравнение сечений реакций с образованием протонов.

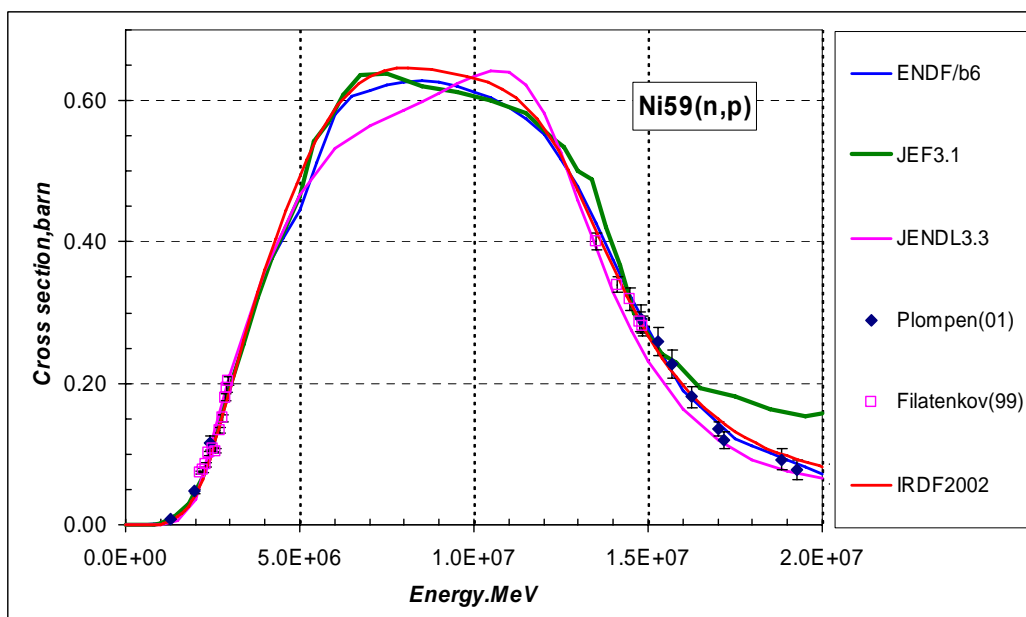


Рисунок 12 – Сечение реакции  $(n,p)$  на Ni-58.



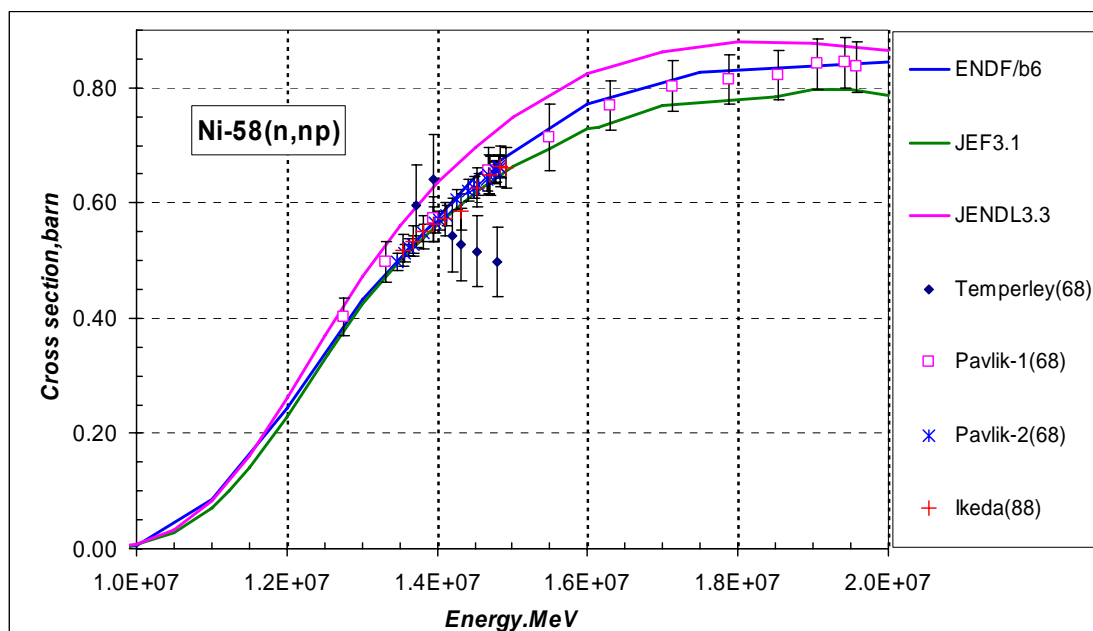


Рисунок 13 – Сечение реакции (n,np) на Ni-58.

Из приведенного сравнения на рисунке 12 видно, что до 15 МэВ все оценки реакции (n,p), за исключением JENDL-3.3 хорошо согласуются с последними экспериментальными данными. Выше 15 МэВ оценка из JEFF-3.1 не оправдано высока.

Сечение реакции (n,np) из ENDF/B-VI и JEFF-3.1 наилучшим образом согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

### 3.7. Сечения реакции образования альфа частиц (n,a) и (n,na)

На рисунках 14 – 15 показано сравнение сечений реакции (n,a) в области порога реакции и в области энергий до 20 МэВ.

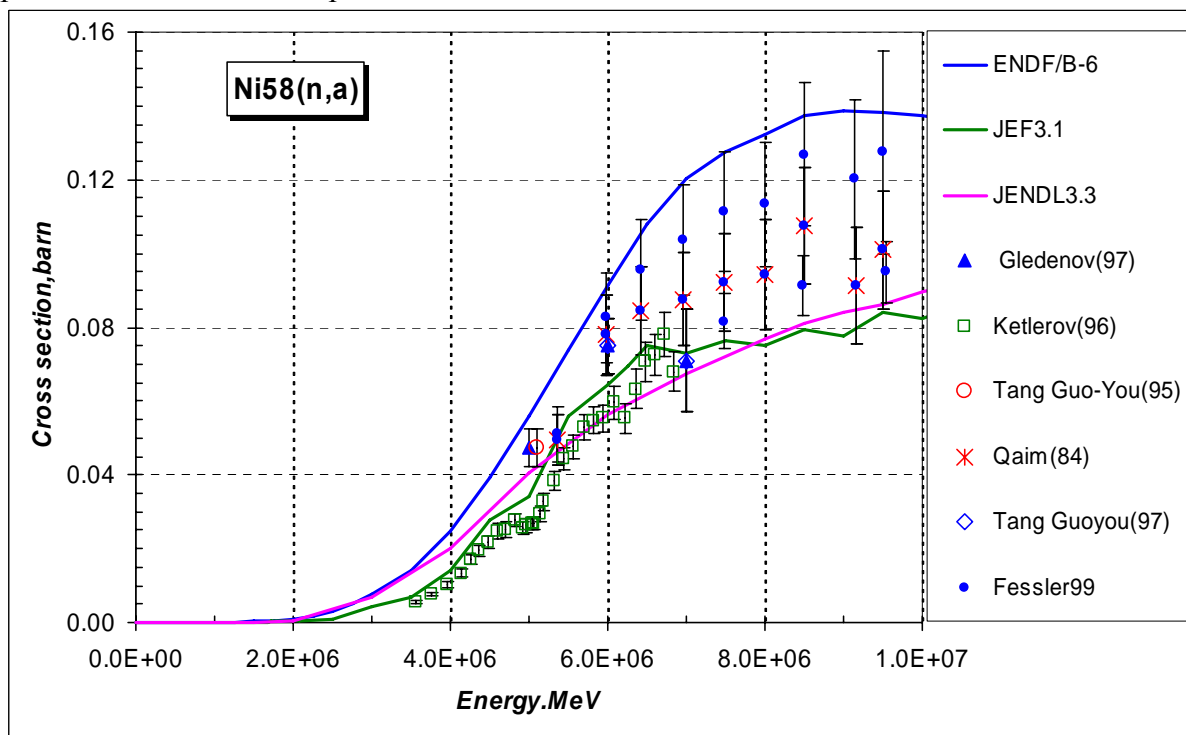


Рисунок 14 – Сечение реакции (n,a) на Ni-58 в области порога.

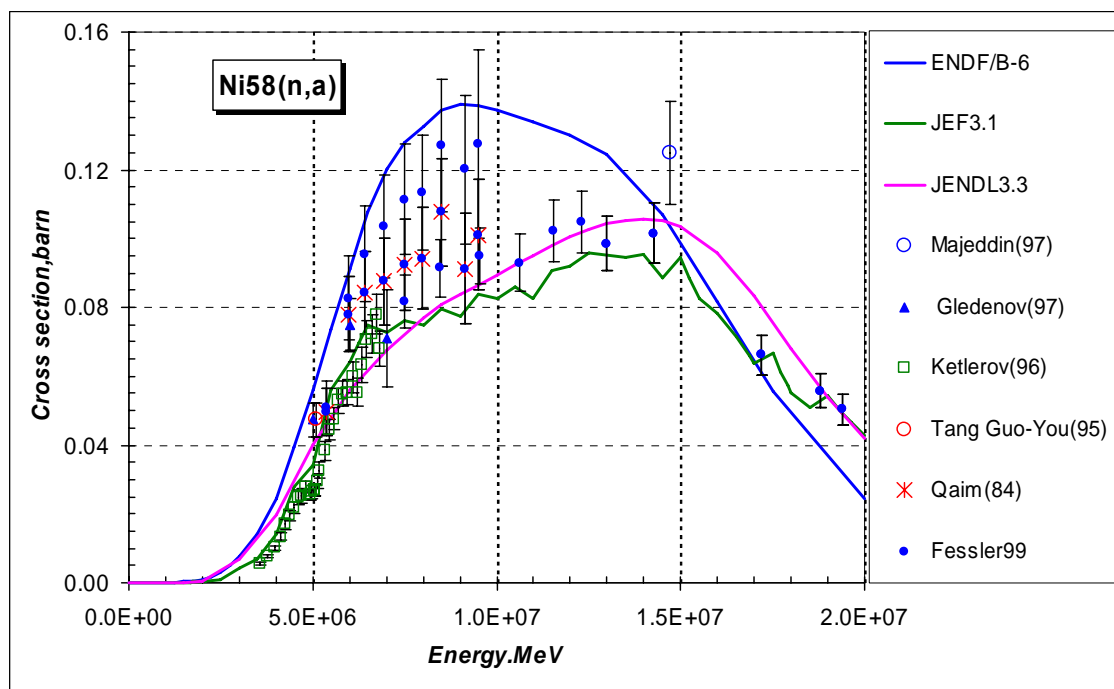


Рисунок 15 – Сечение реакции (n,a) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

На рисунке 16 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,np) с имеющимися экспериментальными данными.

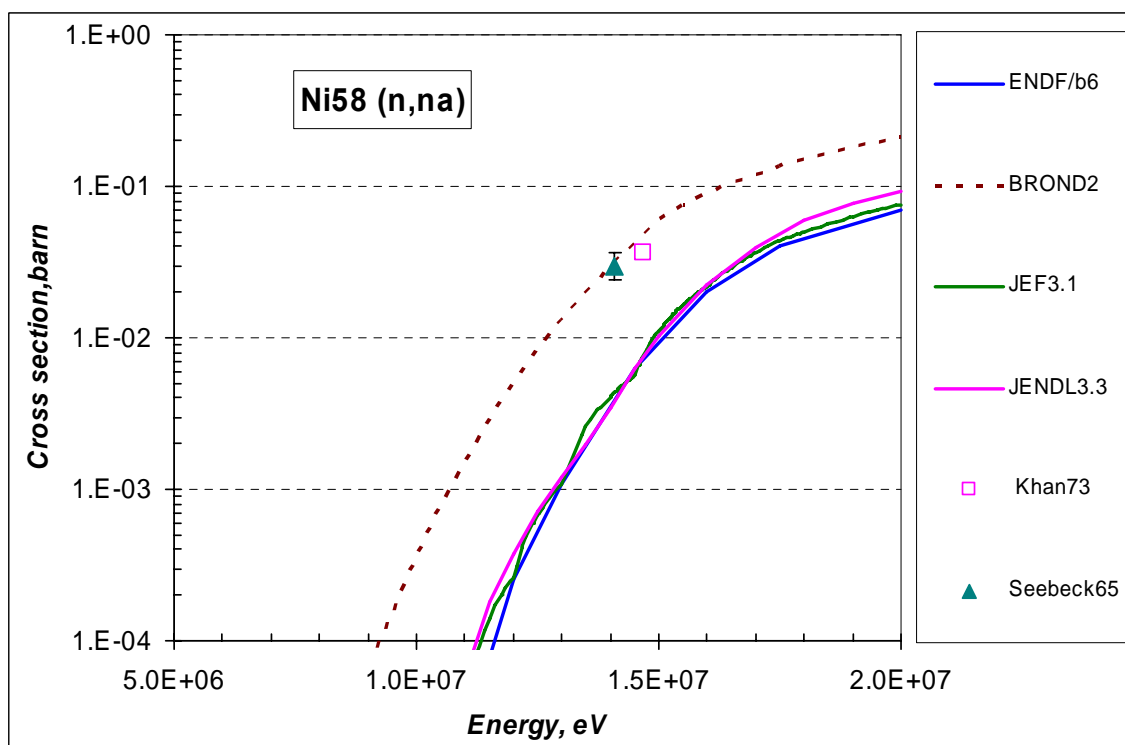


Рисунок 16 – Сечение реакции (n,np) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

Из рисунка видно, что все оценки, за исключением БРОНД-2, дружно не вписываются в эксперимент. Вероятно, имеет смысл незначительно поправить современные оценки по аналогии с поведением оценки из БРОНД-2.

### 3.7. Сечение реакции с образованием дейтронов (n,d).

На рисунке 17 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,d) с имеющимися экспериментальными данными. Как правило, в библиотеке экспериментальных данных EXFOR для этой реакции приводится суммарное сечение реакций (n,p) + (n,d). Прямых измерений немного, и они показаны на рисунке 17.

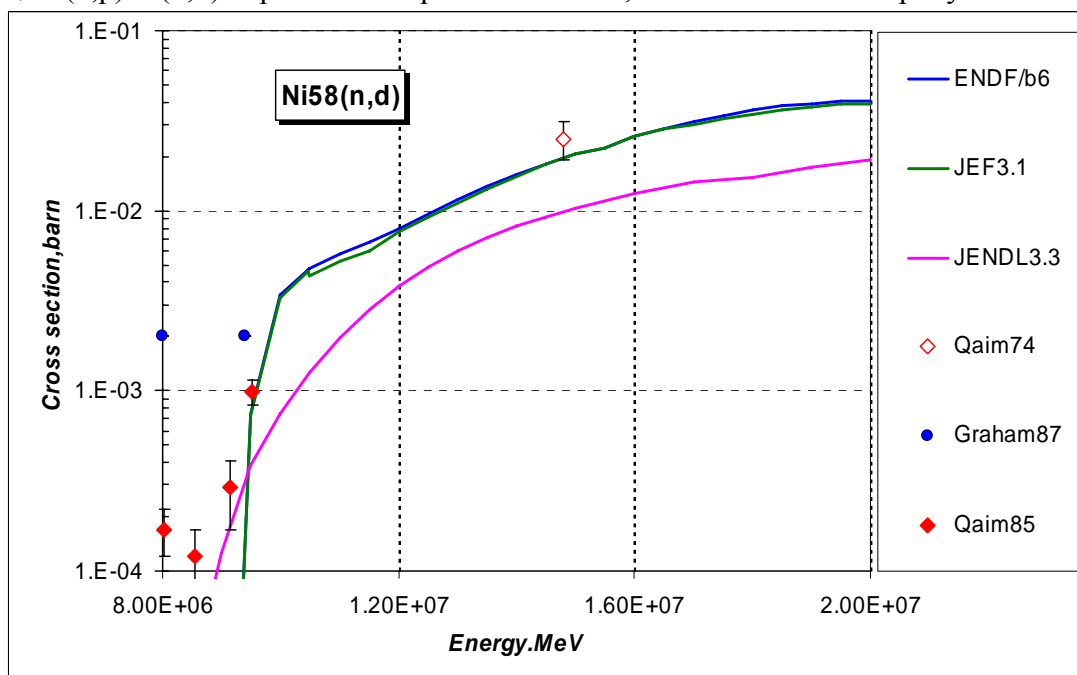


Рисунок 17 – Сечение реакции (n,d) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

Из рисунка видно, что наилучшим образом с экспериментом согласуются оценки из ENDF/B-VI и JEFF-3.1. Но и для них желательно поправить порог реакции согласно эксперименту Qaim85.

