

## 7.АЗОТ

В РОСФОНД вносятся данные для двух стабильных изотопов азота: N-14 (99.634%) и N-15 (0.366%).

Долгоживущих радиоактивных изотопов азот не имеет.

В процессе анализа нейтронных данных в работе использовались экспериментальные данные из библиотеки EXFOR (Database and Retrieval system, version 1.81, June 2005).

### 7.1. Азот-14

#### 1. Общее описание

1.1.  $Z=7$

1.2.  $A=14.003\ 074\ 004\ 8(6)$

1.3.  $A_{wr}=13.882\ 780\ 878\ 8(6)$

1.4. Содержание в естественной смеси: - 99.634 %

1.5. Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$ , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	(n,n')	<b>-2.3128</b>	<b>2.4794</b>	N-14
16	(n,2n)	<b>-10.5535</b>	<b>11.3137</b>	N-13(9.965s)
22	(n,na)	<b>-11.6134</b>	<b>12.4499</b>	B-10
28	(n,np)	<b>-7.5507</b>	<b>8.0946</b>	C-13
32	(n,nd)	<b>-10.2725</b>	<b>11.0124</b>	C-12
102	(n, $\gamma$ )	<b>10.5536</b>	<b>0.0</b>	N-15
103	(n,p)	<b>0.6260</b>	<b>0.0</b>	C-14(5730y)
104	(n,d)	<b>-5.3260</b>	<b>5.7097</b>	C-13
105	(n,t)	<b>-4.0152</b>	<b>4.3044</b>	C-12
107	(n,a)	<b>-0.1580</b>	<b>0.1694</b>	B-10
108	(n,2a)	<b>-8.8230</b>	<b>9.4585</b>	Li-6

1.6. Схема уровней:

MT	LEVEL ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
	<b>0.0</b>	<b>1+</b>
51	2.1328	0+
52	3.9481	1+
53	4.9151	0-
54	5.1059	2-
55	5.6914	1-
56	5.8343	3-
57	6.2035	1+
58	6.4462	3+
59	7.0291	2+
60	7.9669	2-
61	8.0620	1-
62	8.4900	4-
63	8.6180	0+

64	8.7760	0-
65	8.9070	3-
66	8.9640	5+
67	8.9800	2+
68	9.1290	3+
69	9.1723	2+
70	9.3380	2-
71	9.5090	2-
72	9.7030	1+
73	10.0790	3+
74	10.1010	2+
75	10.2260	1-
76	10.4320	2+
77	10.5340	1-
78	10.8120	5+
91 (cont)	11.0000	

**1.7. Радиоактивность:** не радиоактивен

## **2. Резонансная область: (MF=2)**

2.1. Спин и четность  $J^\pi = 1^+$ ;

2.2. Радиус рассеяния:  $R = 0.886366^{-12}$  см.

2.3. Область резонансных энергий.

## **3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)**

Азот-14 – основной изотоп: содержание в естественной смеси 99.643 %.

Рассмотрим наиболее современные оценки для нейтронных сечений.

В библиотеке JEFF-3.1 принята, без каких либо изменений, оценка из ENDF/B-6 (release 8).

В версии библиотеки ENDF/B –VII betha1 нейтронные данные, также, без каких либо изменений приняты из ENDF/B-6 (release 8).

В свою очередь, в release 8 библиотеки ENDF/B-VI представляет собой:

- ниже 20 МэВ полностью новую оценку Янга, Хейла и Чедвика (LANL), выполненную в 1990 году,

- расширение данных на область энергий до 40 МэВ (1992 г.), и пересмотр сечений в соответствии с новыми подробными экспериментальными данными Харви (1991).

По сути, после этой ревизии, оцененные нейтронные данные в области энергий ниже 20 МэВ практически не изменялись. Было выполнено лишь следующее:

- небольшая корректировка данных по неупругому рассеянию выше 13 МэВ (1994 г.),

- переоценка данных выше 20 МэВ (1997 г.),

- подкорректированы данные об испускании фотонов при радиационном захвате (2000 г.).

В библиотеке JENDL-3.3 за основу принята оценка Шибата, Асами, Канда и Мурата, выполненная в 1989 году в рамках работы над версией JENDL-3.

В 1990 году были модифицированы спектры нейтронов при низких энергиях. Тогда же были переоценены энерго-угловые распределения. Сечения неупругого рассеяния и угловые распределения при неупругом рассеянии были значительно пересмотрены.

В 1994 году в рамках работы над версией JENDL-3.2 сечения основных реакций были пересмотрены на основе имеющейся экспериментальной информации. Добавлены

формально угловые распределения для  $MT=54-90$  (изотропное рассеяние). Проведена корректировка фотонных данных.

В 2000 году при работе над 3-й версией библиотеки JENDL-3 сечение реакции  $(n,p)$  взято из JENFL fusion File-99 (Shibata) и модифицировано в 2001 году в области энергий до 40 кэВ. Полное и упругое сечения пересчитаны. Спектры нейтронов в реакциях  $MT=16-32$  пересмотрены.