### 3.8 Сечение реакции с образованием трития (n,t) и гелия -3 (n,He-3).

Сечения указанных реакций имеют величины порядка микробарн и высокий порог реакции, поэтому в оценках ENDF/B-VI и JEFF-3.1 они не приводятся. Тем не менее, информация по таким реакциям имеется, и они без особых проблем могут быть добавлены в оценки JEFF-3.1 и ENDF/B-VI.

#### Выводы

Оцененные сечения нейтронных реакций в области энергий от 10E-5 эВ до 20 МэВ предпочтительно взять из библиотеки JEFF-3.1, которые представляют собой европейскую ревизию данных из библиотеки ENDF/B-VII.

## 4. Угловые распределения нейтронов

### 4.1. Угловые распределения при упругом рассеянии нейтронов

Экспериментальных данных по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов не много. Из них наиболее современных данных это:

- детали по энергии (вплоть до 813 кэВ) данные угловых распределений нейтронов для углов рассеяния  $39^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $140^\circ$  и  $160^\circ$  группы Perey et al, выполненные в 1993 на ORELA;

- данные Smith et al, выполненные в 1992 году в области более высоких энергий от 4.5 МэВ до 9.99 МэВ на установке DINAM (Tandem Dinamitron);

- данные группы Guss et al, выполненные в 1985 году в области высоких энергий от 7.9 МэВ до 13.94 МэВ на установке VDGT.

Отметим, что в JEFF-3.1 данные по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов взяты из оценки ENDF/B без изменений.

На рисунке 18 приведено сравнение оцененных угловых распределений при упругом рассеянии с экспериментальными данными группы Guss et al (1985).

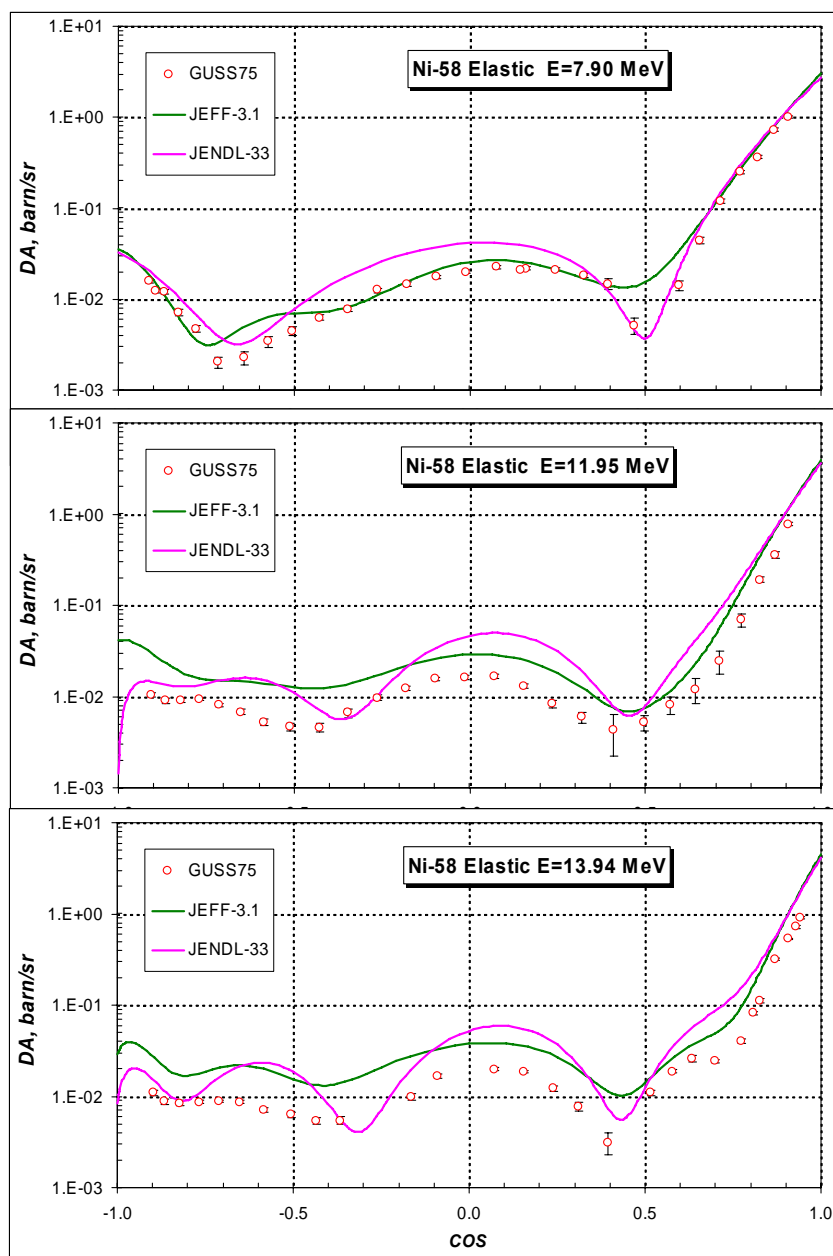


Рисунок 18 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

Ниже на рисунке 19 показано аналогичное сравнение с экспериментальными данными группы Smith et al (1992).

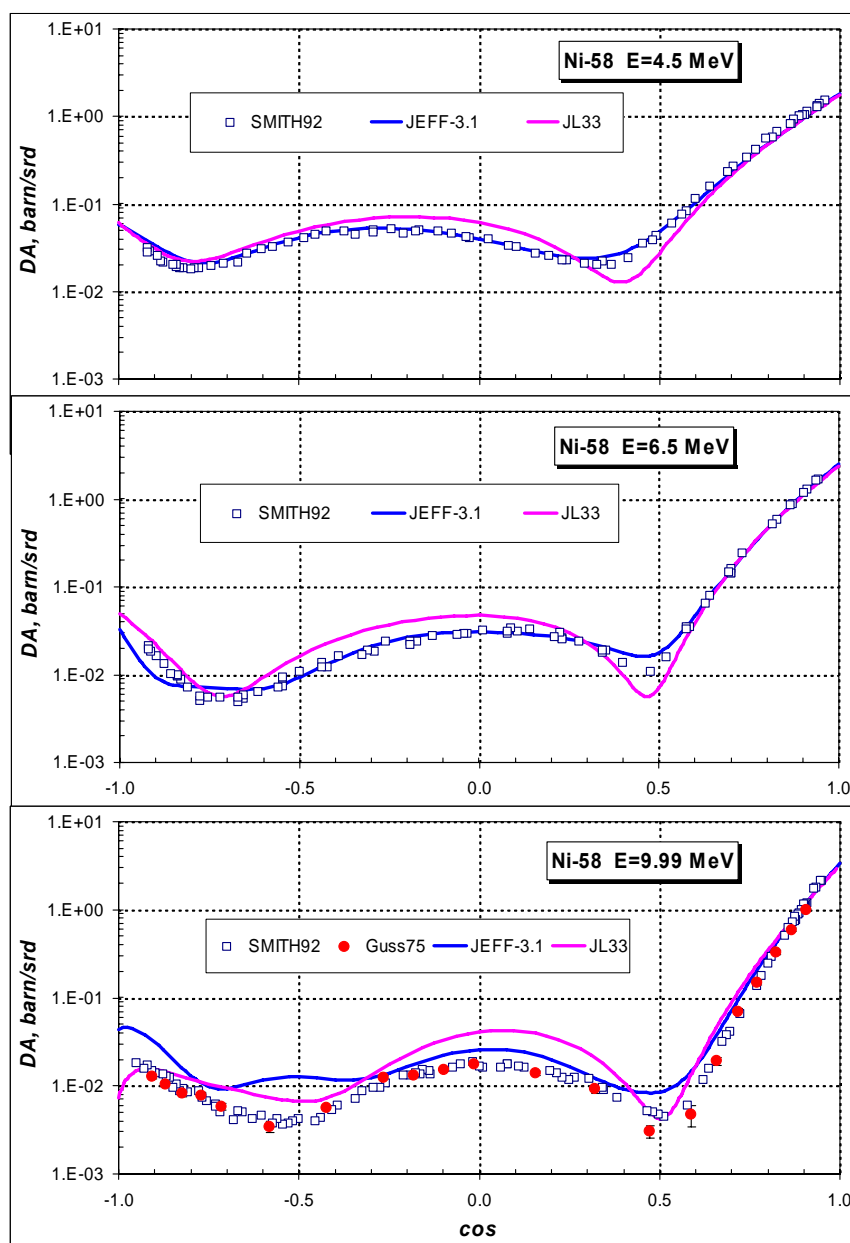


Рисунок 19 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

На рисунке 19 для энергетической точки 9.99 МэВ помимо данных группы Smith et al приводятся данные группы Guss et al (полученные при энергии 9.958 МэВ) без перепривязки к энергии 9.99 МэВ.

Из приведенного на рисунках 18-19 сравнения видно, что приблизительно до 8 МэВ угловые распределения из JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) лучше согласуются с экспериментальными данными, чем оценка из JENDL-3.3. При более высоких энергиях обе оценки согласовано хорошо описывают рассеяние вперед, рассеяние под углом  $90^\circ$  лучше описывается оценкой из JEFF-3.1, и, наконец, рассеяние назад обе оценки описывают по-разному, но одинаково плохо.

Интерес представляют экспериментальные данные Perey et al (1993), выполненные с высокой точностью на ORELA в области энергий разрешенных резонансов. На основе этих экспериментов были определены параметры разрешенных резонансов во всех рассматриваемых оценках. На рисунке 20 приведено сравнение

оцененных и экспериментальных угловых распределений для угла рассеяния  $39^\circ$ . На рисунке 21 приведено аналогичное сравнение для угла рассеяния  $160^\circ$ .

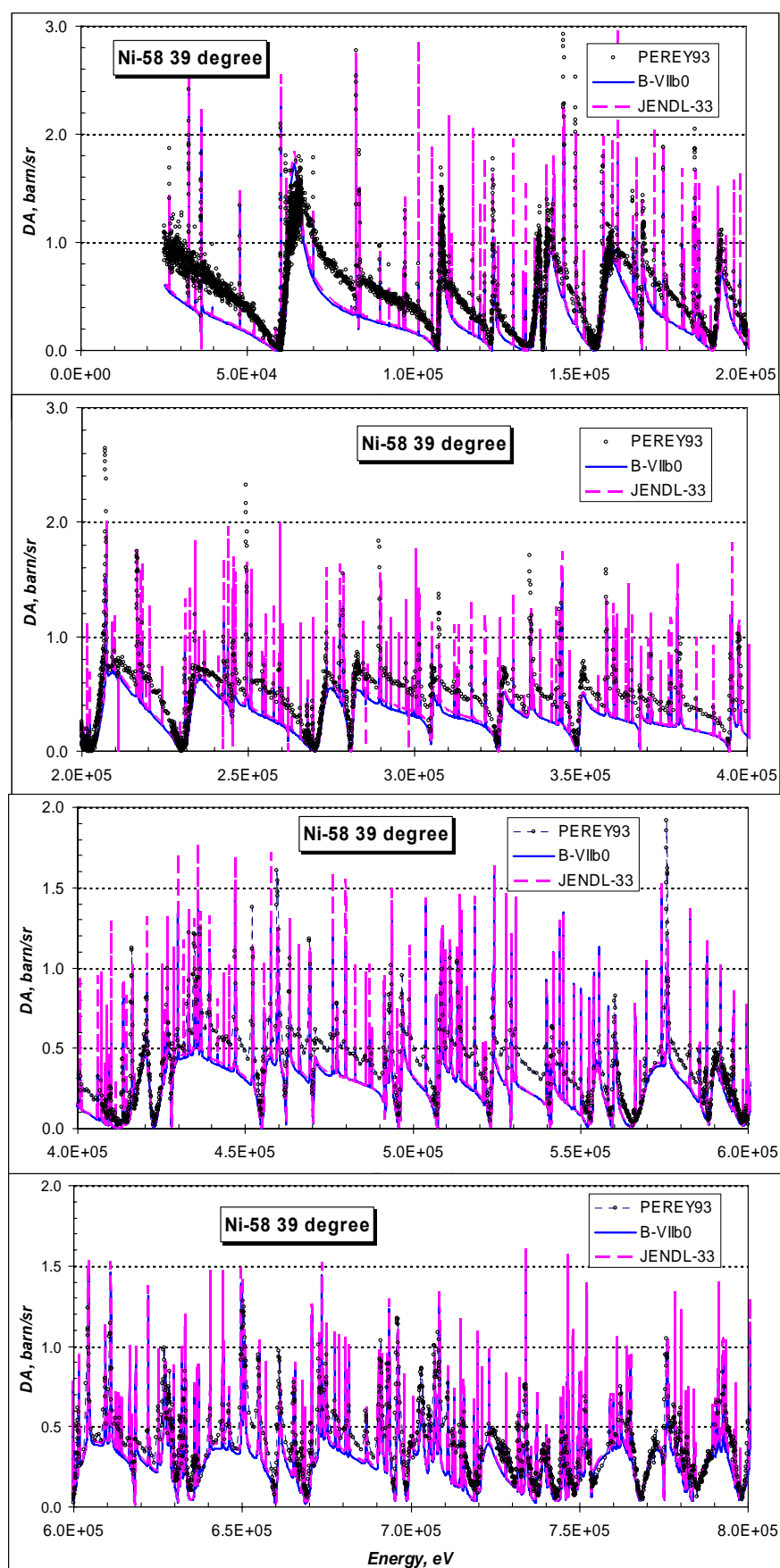


Рисунок 20 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

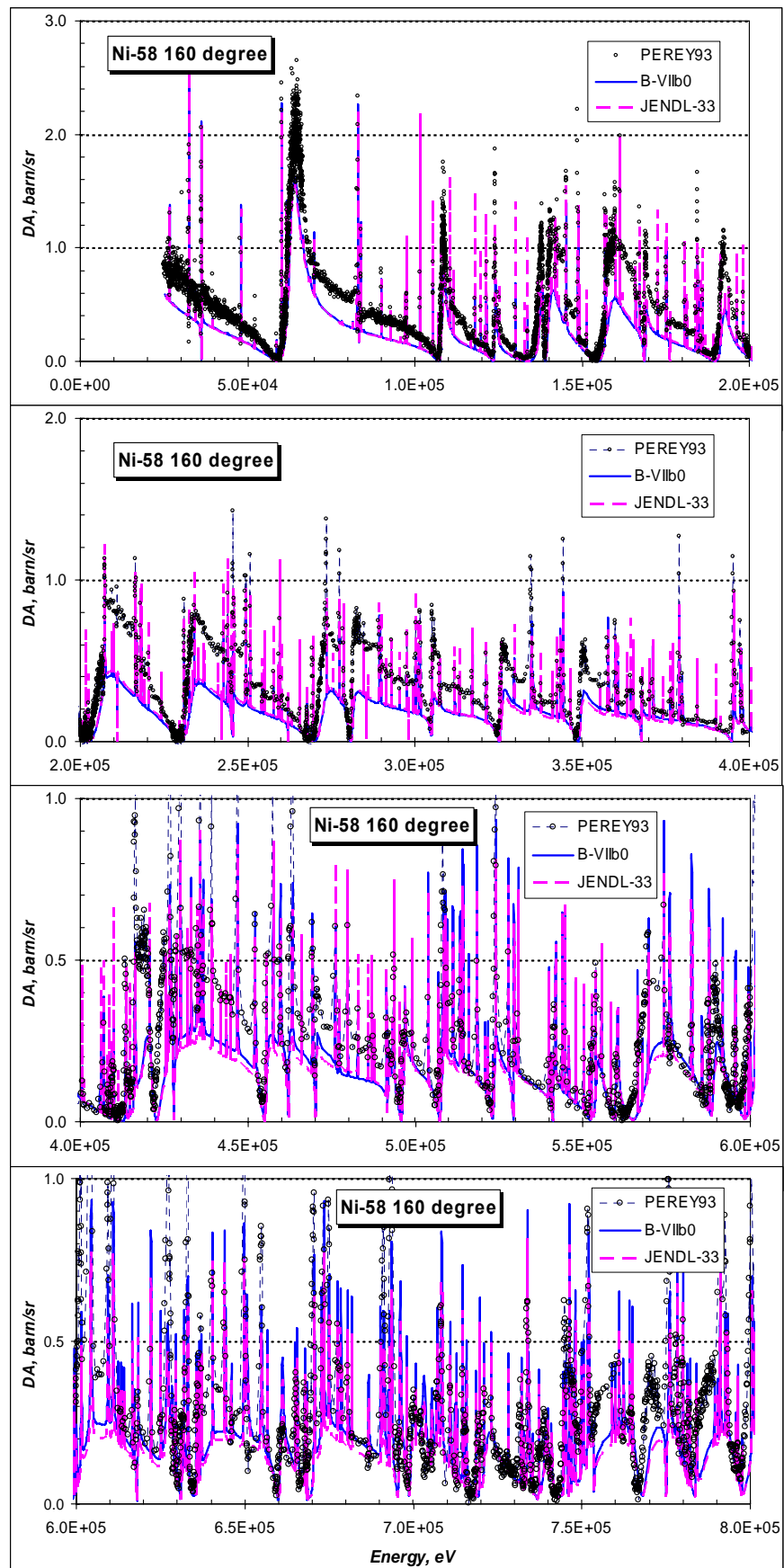


Рисунок 21 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

Из приведенного на рисунках 20 - 21 сравнения видно, что оцененные кривые хорошо согласуются друг с другом. В области энергий до 600 кэВ обе оценки значительно различаются от экспериментальных значений угловых распределений, выше 600 кэВ экспериментальные данные и оцененные кривые приемлемо согласуются друг с другом. Отметим, что обработка экспериментальных данных группы Perey et al носит предварительный характер.



## 5. Энергетические распределения нейтронов

### *5.1. Энергетические распределения при неупругом рассеянии нейтронов*

В оценке ENDF/B-VIIb энерго - угловые распределения приводятся для реакций с  $MT=16, 22, 28, 51, 91, 103, 107$ . Для всех перечисленных реакций данные представляют собой энерго-угловые распределения для вылетающих частиц, остаточного ядра и фотонов, образующихся в процессе реакции. Угловые распределения учитываются с помощью полиномов Лежандра.

В оценке JEFF-3.1, в которой оценка ENDF/B использовалась как стартовая, корректировка коснулась закона интерполяции данных для налетающих частиц. INT-12 заменен на INT=2. Кроме этого, величину нейтронного спектра неупруго рассеянных нейтронов слегка уменьшили выше  $7\text{ ю}5\text{ МэВ}$  для лучшего согласования со спектром распускаемых нейтронов при  $14\text{ МэВ}$ , промеренных группой Vonach et al.

В оценке JENDL-3.3 энерго-угловые распределения приводятся для следующих типов реакций  $MT=16, 22, 28, 91, 203, 204, 205, 206, 207$ , данные для которых взяты из JENDL Fusion files.

Для реакций с  $MT=16, 22, 28, 91$  данные представляют собой энерго-угловые распределения только для вылетающих нейтронов.

Для реакций с  $MT=203, 204, 205, 206, 207$  энерго-угловые распределения приводятся для совокупных вылетающих заряженных частиц.

### **Выводы**

Представление энерго-угловых распределений в оценке JEFF-3.1 (как откорректированной версии оценки ENDF/B), по-видимому, предпочтительнее оценки JENDL-3.3. Наряду с описанием вылетающих частиц и спектров образующихся фотонов дополнительно приводится информация об остаточных ядрах, т.е. описание процессов является более общим.

## 6. Образование фотонов

Для Ni58 представлены две оценки фотонных данных в библиотеках ENDF/B-VIIb (~JEF3.1) и JENDL3.3.

В оценке ENDF/B фотонные данные представлены непосредственно для следующих реакций  $MT=51-58, 102$ . Для реакций  $MT=16, 22, 28, 91, 103$  и  $107$  спектры фотонов задаются в секции MF=6 с помощью данных по энерго-угловым распределениям.

В JENDL фотонные данные представлены для реакций  $MT=16, 22, 28, 51-65, 91, 102, 103, 107$ .

### **6.1. Множественности образования фотонов и вероятности переходов**

Множественности фотонов в нейтронных реакциях  $MT=16, 22, 28, 91, 103, 107$  в JENDL были получены по программе GNASH. Фотоны неупругого рассеяния в представлены с помощью 15-ти уровней и континуумом с энергией  $3.932\text{ МэВ}$ ,

В оценке ENDF/B данные представлены для 8 уровней, которые, как видно из таблицы 3, практически совпадают. Область континуума уровней начинается ниже по энергии, чем в JENDL - при  $3.52\text{ МэВ}$ .

Таблица 3- Энергии уровней неупругого рассеяния

N	JENDL3.3.	ENDF/B-VII
51	1.454E+06	1.454E+06
52	2.459E+06	2.459E+06
53	2.776E+06	2.776E+06
54	2.902E+06	2.903E+06
55	2.942E+06	2.943E+06
56	3.038E+06	3.038E+06
57	3.263E+06	3.265E+06
58	3.420E+06	3.421E+06
59	3.524E+06	
60	3.531E+06	
61	3.593E+06	
62	3.620E+06	
63	3.774E+06	
64	3.898E+06	
65	4.475E+06	
91	3.932E+06	3.520E+06

В оценке ENDF/B для 8 уровней заданы вероятности переходов, взятые из работы D.M. Hetric, C.Y. Fu, and D.C. Larcon, "Calculated neutron-induced cross sections for 58,60Ni from 1 TO 20 MEV and comparison with experiment," ORNL/TM-10219, ENDF-344 (1987).

В оценке JENDL для неупругого рассеяния также даны вероятности переходов, которые до 58-го уровня такие же, как и в ENDF/B.

Фотоны радиационного захвата в JENDL получены из энергетического баланса. В ENDF/B данные получены по программе TNG.

### **6.2. Угловое распределение фотонов.**

В обеих оценках для всех фотонов в нейтронных реакциях определено изотропное угловое распределение.

### **6.3 Непрерывные энергетические спектры фотонов.**

В оценке JENDL энергетические спектры для фотонов нейтронных реакций MT=16,22,28,91,103,107 были посчитаны по программе GNASH. Спектры фотонов радиационного захвата были получены по программе Casthy с учетом экспериментальных данных.

В ENDF/B непосредственно в секции MF=15 есть только спектры радиационного захвата, которые посчитаны по программе TNG. Спектры для реакций MT=16, 22, 28, 91, 103, 107 приведены в секции MF=6.

### **Выводы:**

Описание фотонных данных в оценке JENDL-3.3 охватывает больше нейтронных реакций. Для тех реакций, где оценки пересекаются, нельзя отдать предпочтение какой-то оценки.

## **7. Заключение**

**7.1. Выводы** Для Ni-58 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке JEFF-3.1. Данные о ковариациях удалить, поскольку они не верифицированы.

Материалу присвоить номер МАТ=2858.

Желательно, в дальнейшем, устранить все отмеченные в ходе анализа данных замечания и неточности в принятой оценке.

### **7.2. Автор обоснования файла оцененных данных**

Кошечев В.Н.

## 28.4. Никель-59

Долгоживущий, радиоактивный изотоп с периодом полураспада  $T_{1/2}=7.6E+4$  лет.  
Способ радиоактивного распада –  $\varepsilon + \beta$  распад.

### 1. Общие характеристики

$Z=28$

$A=58.934\,346\,7 \pm 0.000\,000\,7$

$A_{wr}=58.428\,072\,1 \pm 0.000\,000\,7$

#### Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	Е <sub>порог.</sub> , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
16	(n,2n)	-8.9972	9.1512	Ni-58
22	(n,na)	-6.0974	6.2018	Fe-55(2.73y)
28	(n,np)	-8.5950	8.7421	Co-58(70.88d)
32	(n,nd)	-14.9410	15.1967	Co-57(271.8d)
34	(n,nHe3)	-15.4750	15.7399	Fe-56
102	(n, $\gamma$ )	11.2400	0.0000	Ni-60
103	(n,p)	1.5840	0.0000	Co-59
104	(n,d)	-6.3709	6.4799	Co-58(70.88d)
105	(n,t)	-8.6856	8.8343	Co-57(271.8d)
106	(n,He3)	-7.8311	7.9651	Fe-57
107	(n,a)	4.8780	0.0000	Fe-56
111	(n,2p)	-5.5056	5.5998	Fe-58

Схема уровней: оценка неупругого рассеяния отсутствует

Радиоактивность: период полураспада  $T_{1/2}=7.6E+4$  лет

Для общего представления на Рисунке 1 представлен энергетический ход сечений полного взаимодействия и его составляющих (упругого рассеяния и неупругих взаимодействий) в области энергий от 1 кэВ до 10 МэВ.

На Рисунке 2 аналогичное представление энергетической зависимости приводится для основных составляющих сечения неупругих взаимодействий (сечение радиационного захвата, сечения реакции (n,p) и сечение реакции (n,a)).

На Рисунке 3 приводится энергетическая зависимость сечений пороговых реакций.

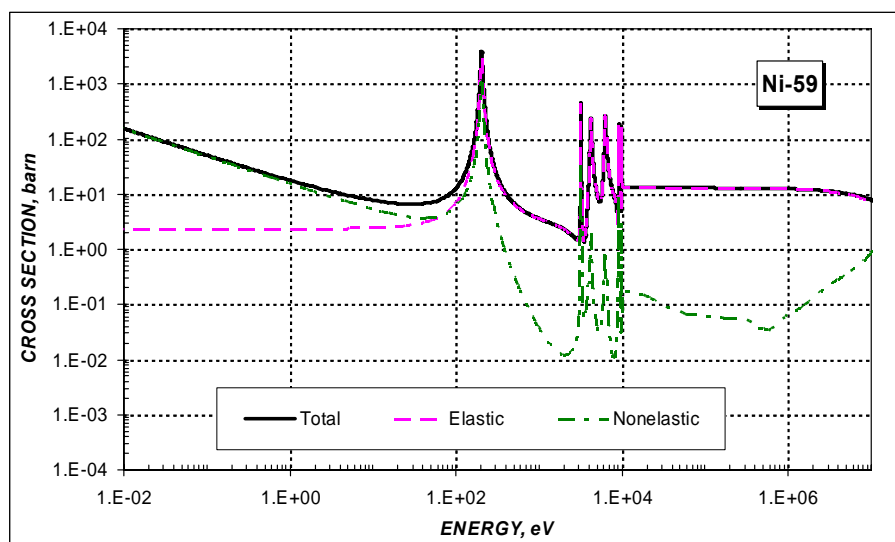


Рисунок 1 – Зависимость полного сечения и его составляющие на Ni-59.

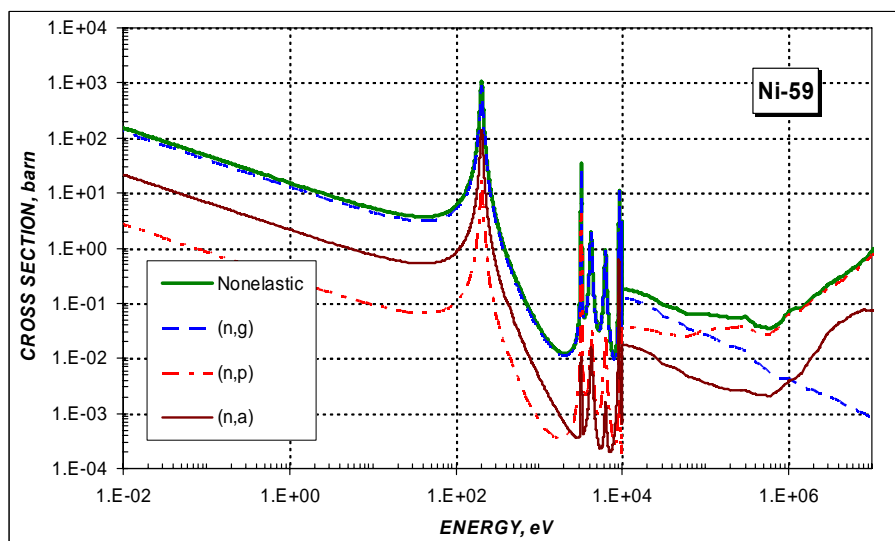


Рисунок 2 – Сечения неупругих взаимодействий и его составляющие на Ni-59.

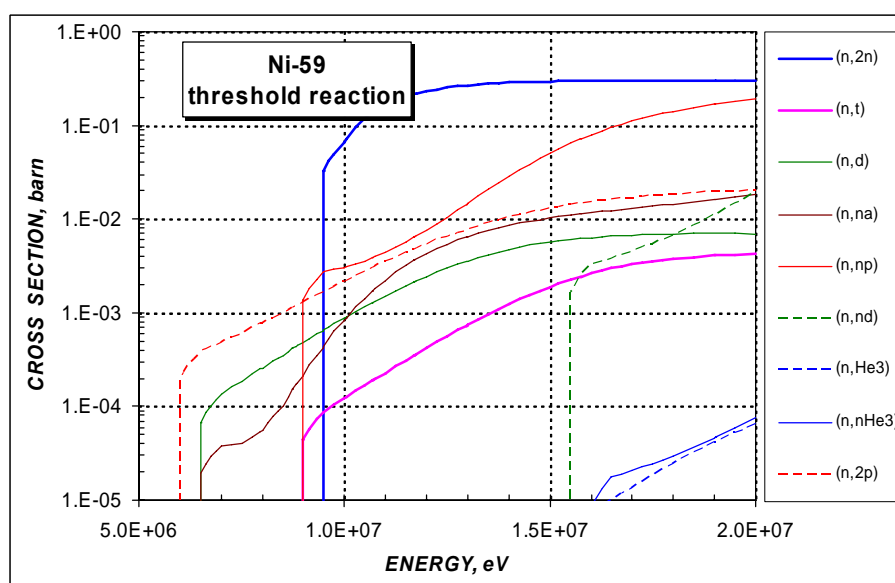


Рисунок 3 – Энергетическая зависимость пороговых сечений на Ni-59.

## 2. Резонансная область нейтронных реакций

Спин и четность  $J^\pi = 3/2^-$ ;

Радиус рассеяния:  $R = 0.650 \cdot 10^{-12} \text{ см}$ .

Область разрешенных резонансов.

Набор резонансных параметров сделан на основе сборника резонансных параметров под редакцией Мухабхаба (BNL-235, 4-е издание 1981) и содержит 9 S-резонансов.

Область разрешенных резонансов от 1E-5 эВ до 10.0 кэВ.

В резонансной области в подложку полного сечения включена сумма сечений реакций (n,p) + (n,a).

## 3. Сечения нейтронных реакций

### 3.1. Полное сечение

В резонансной области полное сечение получено по резонансным параметрам, выше – как сумма парциальных сечений. На рисунке 4 показано сравнение оцененного сечения с последними экспериментальными данными.

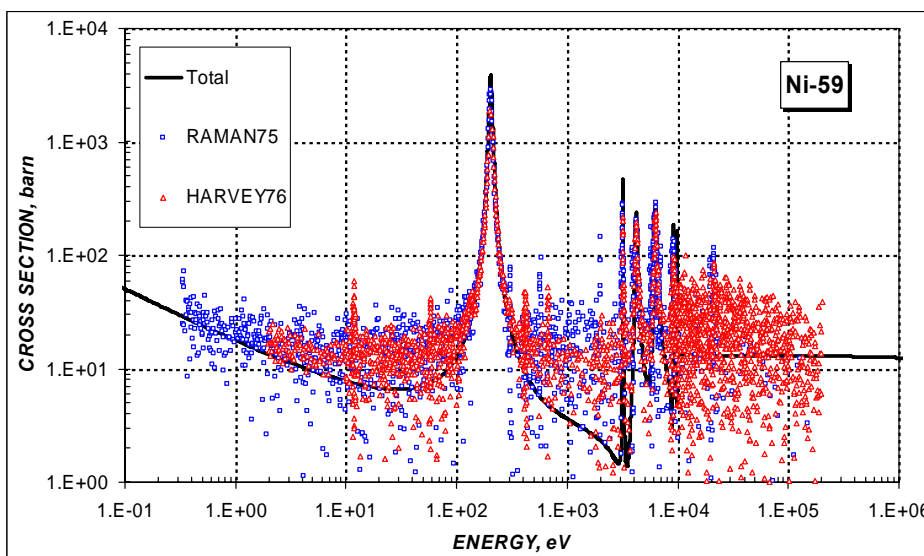


Рисунок 4 – Сравнение оцененного полного сечения с экспериментальными данными.