В оценке БРОНД-2, выполненной в 1988 году группой Блохин, Работнов и др (ЦЯД), находится откорректированная версия нейтронных данных из ENDF/B-V. Модификация полного сечения выполнена, главным образом, в области энергий выше 0.483 МэВ. В диапазоне энергий 0.483 – 8.533 МэВ сечение рассчитывались с помощью Паде-аппроксимации. Выше 8.533 МэВ оно рассчитывались по оптической модели, параметры для которой определялись путем подгонки сечений под экспериментальные данные. Сечение реакции  $(n,2n)$  взято из библиотеки пороговых реакций БОСПОР (ЦЯД). Сечения реакции  $MT22, 28, 32$  рассчитаны по модели испарения. Сечения неупругого рассеяния на дискретных уровнях посчитаны по формализму Хаузера-Фешбаха с учетом конкурирующих процессов  $(n,p)$ ,  $(nd)$ ,  $(nt)$ ,  $(n,a)$ . Сечение радиационного захвата ниже 0.483 МэВ взято из ENDF/B-V без изменений. Выше сечение рассчитано по SLBW формализму с использованием резонансных параметров из компиляции Мухабхаба (1981).

### 3.1. Полное сечение ( $MT=1$ ).

На рисунке 1 представлено общее сравнение оцененных нейтронных данных из перечисленных трех библиотек в области энергий от 10 эВ -10 МэВ, из которого видно, что оценки по-разному описывают ход сечения перед областью резонансных энергий (100 эВ – 10 кэВ).

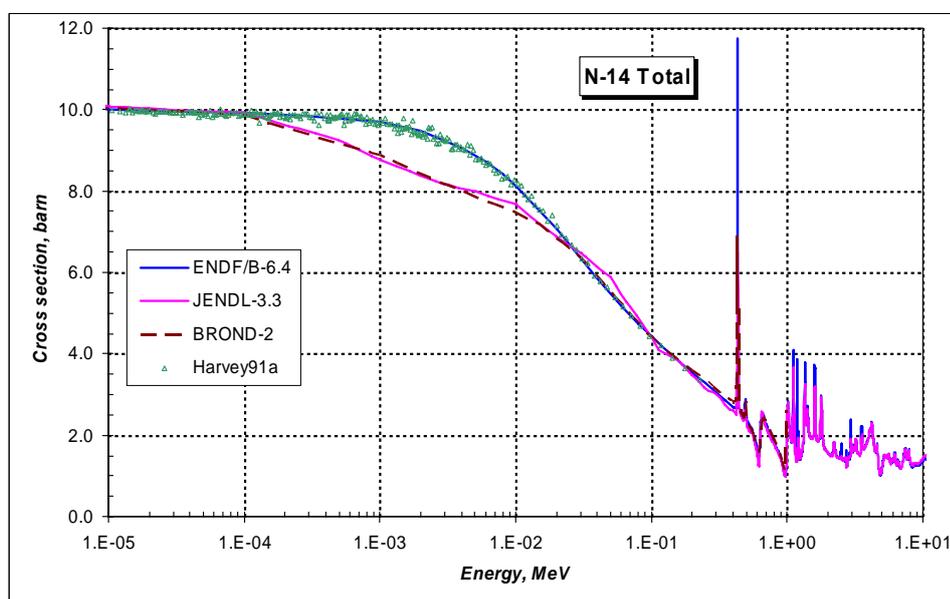


Рисунок 1 – Сравнение оцененных полных сечений для N-14 в области энергий от 1 эВ -10 МэВ.

Для этой области энергий в библиотеке EXFOR был единственный набор экспериментальных данных Harvey (1991). Прямое использование этих данных из библиотеки EXFOR приводит к предположению об ошибке в определении энергетической шкалы ( $3.7E-4$  –  $2.3E+2$  эВ для первого набора данных). Учитывая тот факт, что в названии работы идет речь об энергетическом интервале от 0.5 эВ до 50 МэВ, мы приписали экспериментальному набору кэВ-ные значения. Что получилось – видно на рисунке 1. Оценка ENDF/B - единственная согласующаяся с экспериментом (поскольку эти данные использовались для корректировки сечений в 1992 году).

Более подробные сравнения оцененных кривых с экспериментальными данными представлены на рисунке 2 для области энергий от 10 кэВ до 1 МэВ, и на рисунке 3 - для области энергий от 1 – 10 МэВ.

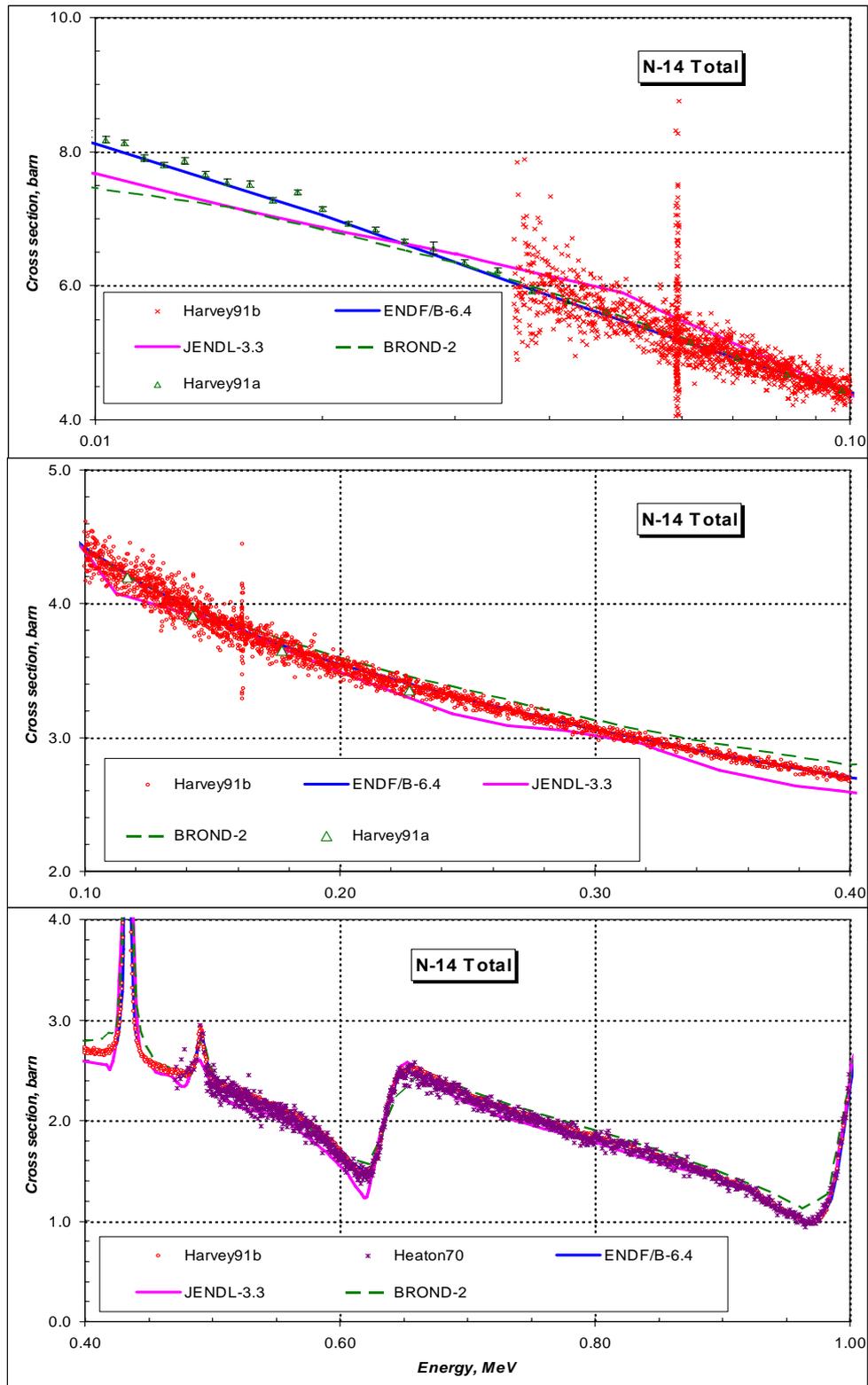


Рисунок 2 – Сравнение оцененных полных сечений для N-14 в области энергий от 10 кэВ -1 МэВ.