Из рисунка 5 видно, что, в целом, резонансная структура полного сечения отражена правильно. В эксперименте наблюдаются резонансы, не присутствующие в оценке. Использование имеющихся детальных экспериментальных данных для обновления набора резонансных параметров – задача будущего.

### 3.2. Сечения парциальных реакций

Для парциальных реакций экспериментальные данные в библиотеке EXFOR практически отсутствуют. Исключение составляют измерения сечений в тепловой точке для реакций радиационного захвата, (n,p), (n,a). Имеется, также, измерение сечения реакции (n,2n) в точке 14.1 МэВ.

Ниже в таблице 1 приводится сравнение имеющейся экспериментальной информации с оцененными значениями для перечисленных выше реакций.

Таблица 1 – Сравнение оцененных и экспериментальных сечений.

		<i>(n,g), барн (0.0253 эВ)</i>
1	Harvey76	78. ± 8.
2	Jurney75-1	53. ± 4.
3	Raman2004	73.7 ± 1.8
4	Jurney75-2	51. ± 8.
	Оценка	80.4
		<i>(n,p), барн (0.0253 эВ)</i>
1	Harvey76	1.43 ± 0.13
2	Donald76	4.0 ± 1.0
	Оценка	1.69
		<i>(n,a), барн (0.0253 эВ)</i>
1	Eiland74	13.7 ± 1.2
2	Werner75-1	18.0 ± 1.6
3	Werner75-2	11.4 ± 0.8
4	Harvey76	22.3 ± 1.6
	Оценка	13.6
		<i>(n,2n), мбрн (14.1 МэВ)</i>
1	Kimura90	25.3 ± 0.8
	Оценка	286.

Из приведенного в таблице 1 сравнения видно, что оцененные значения находятся в хорошем согласии с экспериментом Harvey76, за исключением реакции (n,a), где оценка отличается от эксперимента Harvey76 ~ в 2 раза, но согласуется с другими экспериментальными данными.

Имеется значительное расхождение в значениях сечений для реакции (n,2n) в энергетической точке 14.1 МэВ.

#### 4. Угловые распределения нейтронов

Угловые распределения для упругого рассеяния взяты из оценки JENDL-2 для Ni-61. Для остальных реакций угловые распределения предполагаются изотропными.

#### 4. Образование фотонов в нейтронных реакциях

Множественности фотонов при неупругих взаимодействиях (MT=3) приводятся выше 1.0 МэВ, они рассчитаны по программе MAVRINA. Множественности фотонов при радиационном захвате нейтронов (MT=102) приводятся ниже 1.0 МэВ, они рассчитаны по программе GNASH.

Угловые распределения фотонов приняты изотропными.

Энергетические спектры представляют собой нормированные распределения для суммарных неупругих процессов взаимодействия (MT=3) выше 1.0 МэВ, при радиационном захвате нейтрона (MT=102) ниже 1.0 МэВ.

## 6. Заключение

### **Оцененные данные, принятые в РОСФОНД.**

В РОСФОНД принять нейтронные данные из JEFF-3.1 (Gruppelaar, Vd.Kamp, Кореску et al., 1987 г. rev. 2005), поскольку это единственная оценка, содержащая полный набор данных для задач расчета переноса нейтронов.

Материалу присвоить номер МАТ=2859.

### **Автор обоснования отбора оцененных данных**

Кощеев В.Н.

### **Тепловые и интегральные сечения**

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние			
Рад. захват			
Реакция (n,p)	-	-	
Реакция (n,d)	-	-	
Реакция (n,t)	-	-	
Реакция (n, $\alpha$ )	-	-	
Реакция (n,2n)	-	-	



## 28.5. Никель-60

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ. Различные модификации, выполненные выше 20 МэВ, не комментируются.

Экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными кривыми, взяты из интерактивной библиотеки EXFOR-CINDA (Database and Retrieval System, version 1.80, June 2005).

### 1. Общие характеристики

$Z=28$

$A=59.930\,786\,4 \pm 0.000\,000\,7$

$A_{\text{wr}}=59.415\,952\,2 \pm 0.000\,000\,7$

Содержание в естественной смеси: - 26.223%

#### Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	Е <sub>порог.</sub> , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	(n,n')	-1.3300	1.3524	Ni-60
16	(n,2n)	-11.3850	11.5766	Ni-59(7.6E4y)
22	(n,na)	-6.2910	6.3969	Fe-56
28	(n,np)	-9.5296	9.6900	Co-59
102	(n, $\gamma$ )	7.8200	0.0000	Ni-61
103	(n,p)	-2.0415	2.0759	Co-60(5.272y)
104	(n,d)	-7.3083	7.4313	Co-59
105	(n,t)	-11.5010	11.6940	Co-58(70.82d)
106	(n,He3)	-9.1742	9.3286	Fe-58
107	(n,a)	1.3553	0.0000	Fe-57

#### Схема уровней: (согласно оценке JEFF-3.1)

MT	LEVEL ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	<b>0.0</b>	<b>0+</b>
51	1.3300	2+
52	2.1600	2+
53	2.2900	0+
54	2.5100	4+
55	2.6300	3+
56	3.1200	4+
57	3.1240	2+
58	3.1860	1+
59	3.1940	2+
60	3.2700	2+
61	3.3180	0+
91(cont)	3.3390	

Радиоактивность: не радиоактивен.

## 2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность  $J^\pi = 0^+$ ;

2.2. Радиус рассеяния:  $R = 0.600 \cdot 10^{-12}$  см.

2.3. Область разрешенных резонансов.

Ниже рассматриваются пять оценок нейтронных данных, а именно – ENDF/B-VII betha1 version, BROND-2.2, FOND-2.2, JEFF-3.1 и JENDL-3.3. Короткая информация по каждой оценке представлена в **таблице 1**. По каждой оценке приводятся краткие пояснения.

### ENDF/B

Последняя версия (ENDF/B-VIIb1) в области энергий ниже 20 МэВ содержит оценку ORNL, выполненную в 1991 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu.

Основные моменты:

По сравнению со стартовой версией (1989) изменены параметры резонансных уровней в области энергий 1.E-5 – 450 кэВ на основе анализа с помощью SAMMY экспериментальных данных Perey et al.(ORRLA).

Кроме того удалена матрица переводов при упругом рассеянии нейтронов.

В стартовой версии используются программы DWUCK, в которой ядерная модель описывается THE DISTORTED WAVE BORN APPROXIMATION (DWBA) и программа TNG, в которой используется формализм THE HAUSER-FESHBACH.

С помощью TNG получены угловые и энергетические распределения частиц, испускаемых в реакциях по модели компаунд ядра и предравновесного процесса. При этом обеспечивается согласованность между всеми реакциями и обеспечивается энергетический баланс оцененных данных.

Область резонансных энергий от 1.E-5 эВ до 450 кэВ. Резонансные параметры для формализма Райха-Мура получены с помощью программы SAMMY при анализе данных экспериментов по пропусканию. В области энергий 450 – 812 кэВ в захват добавляется подложки (MF3, MT102) для согласования с усредненными экспериментальными данными команды S.M.Perey и др.

Полное сечение выше 450 кэВ получено при анализе нескольких наборов измерений с высоким разрешением, которые также использовались и при получении резонансных параметров.

Сечение радиационного захвата выше 450 кэВ получено на основе расчетов по TNG программе.

Сечения реакций с вылетом заряженных частиц получены при помощи TNG расчетов. При этом учитывались немногочисленные экспериментальные данные.

### JEFF-3.1

Главными исполнителями оценки являются S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (IRK) и A.Trkov (IJS). Основные моменты оценки состоят в следующем:

В качестве стартовой версии оцененных данных взята оценка Ларсона и др. из Oak Ridge (ENDF/B-VI Revision 1)

Все нейтронные сечения выше резонансной области (450 кэВ) были переоценены и пополнены ковариационными матрицами.

Оценка проводилась в три этапа:

На первом этапе были модифицированы все функции возбуждения на основе всей совокупности экспериментальных данных, имеющихся в библиотеке EXFOR.

На втором этапе была выполнена совместная оценка сечений, в результате которых получают альфа-частицы и дейтоны.

На третьем этапе проводилась оценка всех сечений от излишней информации.

### JENDL-3.3

В основе лежит оценка, выполненная для JENDL-3 в 1987 году. В 1990 году проведена модификация данных, а именно

- изменены энергии порогов в разделе mf=5 для реакций mt=16, 22 и 28;
- небольшая модификация данных проведена в разделе mf=12, mt=16, 91 и 102.

В 1993 году для версии JENDL-3.2 часть данных была переоценена.

- (4,16-28), (4,91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (5,16-91) – данные взяты из JENDL fusion file;
- (12,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi;
- (15,102) – ниже 500 кэВ пересмотрено S.Igasasi.

В 2000 году данные переоценены N.Yamamoto (TIT) и скомпилированы K.Shibata (JAERI) для последующей версии библиотеки JENDL-3.3. Изменения коснулись данных в следующих разделах

#### MF3

- MT1 сечение переоценено выше 557 кэВ;
- MT2 переоценено с учетом баланса сечений;
- MT16, 22, 28, 103, 104, 105, 106, 107, 111, 203, 204, 205, 206, 207 сечения вычислено с помощью SINCROS-II.

#### MF6

- MT16, 22, 28, 91, 203, 204, 205, 206, 207 взяты из JENDL fusion file.
- MF12, MT102 и MF15, MT102 пересмотрены.

В 2002 году для ковариационных матриц использованы результаты работы Shibata и Oh.

### ФОНД-2.2

Для Ni-60 после анализа имевшихся в то время (~2000 г) оцененных нейтронных данных в библиотеку ФОНД-2.2 включена оценка ORNL, выполненная в 1989 году авторским коллективом: D.Larson, C.Perey, D.Hetrick, C.Fu. Таким образом, нейтронные данные из ФОНД-2.2 совпадают с оценкой из библиотеки EMDF/B-VI ниже 20 МэВ.

### БРОНД-2.2

В основе лежит оценка для N-60, выполненная в 1985 году Блохиным А., Игнатьюком А. и др.

Основные моменты оценки:

В области резонансных энергий (от 1.E-5 эВ до 690 кэВ) сечения восстанавливаются с помощью двух псевдоизотопов, имеющих разные границы области разрешенных и неразрешенных резонансов. Первый псевдоизотоп содержит информацию о резонансных параметрах S-волны. Область разрешенных резонансов до 590 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов. Второй – содержит данные о резонансных параметрах P- и D-волны. Область разрешенных резонансов до 150 кэВ, выше – область неразрешенных резонансов.

В области разрешенных резонансов рекомендован формализм Брейта-Вигнера.

В области высоких энергий сечения и угловые распределения вычислены по оптической модели.

Сечения пороговых реакций рассчитывались с учетом предравновесного процесса.

#### ВЫВОДЫ:

В области резонансных энергий имеется три оценки резонансных параметров, а именно JENDL-3.3, ENDF/B-VI и БРОНД-2.2.

В **таблице 2** приводятся некоторые интегральные характеристики, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY (version 6.13)

Таблица 1 – Общая информация об оцененных нейтронных данных для 28-Ni-60 из различных библиотек.

	ENDF/B-VIIb1	JENDL-3.3	BROND-2.2	FOND-2.2	JEFF-3.1
Оценка	EVAL-SEP97 S.CHIBA, M.CHADWICK, D.LARSON Rev.3	EVAL-MAR87 S.Iijima, REV4-MAY00	EVAL-MAY85 A.I.BLOKNIN, A.V.IGNATYUK	EVAL-OCT89 D.Larson, C.Perey, D. Hetrick, and C.Y. Fu (ORNL) Rev.1.	EVAL-JAN00 S.Tagesen, H.Vonach and A.Wallner (EJC)
MF=2	RRR 0-450 keV (RM)	RRR 0-456 keV (MLBW)	RRR 0-490 keV (MLBW) URR 490-590 keV	RRR 0-450 keV (RM)	RRR 0-450 keV (RM)
MF=3	MT=1,2,3,4, <b>5</b> ,16,22,28, 51-59,60,61,91, 102,103,104,107	MT=1,2,4,16,22,28, 51-61,91,102,103, 104,105,106,107,111, 203,204,205,206,207	MT=1,2,4,16,22,28, 51-72,91, 102,103,107,251	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91, 102,103,104,107	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91,102,103, 104,105,106,107
MF=4	MT=2	MT=2,51-61	MT=2, 16,22,28, 51-72,91	MT=2	MT=2
MF=5			MT=16,28,91		
MF=6	MT= <b>5</b> ,16,22,28, 51-61,91,103,107	MT=16,22,28,91, 203,204,205,206,207		MT=16,22,28, 51-61,91,103,107	MT=16,22,28, 51-61,91,103,107
MF=12	MT=51-61,102	MT=16,22,28, 51-61,91,102,103,107		MT=51-61,102	MT=51-61,102
MF=14	MT=51-61,102	MT=16,22,28, 51-61,102,103,107		MT=51-61,102	MT=51-61,102
MF=15	MT=102	MT=16,22,28,91, 102,103,107		MT=102	MT=102
MF=33	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91, 102,103,104,107	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61, 102,103,104,105,107		MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91, 102,103,104,107	MT=1,2,3,4,16,22,28, 51-61,91,102,103, 104,105,106,107, <b>851,852,853</b>
MF=34		MT=2			

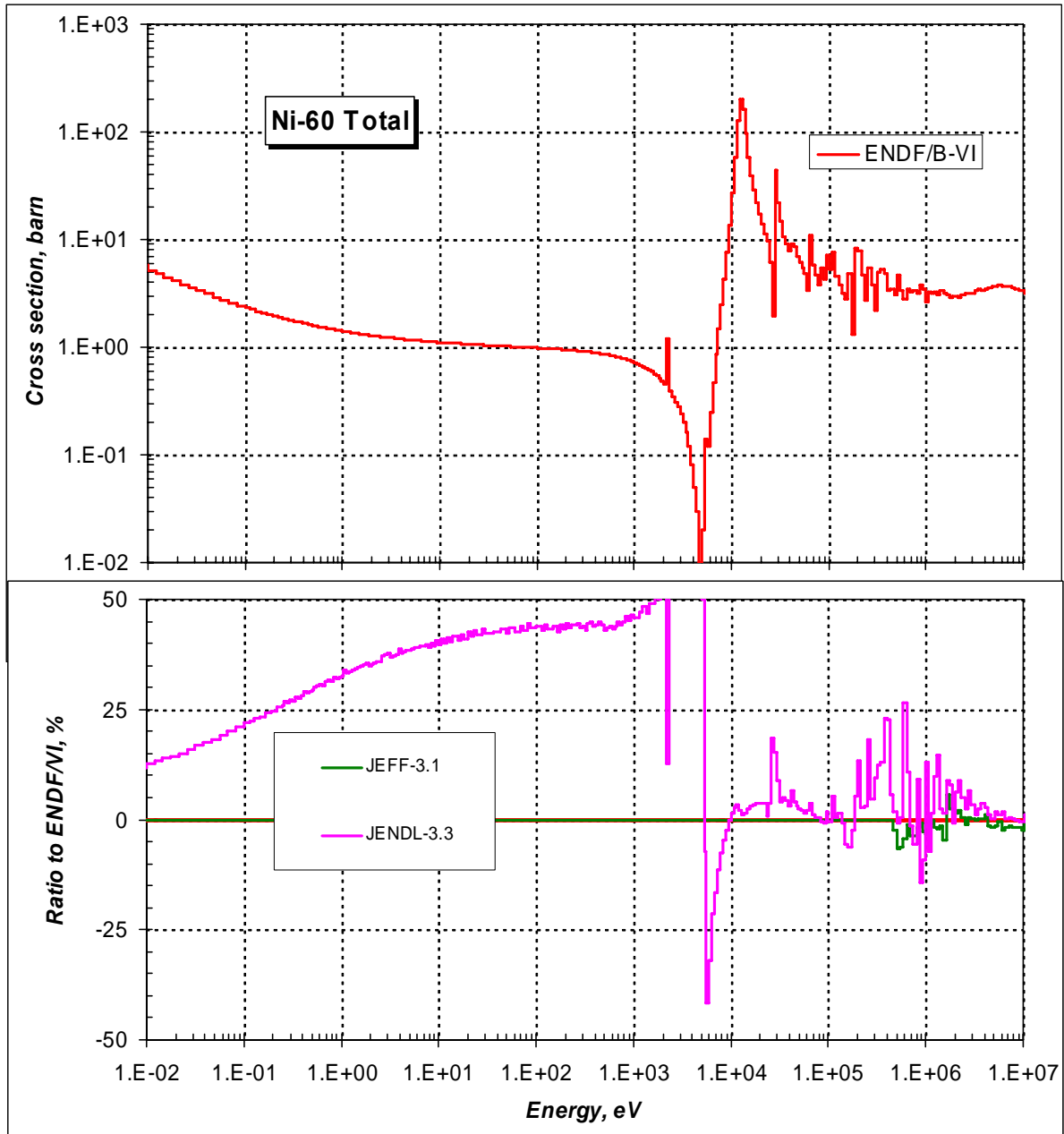
Таблица 2 – Некоторые характеристики оцененных нейтронных данных для 28-Ni-60 из различных библиотек.