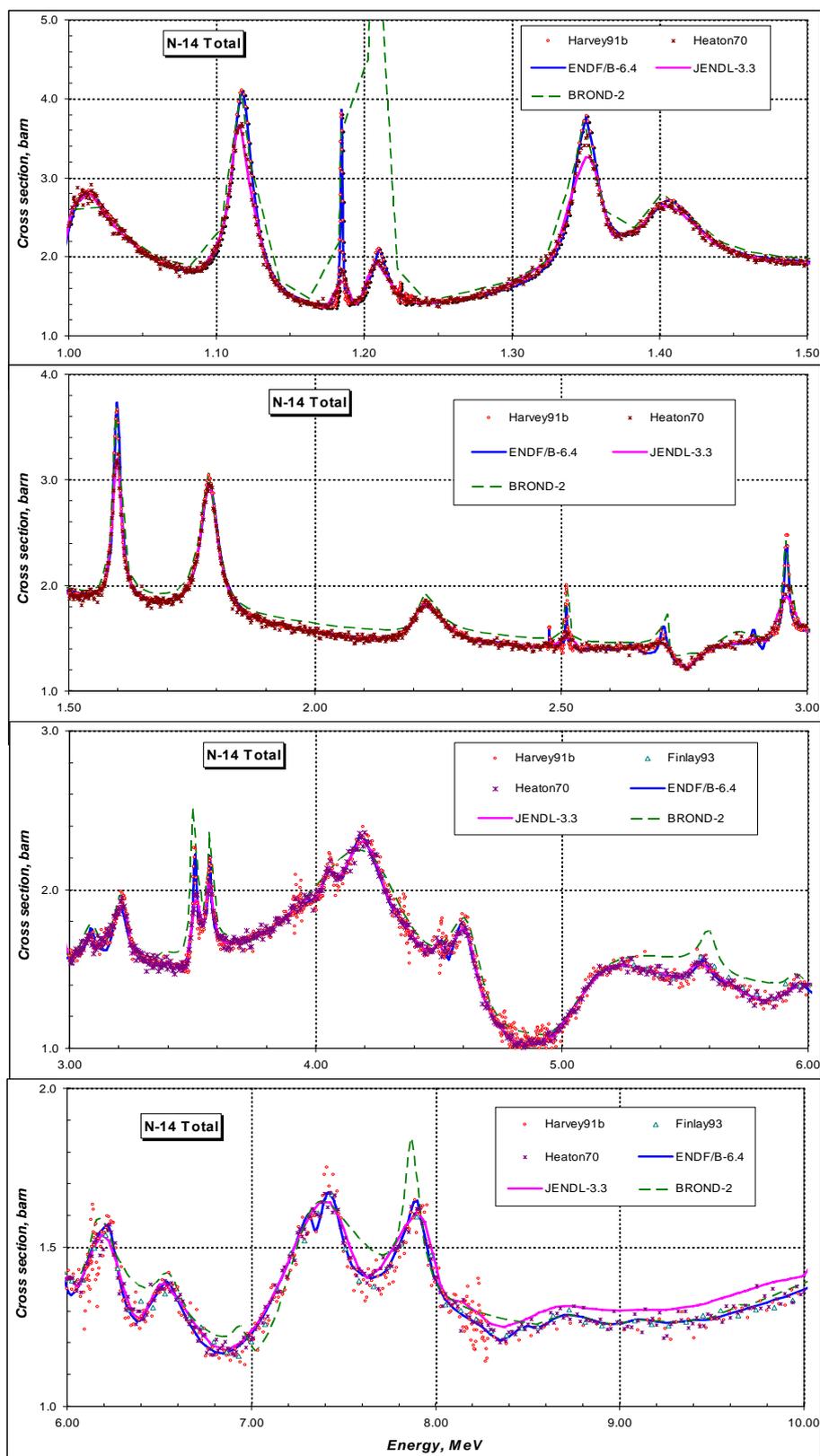


Рисунок 3 – Сравнение оцененных полных сечений для N-14 в области энергий от 1 -10 МэВ.

Из сравнения оцененных кривых сечения полного взаимодействия и экспериментальных данных (см. рисунки 1-3) следует, что **оценка сечения из ENDF/B наилучшим образом согласуется с экспериментальными микроданными.**

### 3.2. Сечение поглощения нейтронов.

Вклад различных составляющих в процесс поглощения нейтронов показан на рисунке 4 на основе оцененных сечений из библиотеки JENDL.

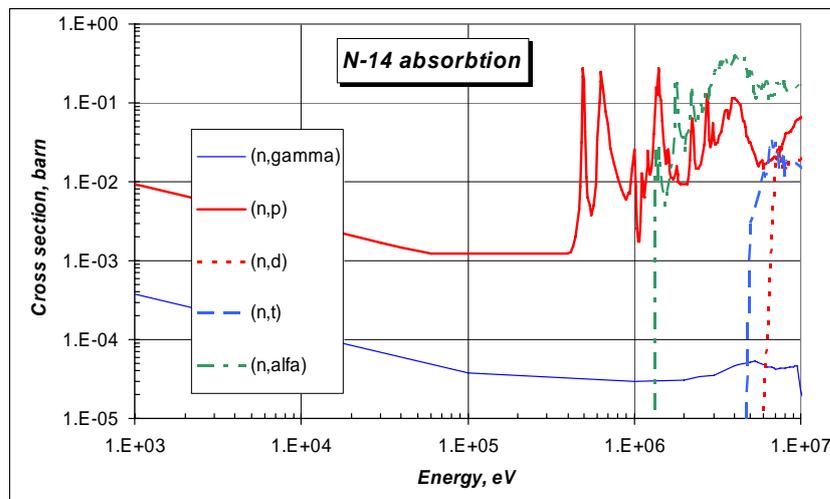


Рисунок 4 – Основные вкладчики в сечение поглощения на N-14.

Из рисунка 4 видно, что до 1 МэВ поглощение нейтронов, главным образом, происходит за счет реакции (n,p). Выше 1 МэВ становится определяющей реакция с испусканием альфа частицы. Величина сечения реакции с испусканием протона становится на порядок меньше. Выше 5 МэВ вклады в поглощение нейтронов от реакций (n,d) и (n,t) становятся сопоставимыми с вкладом реакции (n,p).

Вклад сечения радиационного захвата нейтронов на всем энергетическом интервале практически на два порядка меньше, чем вклад от реакции (n,p).

Ниже будет проведено сравнение сечений нейтронных реакций в порядке их значимости в процесс поглощения нейтронов.

#### 3.2.1 Сечение реакции (n,p) (MT=103).

На рисунке 5 показано общее сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения реакции (n,p) в области энергий до 10 МэВ. Из рисунка видно, что не все оцененные кривые согласуются с экспериментальными данными.

На рисунке 6 показано сравнение оцененных и экспериментальных данных для сечения реакции (n,p) в области энергий до 1 МэВ. Из приведенного сравнения видно, что в области энергий, где ход сечения пропорционален  $\sim 1/v$ , все оценки хорошо согласуются между собой. “Вход” в первый резонансный уровень по-разному описан в различных оценках. Ход сечения из оценки ENDF/B находится в противоречии с экспериментальными данными в этой области энергий. На наш взгляд, оценка из JENDL-3.3 наиболее согласована с экспериментальными данными.

Насколько хорошо различные оценки описывают резонансные уровни показано на рисунке 7. Из представленного сравнения видно, что оценка ENDF/B не согласуется с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 0.45 – 2.5 МэВ.

В области энергий выше 3 МэВ все оценки согласуются с экспериментом Мограна (1979), а выше 6 МэВ оценка из ENDF/B выполнена более корректно (см. рисунок 8).

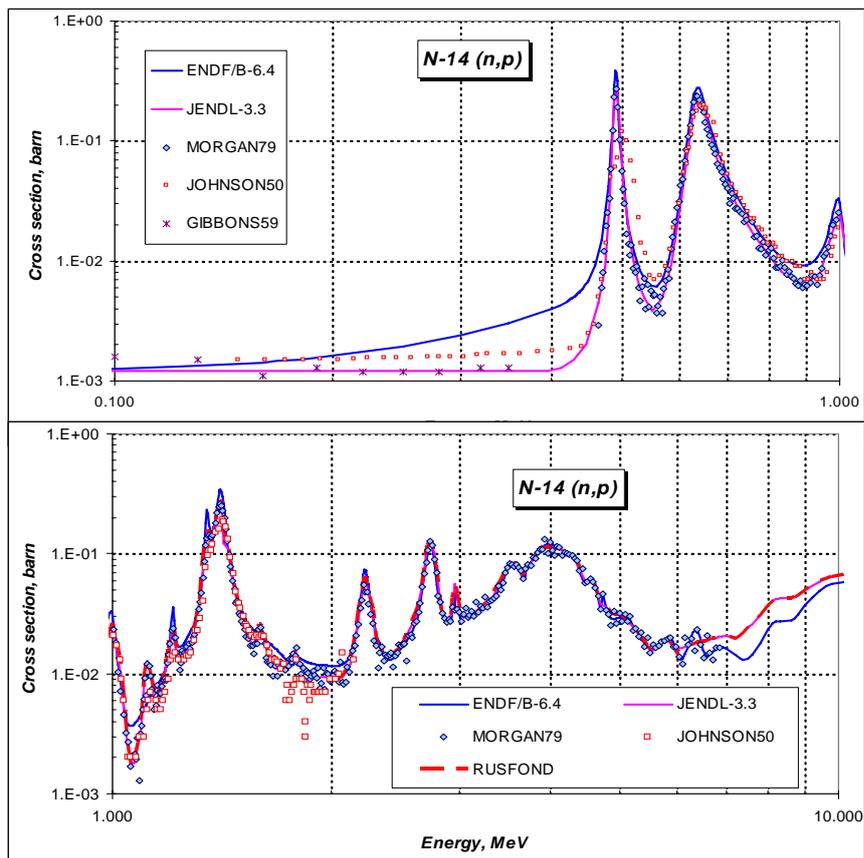


Рисунок 5 – Сечение реакции (n,p) в области энергий до 1 МэВ.

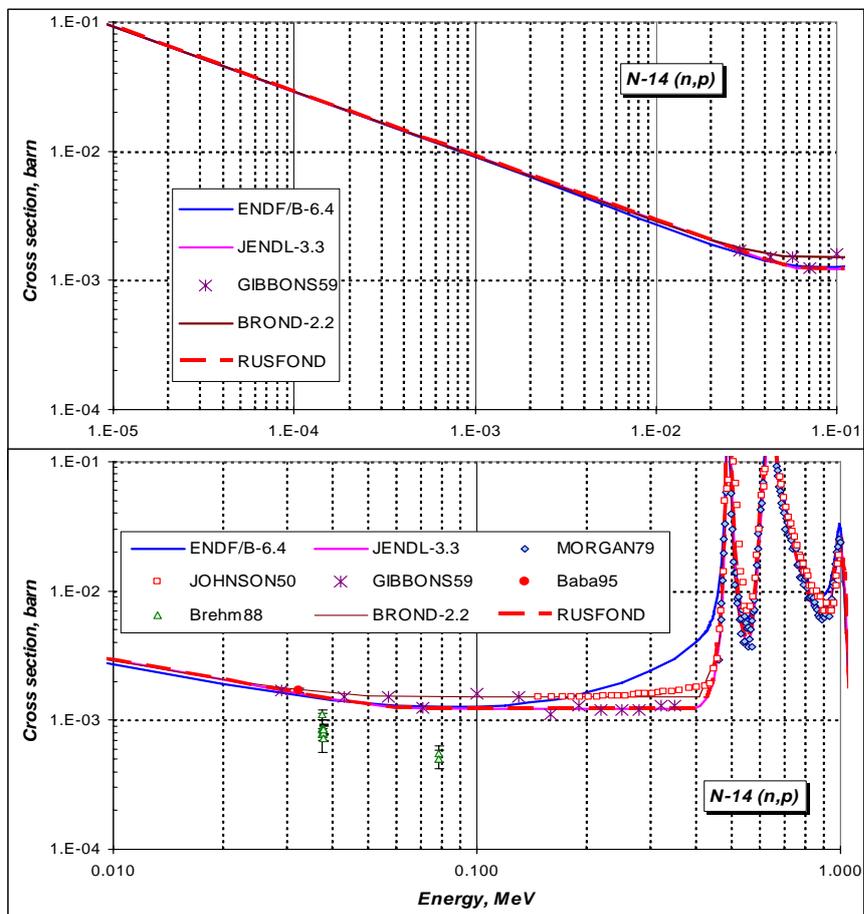


Рисунок 6 – Сечение реакции (n,p) в области энергий до 1 МэВ.