LIB	MT	Reaction	Sig(2200)	Sig(Ezero)	Avg-Sigma	G-fact	Res	Integ	Sig(Fiss)	Sig(E14)
ENDF/B70	1	Total	3.75079E+00	3.72098E+00	3.8467E+00	1.03747	8.01940E+01	3.48534E+00	2.77742E+00	
BROND-2	1	Total	3.43599E+00	3.40787E+00	3.5132E+00	1.03434	8.58375E+01	3.93423E+00	2.76050E+00	
FOND-2.2	1	Total	3.75079E+00	3.72098E+00	3.8467E+00	1.03747	8.24630E+01	3.48696E+00	2.77742E+00	
JEFF-3.1	1	Total	3.75079E+00	3.72098E+00	3.8468E+00	1.03749	8.01940E+01	3.46208E+00	2.72306E+00	
JENDL-3.3	1	Total	4.33047E+00	4.29914E+00	4.4819E+00	1.04697	8.58596E+01	3.63165E+00	2.76128E+00	
ENDF/B70	2	Elastic	9.84996E-01	9.84822E-01	1.1112E+00	1.14121	7.88195E+01	2.94225E+00	1.39076E+00	
BROND-2	2	Elastic	8.24811E-01	8.24665E-01	9.3049E-01	1.14121	8.44942E+01	3.42037E+00	1.45335E+00	
FOND-2.2	2	Elastic	9.84996E-01	9.84822E-01	1.1112E+00	1.14121	8.10878E+01	2.94387E+00	1.39076E+00	
JEFF-3.1	2	Elastic	9.84996E-01	9.84822E-01	1.1112E+00	1.14121	7.88195E+01	2.93546E+00	1.27690E+00	
JENDL-3.3	2	Elastic	1.42862E+00	1.42837E+00	1.6117E+00	1.14121	8.44251E+01	3.17719E+00	1.34178E+00	
ENDF/B70	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	5.34595E-01	7.21862E-01	
BROND-2	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	5.04600E-01	7.13160E-01	
FOND-2.2	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	5.34595E-01	7.21862E-01	
JEFF-3.1	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	5.16343E-01	7.15609E-01	
JENDL-3.3	4	Inelas	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	4.43577E-01	6.57030E-01	
ENDF/B70	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.01001E-04	3.13587E-01	
BROND-2	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.12085E-04	3.24000E-01	
FOND-2.2	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.01001E-04	3.13587E-01	
JEFF-3.1	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.14155E-04	3.71960E-01	
JENDL-3.3	16	n,2n	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.18693E-04	3.88097E-01	
ENDF/B70	102	n,gamma	2.76579E+00	2.73616E+00	2.7355E+00	1.00052	1.37446E+00	4.24937E-03	2.86000E-04	
BROND-2	102	n,gamma	2.61117E+00	2.58320E+00	2.5827E+00	1.00058	1.34325E+00	5.10214E-03	9.85616E-04	
FOND-2.2	102	n,gamma	2.76579E+00	2.73616E+00	2.7355E+00	1.00052	1.37520E+00	4.24953E-03	2.86000E-04	
JEFF-3.1	102	n,gamma	2.76579E+00	2.73616E+00	2.7356E+00	1.00056	1.37446E+00	6.30046E-03	7.59600E-04	
JENDL-3.3	102	n,gamma	2.90186E+00	2.87077E+00	2.8702E+00	1.00058	1.43459E+00	6.43941E-03	6.96522E-05	
<b>Mughabghab2003</b>			<b>2.9 ± 0.2</b>				<b>1.5 ± 0.2</b>			
ENDF/B70	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	2.20864E-03	1.46500E-01	
BROND-2	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	3.03955E-03	1.46000E-01	
FOND-2.2	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	2.20864E-03	1.46500E-01	
JEFF-3.1	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	2.47964E-03	1.50200E-01	
JENDL-3.3	103	n,p	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	2.48703E-03	1.57690E-01	
ENDF/B70	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	9.21753E-06	8.88220E-03	
FOND-2.2	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	9.21753E-06	8.88220E-03	
JEFF-3.1	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	9.33770E-06	8.94700E-03	
JENDL-3.3	104	n,d	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.83501E-06	3.87760E-03	
JEFF-3.1	105	n,t	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.79870E-07	1.18230E-07	
JENDL-3.3	105	n,t	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	6.55911E-09	6.46683E-07	
JEFF-3.1	106	n,He3	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.49975E-09	3.00000E-07	
JENDL-3.3	106	n,He3	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	5.10772E-10	8.91274E-08	
ENDF/B70	107	n,alpha	1.23838E-15	1.26585E-15	3.2525E-15	2.65690	4.65538E-09	1.87374E-03	5.87340E-02	
BROND-2	107	n,alpha	0.00000E+00	0.00000E+00	2.1514E-15	0.00000	2.49999E-09	9.92639E-04	6.30000E-02	
FOND-2.2	107	n,alpha	1.23838E-15	1.26585E-15	3.2525E-15	2.65690	4.65538E-09	1.87374E-03	5.87340E-02	
JEFF-3.1	107	n,alpha	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.31698E-03	5.93330E-02	
JENDL-3.3	107	n,alpha	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000E+00	0.00000	0.00000E+00	1.78311E-03	6.82563E-02	

### 3. Сечения нейтронных реакций

#### 3.1. Полное сечение

На рисунке 1 представлены энергетический ход сечения полного взаимодействия из библиотеки ENDF/B-VI (rev.1), переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 0.01 эВ -10 МэВ



Из рисунка 1 видно, что поведение кривых от тепловой точки до первого резонанса (~12.5 кэВ) в оценках ENDF/B и JENDL носит разный характер. Различия достигают более 50% в описании интерференционного минимума S-резонанса. В области резонансных энергий от 10 кэВ до ~ 1 МэВ различия достигают 25%, а выше 1.0 МэВ различия составляют ~10% и исчезают к 10 МэВ. Такое различие объясняется использованием различных формализмов для описания резонансного взаимодействия. В оценке ENDF/B используется формализм Райха-Мура, в оценке JENDL для восстановления резонансных сечений применяется многоуровневый формализм Брейта-Вигнера.

Ниже, на рисунке 2 показано сравнение экспериментальных данных с хорошим разрешением Perey91 и Harvey91 с оцененными кривыми в области энергии 100 эВ 10 кэВ.

Отметим, что сечения из библиотеки БРОНД-2 не рассматривалось, поскольку при ее компиляции не учитывались экспериментальные данные, выполненные с высоким разрешением в последующие после оценки годы.

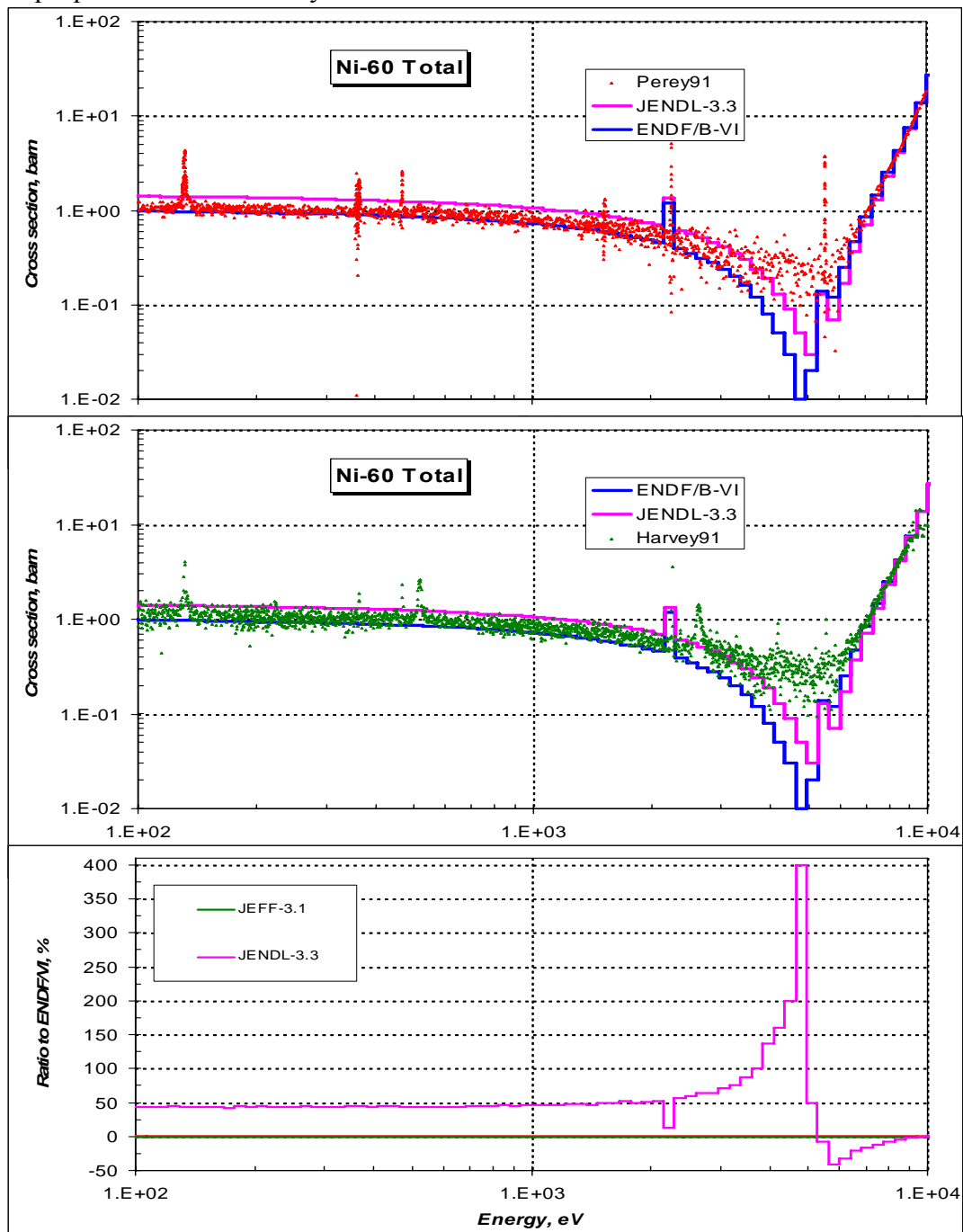


Рисунок 2 – Ход полного сечения Ni-58 в области энергий 100 эВ – 10 кэВ.

Из представленной на рисунке 2 информации видно, что различий между JEFF-3.1 и ENDF/B-VI нет. В тоже время, различия между JENDL-3.3 и ENDF/B-VI систематически различаются на ~ 50% до первого резонанса. Форма описания хода сечений одинакова, однако в JENDL ход сечения систематически выше совокупности

экспериментальных данных. Интерференционный минимум в этой оценке завышен. Максимум резонанса обе оценки описывают хорошо.

На рисунке 3 сравнивается ход сечения из ENDF/B-VI и JENDL-3.3 в области энергий от 1.0 - 2.0 МэВ с имеющимися детальными экспериментальными данными Brusegan94 (0.5 – 20 МэВ). Видно, что экспериментальные данные Brusegan'a представляют собой более подробную резонансную структуру сечения, которые принимались во внимание для оценки JEFF-3.1, но не учитывались при оценке JENDL-3.3.

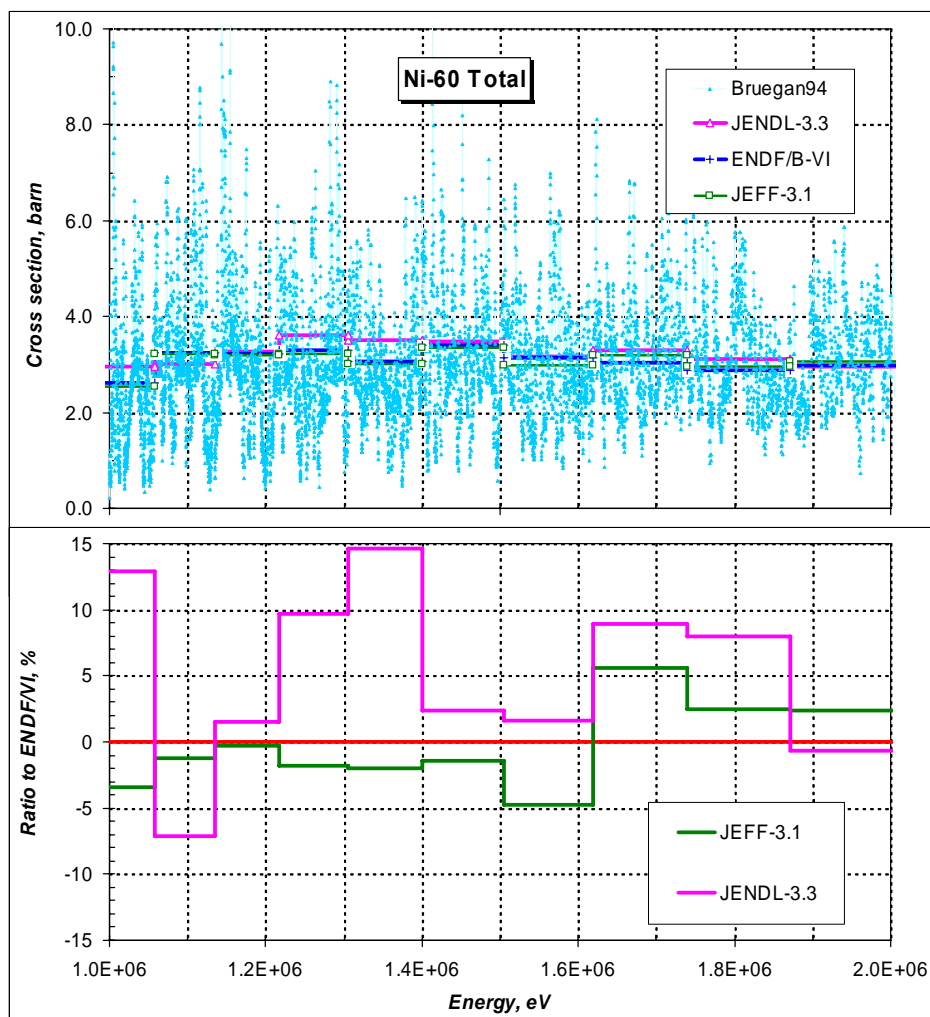


Рисунок 3 – Сравнение полного сечения Ni-60 в области энергий 1 – 10 МэВ.

### 3.2. Сечение упругого рассеяния

На рисунке 4 показан энергетический ход сечения упругого рассеяния нейтронов из библиотеки ENDF/B-VII, переработанные в 299 мультигрупповое представление, и отклонения от него сечений из библиотек JEFF-3.1 и JENDL-3.3. в области энергий 10 эВ -10 МэВ, где, как было видно выше, различия в оценках максимальны.

Как и для полного сечения различия, в основном, возникают между оценками ENDF/B и JENDL. Они носят характер аналогичный расхождениям между оценками в полном сечении.

Имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные по сечению упругого рассеяния нейтронов находятся в области энергий выше 1 МэВ. Сравнение сечений в этой области показано на рисунке 5. Оценки JEFF и ENDF/B находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.