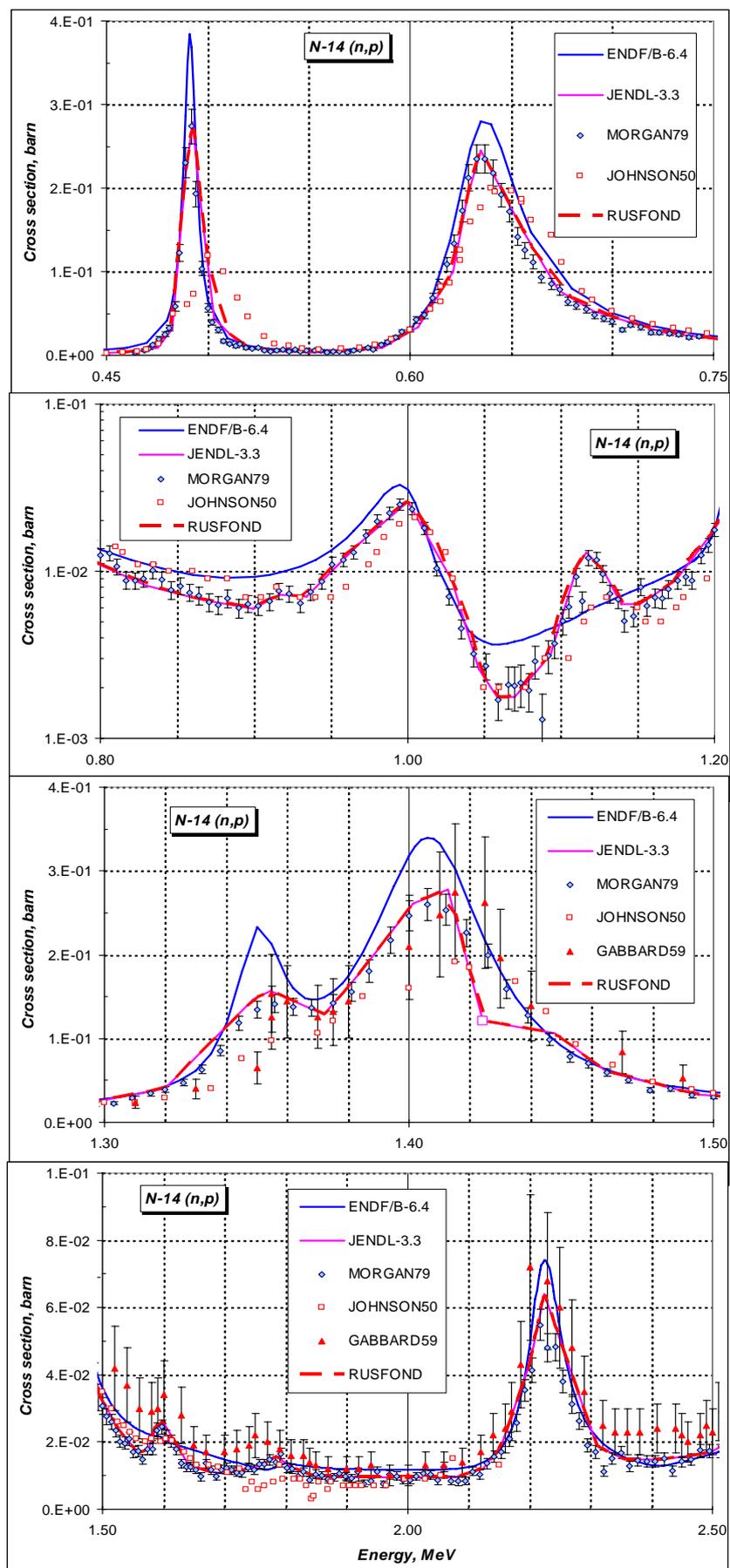


Рисунок 7 – Сечение реакции (n,p) в области энергий 0.45 – 2.5 МэВ.

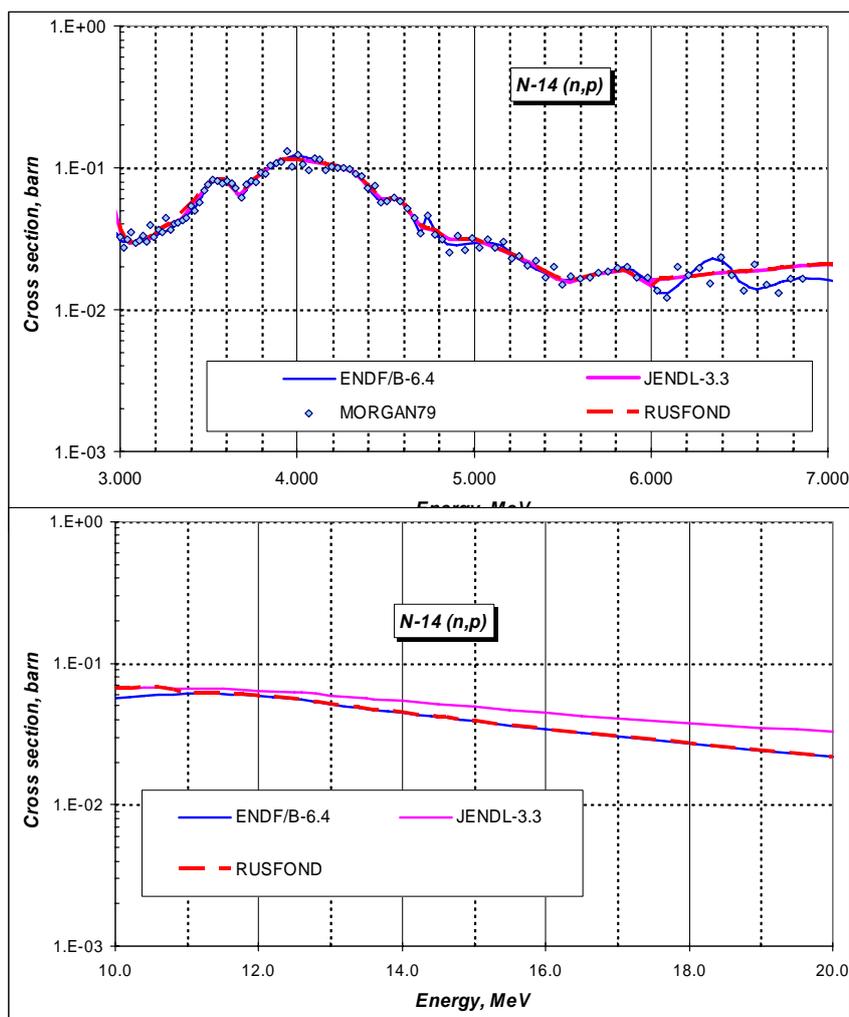


Рисунок 8 – Сечение реакции (n,p) в области энергий выше 3.0 МэВ.

Таким образом, из приведенного сравнения экспериментальных данных и оцененных кривых сечения реакции (n,p) следует, что оценка ENDF/B, в которой наилучшим образом учитывается новейшая экспериментальная информация по полному сечению, не согласуется с экспериментальными данными по сечению реакции (n,p).

**При отборе оценки сечения реакции (n,p) для библиотеки РОСФОНД следует отдать предпочтение JENDL-3.3**

### 3.2.2 Сечение реакции (n,alfa) (MT=107).

Порог реакции (n,a) составляет 0.1694 МэВ. Однако вплоть до 1 МэВ (n,a) процесс задавлен реакцией (n,p). Выше 1 МэВ эти две реакции начинают конкурировать между собой, и выше 2 МэВ вклад реакции (n,a) в поглощение нейтронов начинает превосходить вклад реакции (n,p). Выше 2 МэВ сечение реакции (n,a) в несколько раз больше сечения реакции (n,p).

На рисунке 9 показано сравнение оцененных кривых с имеющимися экспериментальными данными в области энергий до 4.0 МэВ.

Из представленного на рисунке 9 сравнения видно, что оценка JENDL-3.3 опираясь, главным образом, на экспериментальные данные Моргана (1979), слишком круто обозначает порог реакции. На наш взгляд оценка из EAF-99, которая взята за основу для РОСФОНДа в области порога реакции, является компромиссным вариантом поведения сечения в этой области энергии.

Оценка из ENDF/B вплоть до 2.5 МэВ лежит выше совокупности экспериментальных данных. Выше 2.5 МэВ она согласуется с экспериментальными данными в пределах заявленной погрешности. Ее преимущество перед JENDL-3.3 состоит в описании резонансных уровней, которые коррелируют с ходом полного сечения.

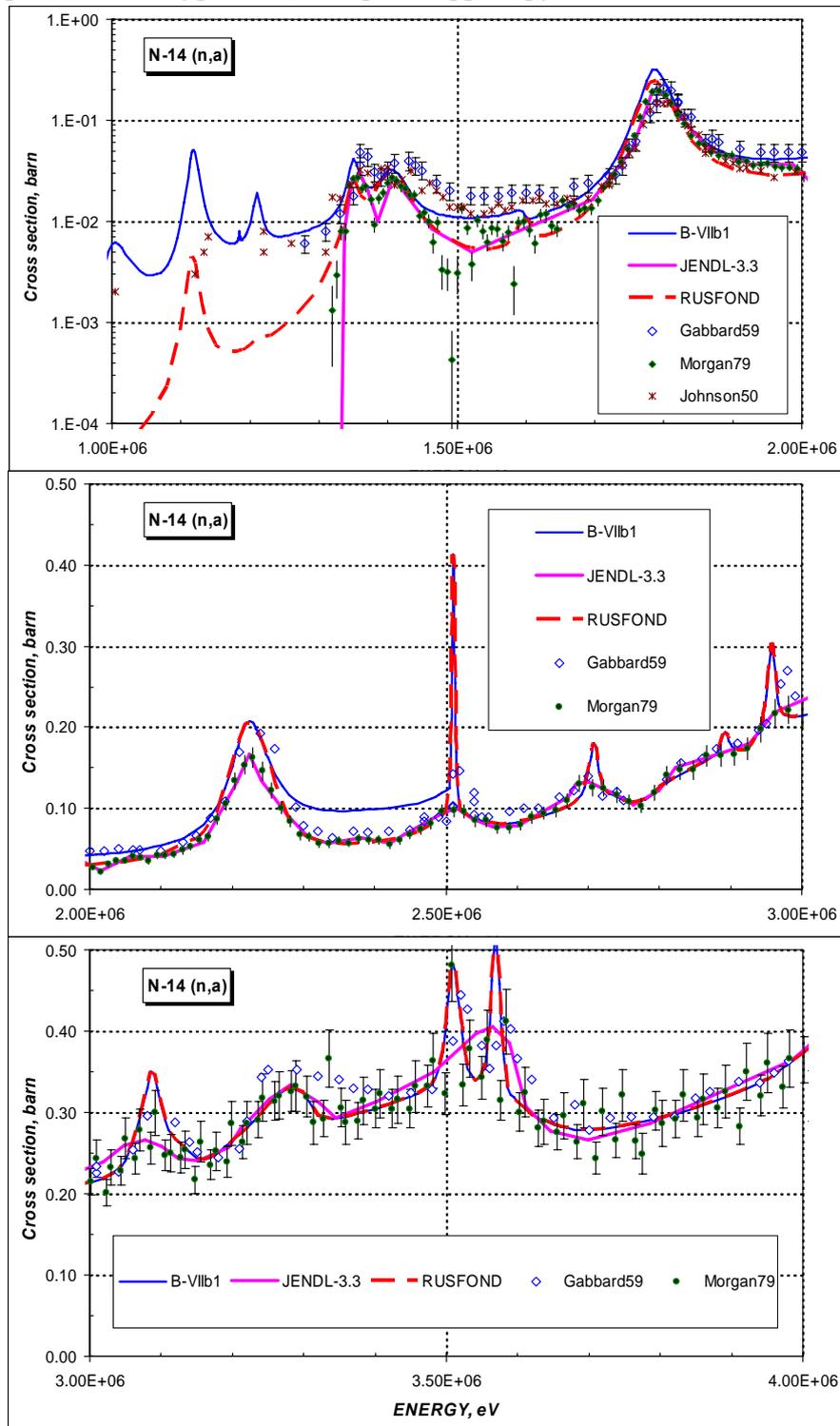


Рисунок 9 – Сечение реакции (n,a) в области энергий до 4.0 МэВ.