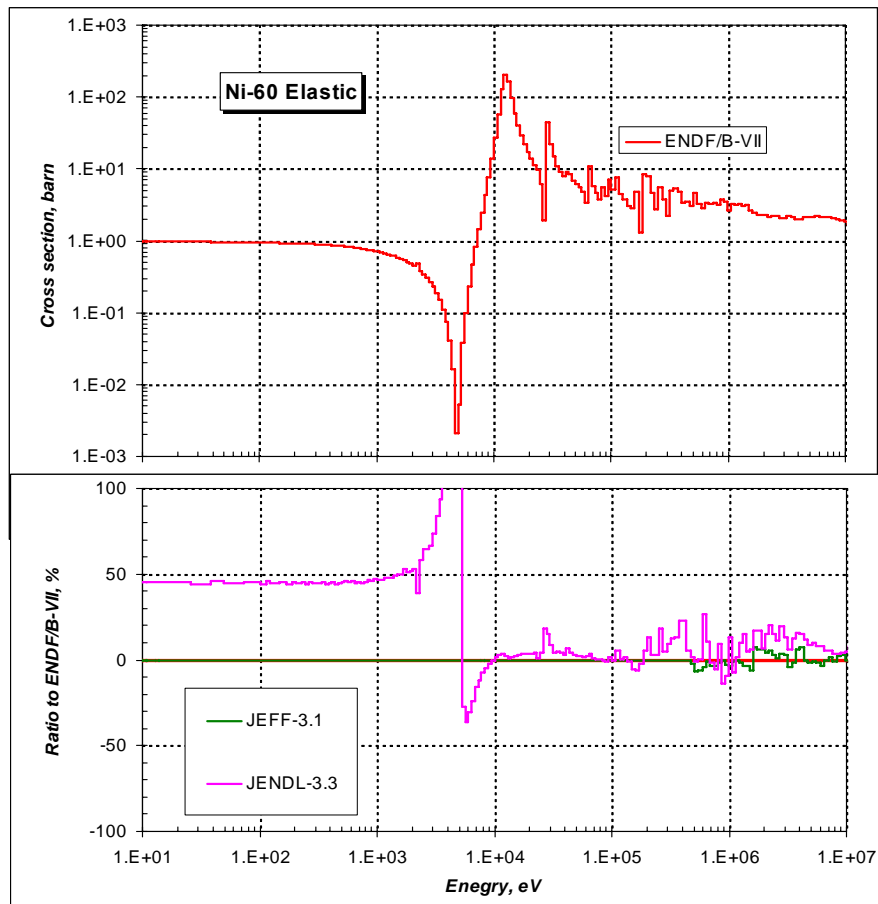


Рисунок 4 – Ход сечения упругого рассеяния области энергий 10 кэВ – 10 МэВ.

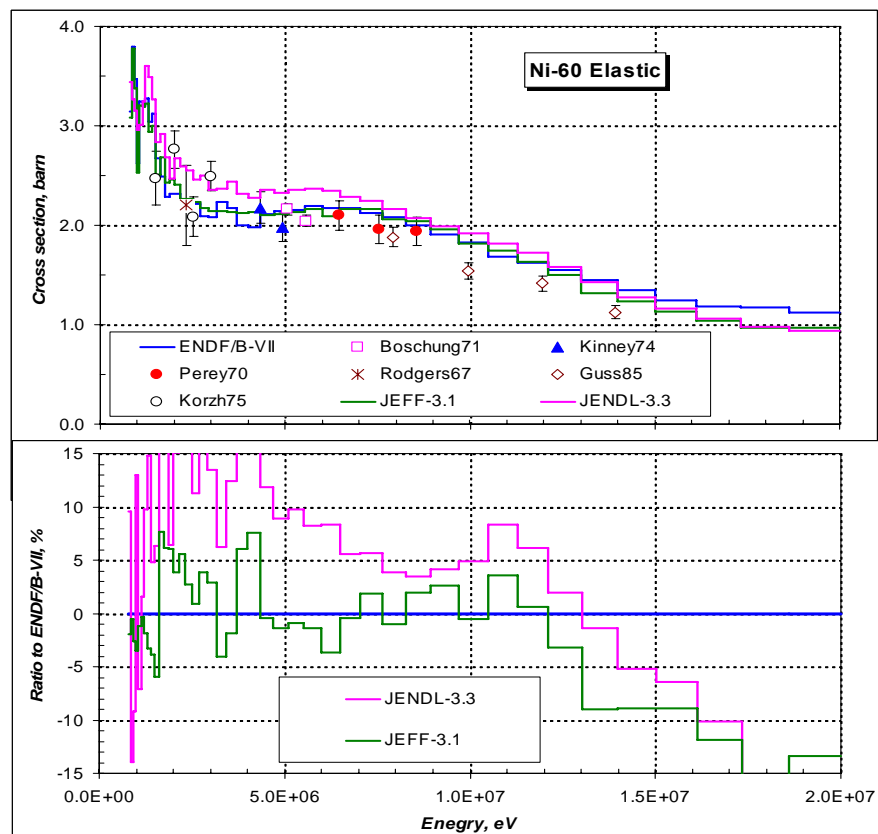


Рисунок 5 – Ход сечения упругого рассеяния области энергий 1МэВ – 20 МэВ.

### 3.3.Сечение радиационного захвата

Сечение радиационного захвата, как и полное сечение, различается в области энергий выше 500 кэВ. Сравнение сечения радиационного захвата с экспериментальными данными показано на рисунке 6.

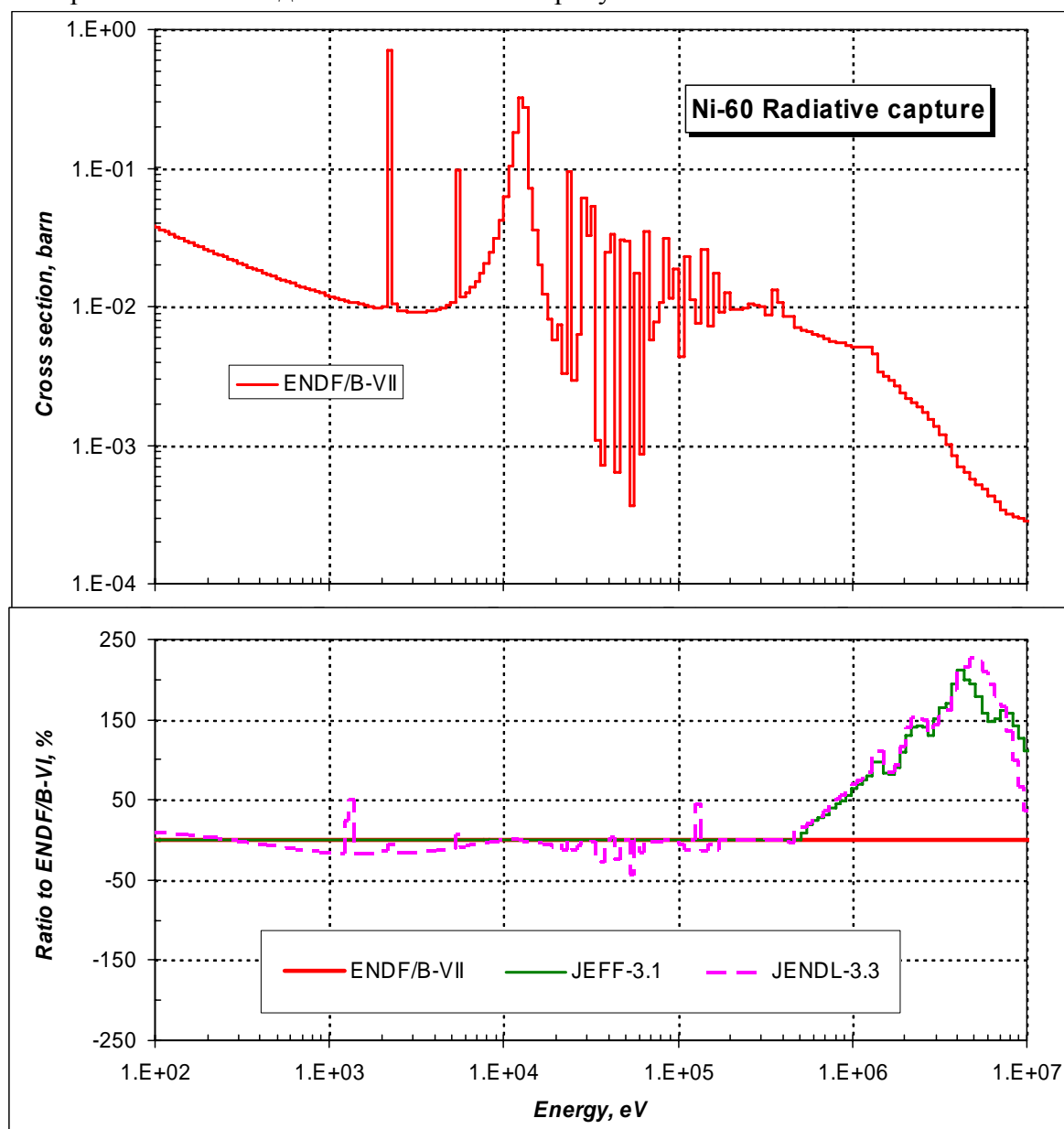


Рисунок 6 – Ход сечения захвата в области энергий 10 кэВ – 10 МэВ.

Из рисунка видно, что различие в сечениях между оценками находится в области энергий  $\sim 5$  МэВ.

Сравнение оцененных и экспериментальных данных в этой области энергий показано на рисунке 7.

Из представленного на рисунке 7 сравнения видно, что оценки JEFF-3.1 и JENDL-3.3 в этой области ориентируются на эксперимент Perey et al, выполненный в 1982 году. В оценке ENDF/B результаты этого эксперимента не учитывались.

Следовательно, более корректной оценкой сечения радиационного захвата нейтронов является JEFF-3.1.

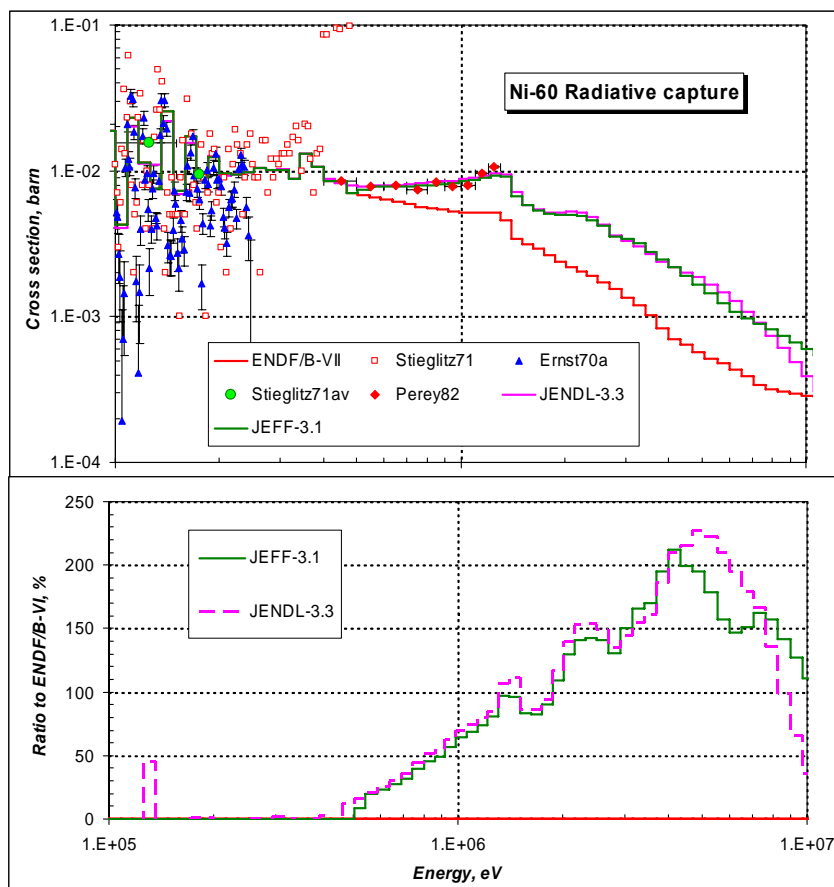


Рисунок 7 – Ход сечения захвата в области энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

### 3.4. Сечение неупругого рассеяния

Сравнение различных оценок приведено на рисунке 8. Видно, что в отличие от ENDF/B-VI и JENDL-3.3, сечение неупругого рассеяния в JEFF-3.1 носит ярко выраженный резонансный характер. Причем, как и для Ni-58, имеется соответствие между резонансной структурой, наблюдаемой в полном сечений и в сечении неупругого рассеяния.

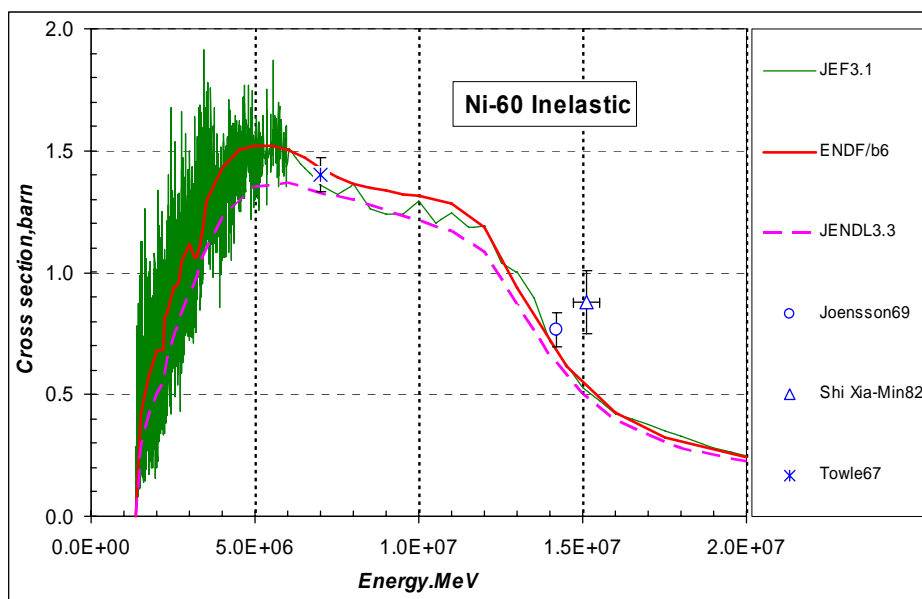


Рисунок 8 – Сечение неупругого рассеяния на Ni-58.

### 3.5. Сечение реакции образования нейтронов (n,2n)

На рисунке 9 показано сравнение реакции (n,2n) оцененных и экспериментальных данных.

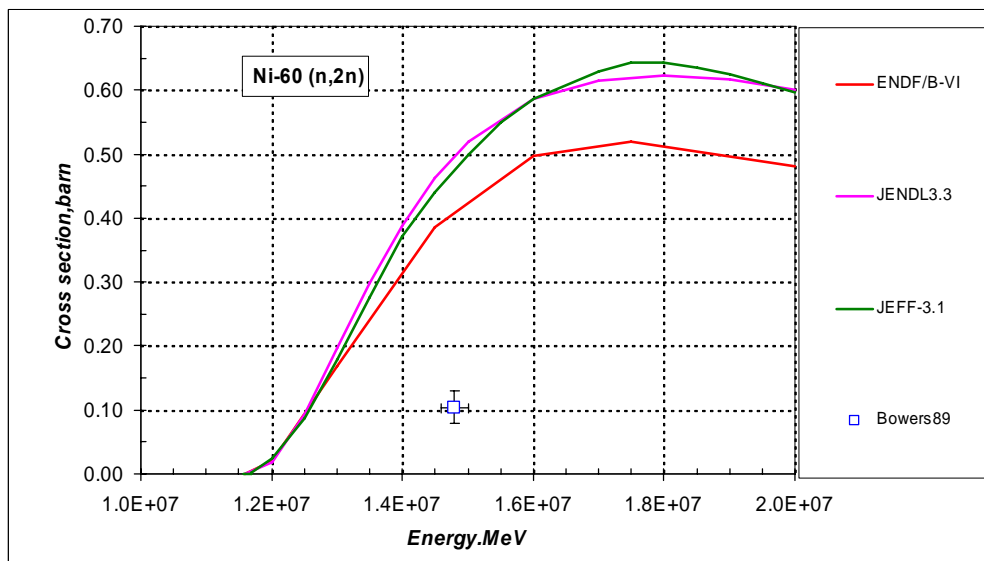


Рисунок 9 – Сечение реакции (n,2n) на Ni-60.

Из представленного на рисунке 9 сравнения видно, что связка JENDL – JEFF согласована друг с другом и отличается от оценки ENDF/B. Единственный доступный набор экспериментальных данных находится в противоречии с оцененными кривыми.

### 3.6. Сечения реакции образования протонов (n,p) и (n,np)

На рисунках 10 – 11 показано сравнение сечений реакций с образованием протонов.

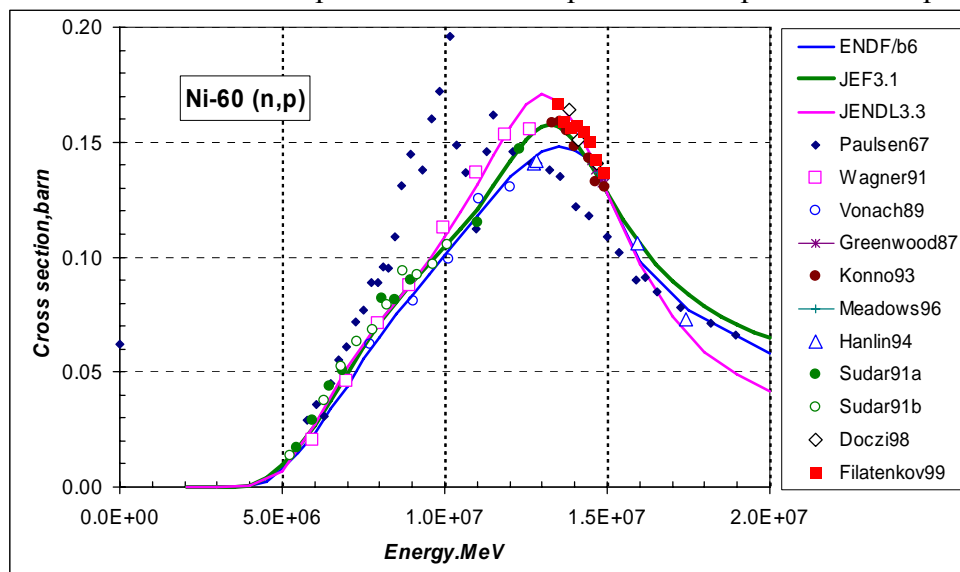


Рисунок 10 – Сечение реакции (n,p) на Ni-60.

Из представленного на рисунке 10 сравнения видно, что последние экспериментальные данные подтверждают оценку JENDL-3.3. Оценка JEFF хорошо согласуется с экспериментальными данными до 10 МэВ, далее она, опираясь на эксперимент Sudar et al(1991), довольно неплохо согласуется с экспериментами Филатенкова и др. (1999) и Doczi et al (1998).

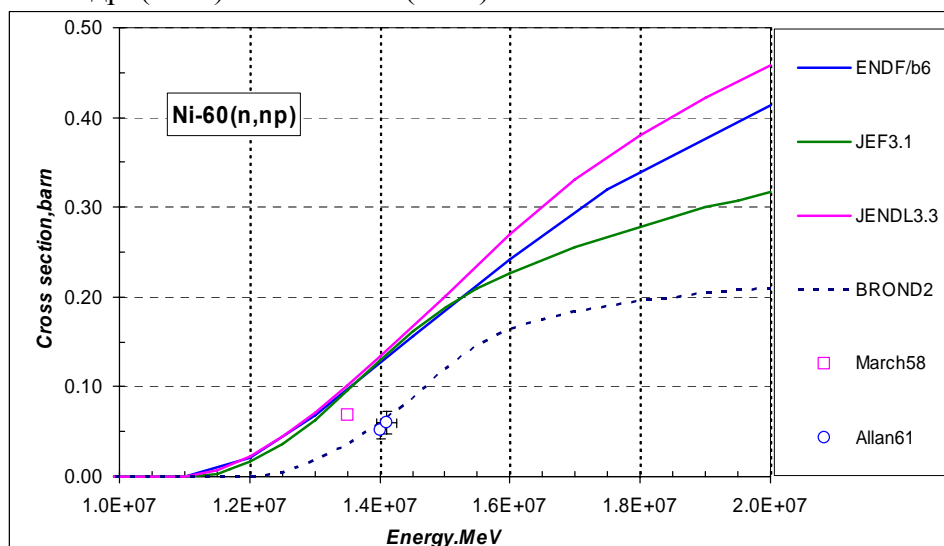


Рисунок 11 – Сечение реакции (n,np) на Ni-60.

Из приведенного на рисунке 11 сравнения видно, что до 15 МэВ все оценки реакции (n,np) согласуются друг с другом. Выше 15 МэВ оценки начинают расходиться. При энергии 14.8 МэВ имеется эксперимент Grimes et al, в котором измерен суммарный выход протонов. Этот эксперимент и согласует все оценки в точке 15 МэВ. Выше этой энергии расхождения в описании поведения сечения объясняются использованием различных теоретических моделей.

### 3.7. Сечения реакции образования альфа частиц (n,a) и (n,na)

На рисунках 12 - 13 показано сравнение сечений реакции (n,a) и (n,na) в области энергий до 20 МэВ.

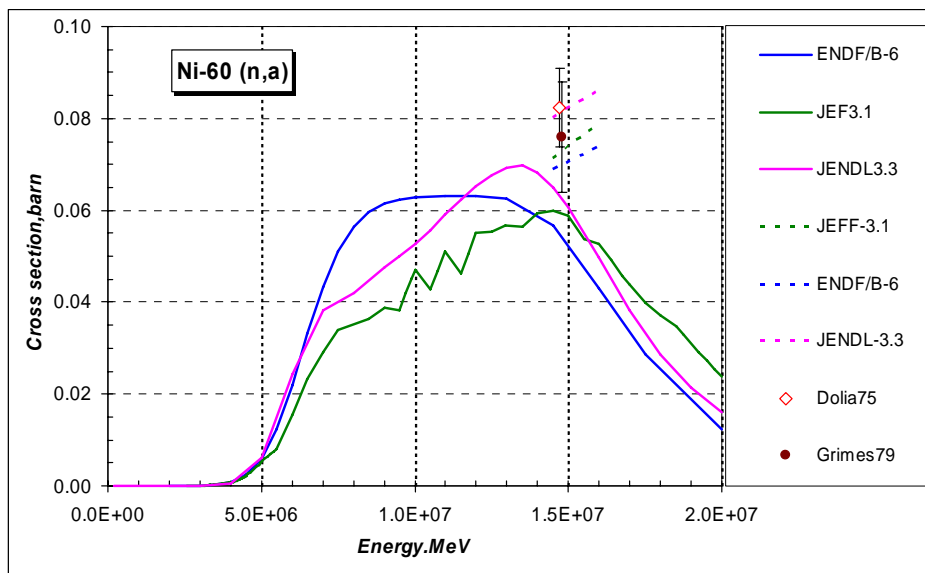


Рисунок 12 – Сечение реакции (n,a) на Ni-60.

Из приведенного на рисунке 12 сравнения видно, что все оценки по-разному описывают процесс (n,a). Прямые экспериментальные данные здесь отсутствуют. Имеются немногочисленные эксперименты по суммарному выходу альфа частиц при взаимодействии нейтронов с Ni-60. Они приведены на рисунке 12. Штрих пунктиром показаны суммарные сечения выхода альфа частиц для каждой оценки. Видно, что в пределах имеющихся экспериментальных погрешностей оценка ENDF/B занижена, остальные оценки согласуются с экспериментом.

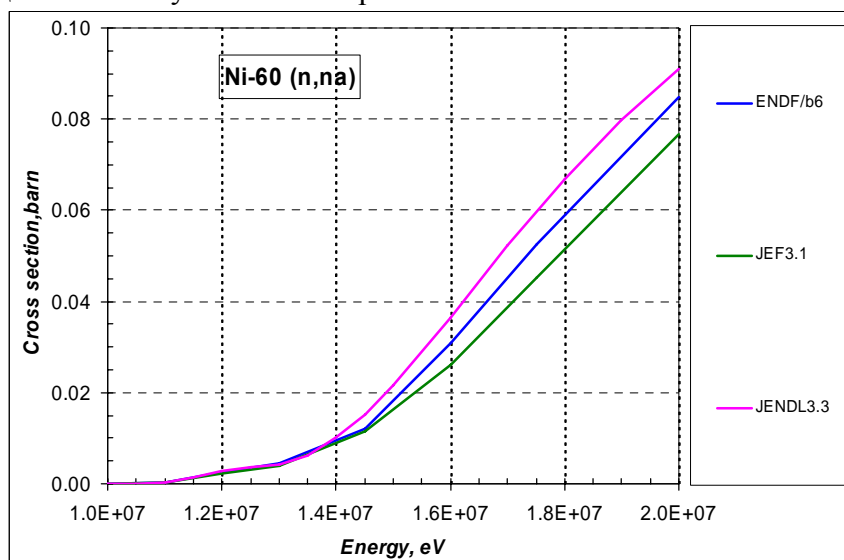


Рисунок 13 – Сечение реакции (n,a) на Ni-58 в области энергий до 20 МэВ.

Из приведенного на рисунке 13 сравнения видно, что все оценки согласовано описывают процесс (n,na).

### 3.8. Сечение реакции с образованием дейтонов (n,d).

На рисунке 14 показано сравнение оцененных сечений реакции (n,d) с имеющимися экспериментальными данными.

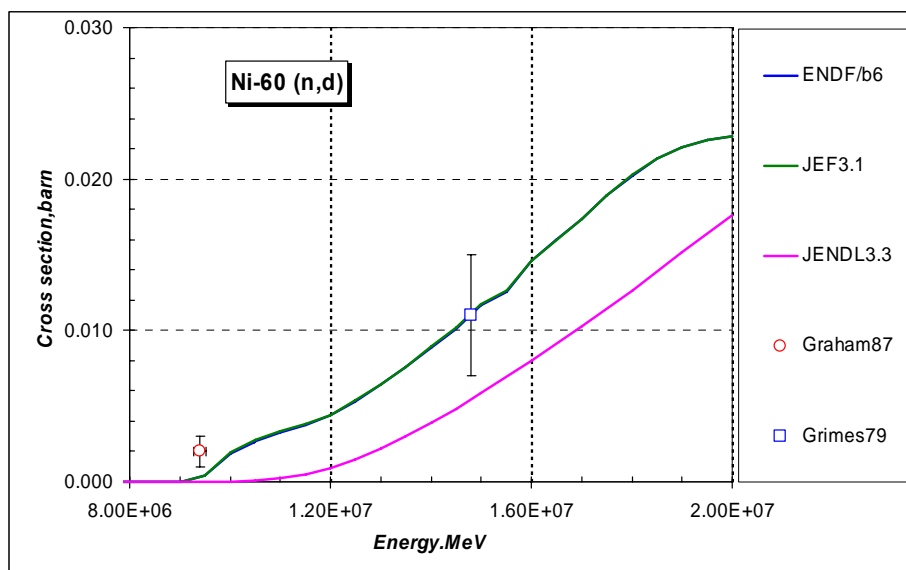


Рисунок 14 – Сечение реакции (n,d) на Ni-60 в области энергий до 20 МэВ.

Из рисунка 14 видно, что наилучшим образом с экспериментом согласуются оценки из ENDF/B-VI и JEFF-3.1.

### 3.9. Сечение реакции с образованием трития (n,t) и гелия -3 (n,He-3).

Сечения указанных реакций имеют величины порядка микробарн и высокий порог реакции, поэтому в оценках ENDF/B-VI и JEFF-3.1 они не приводятся. Тем не менее, информация по таким реакциям имеется, и они без особых проблем могут быть добавлены в оценки JEFF-3.1 и ENDF/B-VI.

#### **Выводы**

На основании проведенного анализа следует, что сечения взаимодействия нейтронов с Ni-60 наилучшим образом оценены в библиотеке JEFF-3.1.

Имеется возможность дополнить эту оценку включением в нее сечения образования трития и He-3, несмотря на то, что сечения этих реакций малы по величине.

## **4. Угловые распределения нейтронов**

### 4.1. Угловые распределения при упругом рассеянии нейтронов

Экспериментальных данных по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов не много. Из них наиболее современных данных это:

- детальные по энергии (вплоть до 813 кэВ) данные угловых распределений нейтронов для углов рассеяния  $39^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $140^\circ$  и  $160^\circ$  группы Perey et al, выполненные в 1993 на ORELA;

- данные Smith et al, выполненные в 1992 году в области более высоких энергий от 4.5 МэВ до 9.99 МэВ на установке DINAM (Tandem Dinamitron);

- данные группы Guss et al, выполненные в 1985 году в области высоких энергий от 7.9 МэВ до 13.94 МэВ на установке VDGТ.

Отметим, что в JEFF-3.1 данные по угловому распределению нейтронов при упругом рассеянии нейтронов взяты из оценки ENDF/B без изменений.

На рисунке 18 приведено сравнение оцененных угловых распределений при упругом рассеянии с экспериментальными данными группы Guss et al (1985).

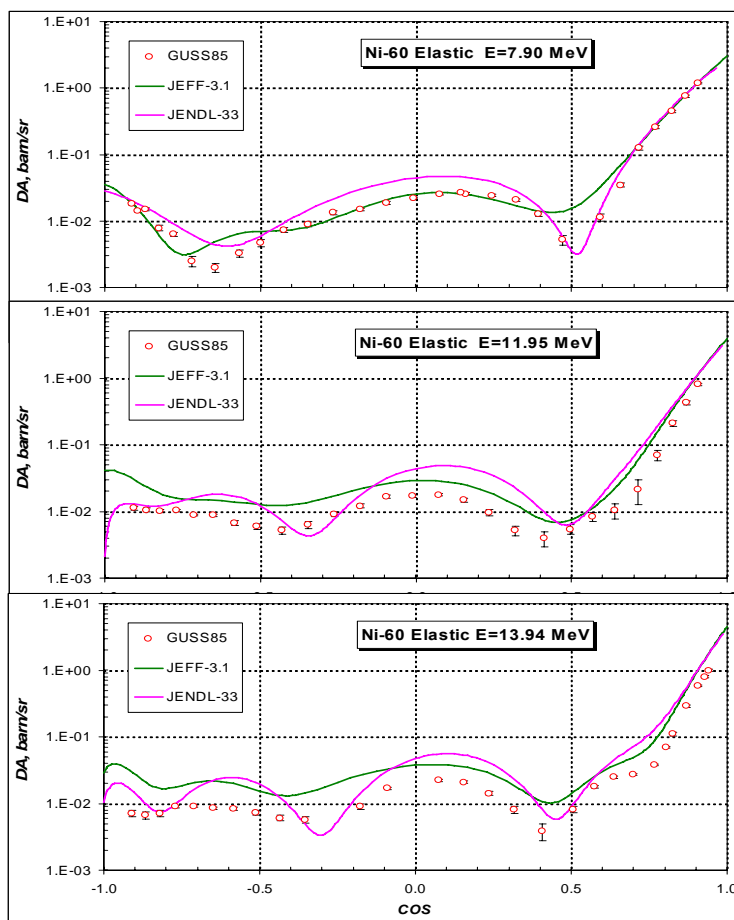


Рисунок 18 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.



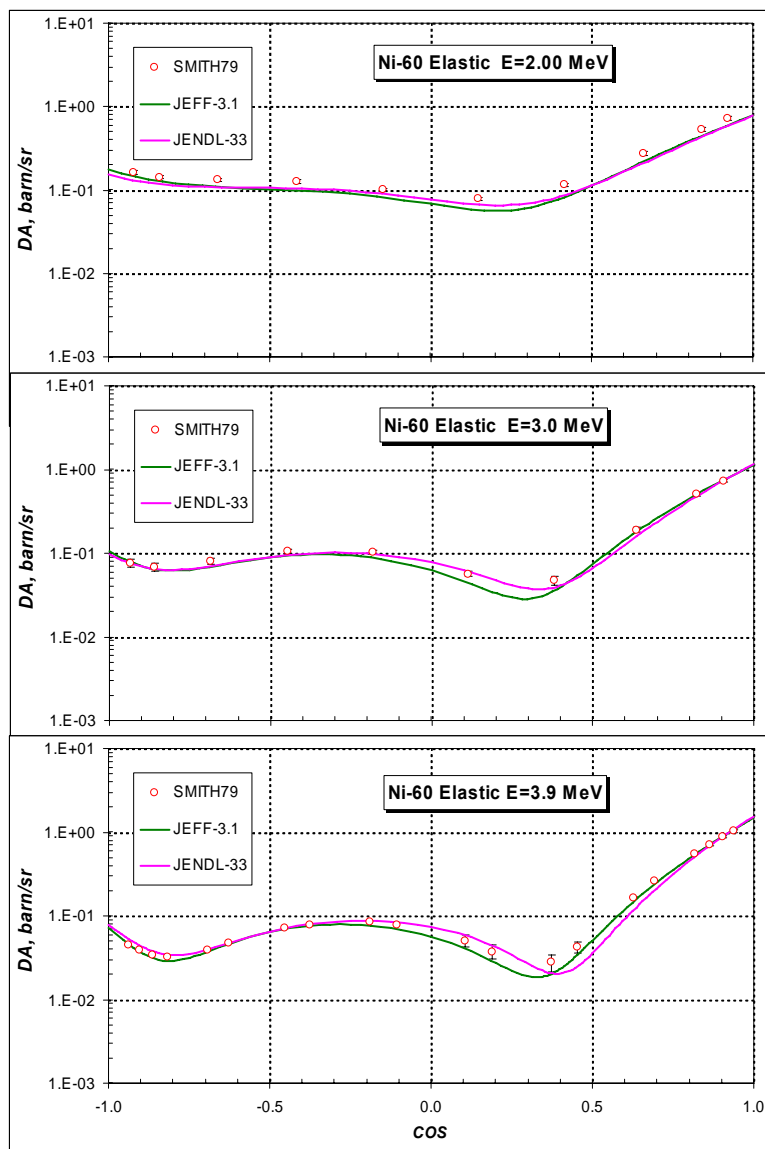


Рисунок 19 - Сравнение оцененных и экспериментальных угловых распределений.

Ниже на рисунке 19 показано аналогичное сравнение с экспериментальными данными группы Smith et al (1979).

Из приведенного на рисунках 18-19 сравнения видно, что при низких значениях энергии угловые распределения из JEFF-3.1 (=ENDF/B-VII) из JENDL-3.3 одинаково хорошо лучше согласуются с экспериментальными данными.

При более высоких энергиях обе оценки согласовано хорошо описывают рассеяние вперед, рассеяние под углом  $90^\circ$  лучше описывается оценкой из JEFF-3.1, и, наконец, рассеяние назад обе оценки описывают по-разному, но одинаково плохо.

## 5. Энергетические распределения нейтронов

### 5.1. Энергетические распределения при неупругом рассеянии нейтронов

В оценке ENDF/B-VIIb энерго - угловые распределения приводятся для реакций с  $MT=16, 22, 28, 51, 91, 103, 107$ . Для всех перечисленных реакций данные представляют собой энерго-угловые распределения для вылетающих частиц, остаточного ядра и фотонов, образующихся в процессе реакции. Угловые распределения учитываются с помощью полиномов Лежандра.

В оценке JEFF-3.1, в которой оценка ENDF/B использовалась как стартовая, корректировка коснулась закона интерполяции данных для налетающих частиц. INT-12 заменен на INT=2. Кроме этого, величину нейтронного спектра неупруго рассеянных нейтронов слегка уменьшили выше 7.5 МэВ для лучшего согласования со спектром испускаемых нейтронов при 14 МэВ, промеренных группой Vonach et al.

В оценке JENDL-3.3 энерго-угловые распределения приводятся для следующих типов реакций MT=16, 22, 28, 91, 203, 204, 205, 206, 207, данные для которых взяты из JENDL Fusion files.

Для реакций с MT=16, 22, 28, 91 данные представляют собой энерго-угловые распределения только для вылетающих нейтронов.

Для реакций с MT=203, 204, 205, 206, 207 энерго-угловые распределения приводятся для совокупных вылетающих заряженных частиц.

## **Выводы**

Представление энерго-угловых распределений в оценке JEFF-3.1 (как откорректированной версии оценки ENDF/B), по-видимому, предпочтительнее оценки JENDL-3.3. Наряду с описанием вылетающих частиц и спектров образующихся фотонов дополнительно приводится информация об остаточных ядрах, т.е. описание процессов является более общим.

## **6. Образование и взаимодействие фотонов**

Для Ni-60 представлены две оценки фотонных данных в библиотеках ENDF/B-VIIb (~JEFF-3.1) и JENDL3.3.

В оценке ENDF/B фотонные данные представлены непосредственно для следующих реакций MT=51-58,102. Для реакций MT=16, 22, 28, 91, 103 и 107 спектры фотонов задаются в секции MF=6 с помощью данных по энерго-угловым распределениям.

В JENDL фотонные данные представлены для реакций MT=16, 22, 28, 51-65, 91, 102, 103, 107.

### **6.1. Множественности образования фотонов и вероятности переходов**

Множественности фотонов в нейтронных реакциях MT=16, 22, 28, 91, 103, 107 в JENDL были получены по программе GNASH. Фотоны неупругого рассеяния в представлены с помощью 11-ти уровней и континуумом уровней (3.3738 MeV). Заметим, что в оценке JENDL последний уровень (61-й) имеет порог выше, чем начинается континуум уровней.

В оценке ENDF/B данные представлены также для 11 уровней, которые, как видно из таблицы 3, практически совпадают с оценкой JENDL. Область континуума уровней начинается ниже по энергии, чем в JENDL - при 3.3952 MeV.

В оценке ENDF/B для 11 уровней заданы вероятности переходов, взятые из работы D.M. Hetric, C.Y. Fu, and D.C. Larcon, "Calculated neutron-induced cross sections for 58,60Ni from 1 TO 20 MEV and comparison with experiment," ORNL/TM-10219, ENDF-344 (1987).

В оценке JENDL для неупругого рассеяния также даны вероятности переходов, которые до 61-го уровня такие же, как и в ENDF/B.

Фотоны радиационного захвата в JENDL получены из энергетического баланса. В ENDF/B данные получены по программе TNG.

Таблица 3- Энергии уровней неупругого рассеяния

N	JENDL3.3.	ENDF/B-VII
51	1.3549E+06	1.3524E+06
52	2.1951E+06	2.1964E+06
53	2.3234E+06	2.3285E+06
54	2.5480E+06	2.5522E+06
55	2.6702E+06	2.6743E+06
56	3.1723E+06	3.1725E+06
57	3.1766E+06	3.1766E+06
58	3.2397E+06	3.2396E+06
59	3.2479E+06	3.2478E+06
60	3.3246E+06	3.3250E+06
61	4.1077E+06	3.3738E+06
91	3.3738E+06	3.3952E+06

### **6.2. Угловое распределение фотонов.**

В обеих оценках для всех фотонов в нейтронных реакциях определено изотропное угловое распределение.

### **6.3. Непрерывные энергетические спектры.**

В оценке JENDL энергетические спектры для фотонов нейтронных реакций MT=16,22,28,91,103,107 были посчитаны по программе GNASH. Спектры фотонов радиационного захвата были получены по программе Casthy с учетом экспериментальных данных.

В ENDF/B непосредственно в секции MF=15 есть только спектры радиационного захвата, которые посчитаны по программе TNG. Спектры для реакций MT=16, 22, 28, 91, 103, 107 приведены в секции MF=6.

### **Выводы:**

Описание фотонных данных в оценке JENDL-3.3 охватывает больше нейтронных реакций. Для тех реакций, где оценки пересекаются, нельзя отдать предпочтение какой-то оценки.

## **7. Заключение**

Для Ni-60 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке JEFF-3.1.

Материалу присвоить номер MAT=2858.

Желательно, в дальнейшем, устранить все отмеченные в ходе анализа данных замечания и неточности в принятой оценке.

### **Автор обоснования отбора оцененных данных**

Кошечев В.Н.

## Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T=1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	0.985 барн	78.8 барн	2.935 барн
Рад. захват	2.766 барн	1.37 барн	6.30 мбарн
Реакция (n,p)	-	-	2.48 мбарн
Реакция (n,d)	-	-	9.33 мкбарн
Реакция (n, $\alpha$ )	-	-	1.32 мбарн
Реакция (n,2n)	-	-	0.114 мбарн

## 28.6. Никель-61

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ.

Тот факт, что для основных стабильных изотопов Ni-58 и Ni-60, составляющих естественную смесь в РОСФОНД рекомендованы оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1, является веским аргументом для отбора из JEFF-3.1 в РОСФОНД и других изотопов никеля, процентное содержание которых много меньше, чем Ni-58 и Ni-60 без подробного анализа имеющихся нейтронных данных.

В библиотеке JEFF-3.1 для Ni-61 содержится оценка из ENDF/B-VI.8, которая без каких либо ревизий принята в ENDF/B-VII b0 версии. Однако в последующую b1 версию включены нейтронные данные для Ni-61, в которых энерго-угловые распределения получены по откорректированной программе GNASH. Поэтому в РОСФОНД следует включить данные из ENDF/B-VII b1 версии.

### 1. Общие характеристики

**Z=28**

**A=60.931 056 0  $\pm$  0.000 000 7**

**A<sub>wr</sub>=60.407 629 0  $\pm$  0.000 000 7**

Содержание в естественной смеси: - 1.1399%

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	E <sub>порог.</sub> , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	(n,n')	-0.0670	0.0681	Ni-61
16	(n,2n)	-7.8203	7.9498	Ni-60
28	(n,np)	-9.8620	10.0250	Co-60(5.272y)
102	(n, $\gamma$ )	10.5973	0.0000	Ni-62
103	(n,p)	-0.5397	0.5486	Co-61(1.65h)
107	(n, $\alpha$ )	3.5790	0.0000	Fe-58
111	(n,2p)	-9.2887	9.4425	Fe-60(1.5E6y)

Схема уровней: (согласно оценке ENDF/B-VII)

MT	LEVEL ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	<b>0.0</b>	<b>3/2-</b>
51	0.0670	5/2-
52	0.2830	1/2-
53	0.6560	1/2-
54	0.9090	5/2-
55	1.0150	7/2-
56	1.1000	3/2-
57	1.1320	5/2-
58	1.1850	3/2-
91 (cont)	1.4550	

## 2. Заключение

Для Ni-61 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке ENDF/B-VII b1 версия.

Материалу присвоить номер МАТ=2861.

### Автор обоснования отбора оцененных данных

Кощеев В.Н.

### Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T=1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	7.960 барн	104. барн	2.345 барн
Рад. захват	2.498 барн	1.52 барн	4.92 мбарн
Реакция (n,p)	-	-	3.29 мбарн
Реакция (n, $\alpha$ )	-	-	2.63 мбарн
Реакция (n,2n)	-	-	1.36 мбарн

## 28.7. Никель-62

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ.

Тот факт, что для основных стабильных изотопов Ni-58 и Ni-60, составляющих естественную смесь в РОСФОНД рекомендованы оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1, является веским аргументом для отбора из JEFF-3.1 в РОСФОНД и других изотопов никеля, процентное содержание которых много меньше, чем Ni-58 и Ni-60 без подробного анализа имеющихся нейтронных данных.

В библиотеке JEFF-3.1 для Ni-62 содержится оценка из ENDF/B-VI.8, которая без каких либо ревизий принята в ENDF/B-VII b0 версии. Однако в последующую b1 версию включены нейтронные данные для Ni-62, в которых энерго угловые распределения получены по откорректированной программе GNASH. Поэтому в РОСФОНД следует включить данные из ENDF/B-VII b1 версии.

### 1. Общие характеристики

**Z=28**

**A=61.928 345 1 ± 0.000 000 6**

**Awr=61.396 350 9 ± 0.000 000 6**

Содержание в естественной смеси: - 3.6345 %

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	E <sub>порог.</sub> , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	(n,n')	-1.1730	1.1921	Ni-62
16	(n,2n)	-10.5980	10.7710	Ni-61
22	(n,na)	-7.0186	7.1329	Fe-54
28	(n,np)	-11.1380	11.3190	Co-61(1.65h)
102	(n,γ)	6.8379	0.0000	Ni-63
103	(n,p)	-4.4590	4.5316	Co-62(1.50m)
104	(n,d)	-8.9129	9.0580	Co-61(1.65h)
107	(n,a)	-0.4374	0.4445	Fe-59(44.5d)

Схема уровней: (согласно оценке ENDF/B-VII)

MT	LEVEL ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	<b>0.0</b>	<b>0+</b>
51	1.1730	2+
52	2.0490	0+
53	2.3020	2+
54	2.3360	4+
91(cont)	2.8910	

## 2. Заключение

Для Ni-62 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке ENDF/B-VII b2 версия.

Материалу присвоить номер MAT=2862.

### Автор обоснования отбора оцененных данных

Кошечев В.Н.

### Тепловые и интегральные сечения

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T=1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	9.974 барн	456. барн	2.07 барн
Рад. захват	14.41 барн	5.96 барн	6.70 мбарн
Реакция (n,p)	-	-	0.047 мбарн
Реакция (n,d)	-	-	3.0 мкбарн
Реакция (n, $\alpha$ )	-	-	0.065 мбарн
Реакция (n,2n)	-	-	0.35 мбарн

## 28.8. Никель-63

Радиоактивен.  $T_{1/2}=101.1$  год.

Способ радиоактивного распада –  $\epsilon + \beta$  распад.

### Заключение

В РОСФОНД приняты нейтронные данные из JEFF-3.1/A (Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер MAT=2863;
2. удален файл MF=8;
2. Сечения образования отдельных состояний ядер-продуктов, содержащиеся в файле MF=10, сложены по подсекциям и суммы занесены в соответствующие секции файла MF=3. Файл MF=10 удален, поскольку долгоживущих изомеров в нейтронных реакциях на никеле не образуется.

### Автор обоснования отбора оцененных данных

Кошечев В.Н.

## 28.9. Никель-64

Оцененные данные рассматриваются в диапазоне энергий до 20 МэВ.

Тот факт, что для основных стабильных изотопов Ni-58 и Ni-60, составляющих естественную смесь в РОСФОНД рекомендованы оцененные нейтронные данные из библиотеки JEFF-3.1, является веским аргументом для отбора из JEFF-3.1 в РОСФОНД и других изотопов никеля, процентное содержание которых много меньше, чем Ni-58 и Ni-60 без подробного анализа имеющихся нейтронных данных.

В библиотеке JEFF-3.1 для Ni-64 содержится оценка из ENDF/B-VI.8, которая без каких либо ревизий принята в ENDF/B-VII b0 версии. Однако в последующую b1 версию включены нейтронные данные для Ni-64, в которых энерго угловые распределения получены по откорректированной программе GNASH. Поэтому в РОСФОНД следует включить данные из ENDF/B-VII b1 версии.

### 1. Общие характеристики

**Z=28**

**A=63.927 966 0 ± 0.000 000 6**

**A<sub>wr</sub>=63.378 794 1 ± 0.000 000 6**

Содержание в естественной смеси: - 0.9256 %

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	Е <sub>порог.</sub> , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	(n,n')	-1.3460	1.3672	Ni-64
16	(n,2n)	-9.6570	9.8094	Ni-63(101.1y)
22	(n,na)	-8.0826	8.2095	Fe-56
28	(n,np)	-12.5360	12.7340	Co-63(27.4s)
102	(n,γ)	6.0981	0.0000	Ni-65(2.52h)
103	(n,p)	-6.5240	6.6269	Co-64(0.30s)
104	(n,d)	-10.3114	10.4740	Co-63(27.4s)
107	(n,a)	-2.4420	2.4805	Fe-61(5.98m)

Схема уровней: (согласно оценке ENDF/B-VII)

MT	LEVEL	ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	<b>0.0</b>		<b>0+</b>
51	1.3460		2+
52	2.2770		2+
91 (cont)	2.6080		

### 2. Заключение

Для Ni-64 в РОСФОНД следует принять нейтронные данные, находящиеся в библиотеке ENDF/B-VII b1 версия.

Материалу присвоить номер MAT=2864



**Автор обоснования отбора оцененных данных**

Кощеев В.Н.

**Тепловые и интегральные сечения**

Реакция	$\sigma(0.0253 \text{ эВ})$	RI	$\langle\sigma\rangle$ на спектре Максвелла с $T= 1.35 \text{ МэВ}$
Упругое рассеяние	0.016 барн	84.9барн	3.57 барн
Рад. захват	1.52 барн	0.75 барн	4.68 мбарн
Реакция (n,p)	-	-	1.74 мкбарн
Реакция (n,d)	-	-	1.89 мкбарн
Реакция (n, $\alpha$ )	-	-	13.3 мкбарн
Реакция (n,2n)	-	-	0.82 мбарн

**28.10. Никель-66**

Радиоактивен.  $T_{1/2}=54.6$  часов.

Способ радиоактивного распада –  $\epsilon + \beta$  распад.

**Заключение**

В РОСФОНД принять нейтронные данные из JEFF-3.1/A (Forrest, Kopecky, Sublet, Koning, 2003 г.) со следующими изменениями:

1. материалу присвоен номер MAT=2866;
2. удален файл MF=8;

**Автор обоснования отбора оцененных данных**

Кощеев В.Н.