Выше энергии 4 МэВ обе оценки согласуются между собой в пределах погрешности экспериментальных данных (см. рисунок 10).

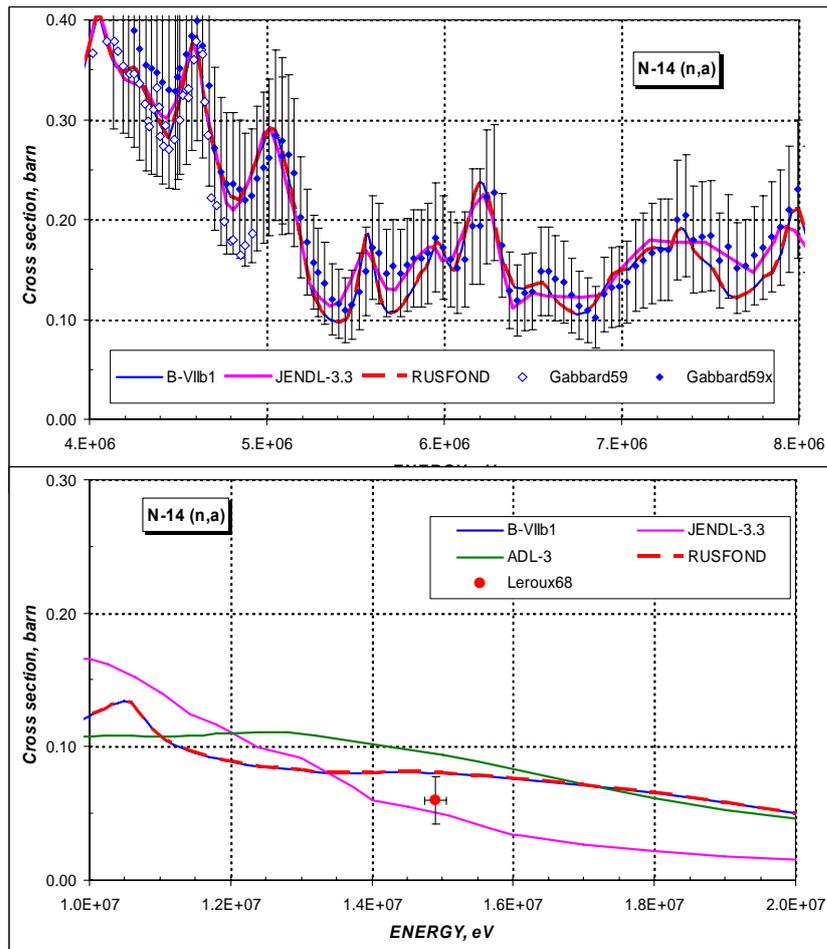


Рисунок 10 – Сечение реакции (n,a) в области энергий выше 4.0 МэВ.

Таким образом, для РОСФОНДА рекомендуется до 2.5 МэВ использовать оцененное сечение реакции (n,a) из EAF-99, а выше 2.5 МэВ принять оценку из ENDF/B.

### 3.2.3 Сечение реакции (n,d) (MT=104).

Экспериментальные данные для сечения реакции (n,d) отсутствуют. Имеется расчетная точка Димбидова для области выше 20 МэВ. Сравнение оцененных сечений показано на рисунке 11.

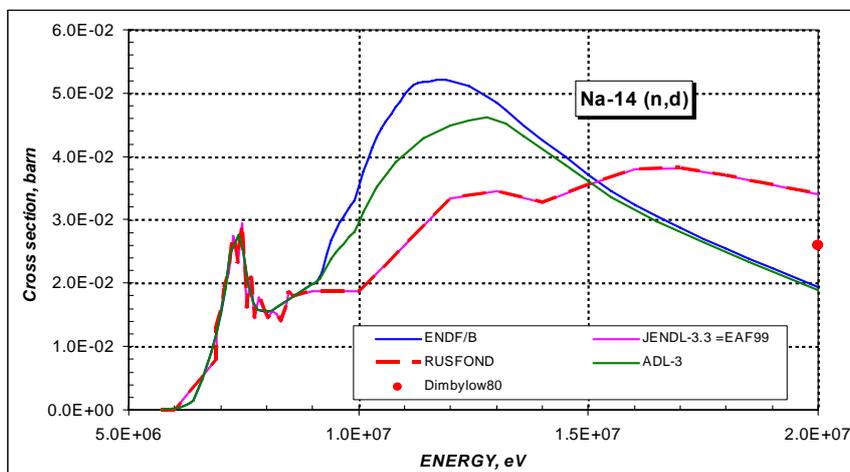


Рисунок 11 – Сечение реакции (n,d) в области энергий до 20.0 МэВ.

Решено принять в РОСФОНД сечение реакции (n,d) из библиотеки JENDL-3.3=EAF-99, хотя это решение является в значительной степени произвольным.

### 3.2.4 Сечение реакции (n,t) (MT=105).

Для сечения реакции (n,t) существует несколько наборов экспериментальных данных. Сравнение с ними показано на рисунке 12.

Из представленного сравнения видно, что в области порога реакции и вплоть до 9 МэВ лучшее согласие с экспериментальными данными имеет оценка из ENDF/B=EAF-99.

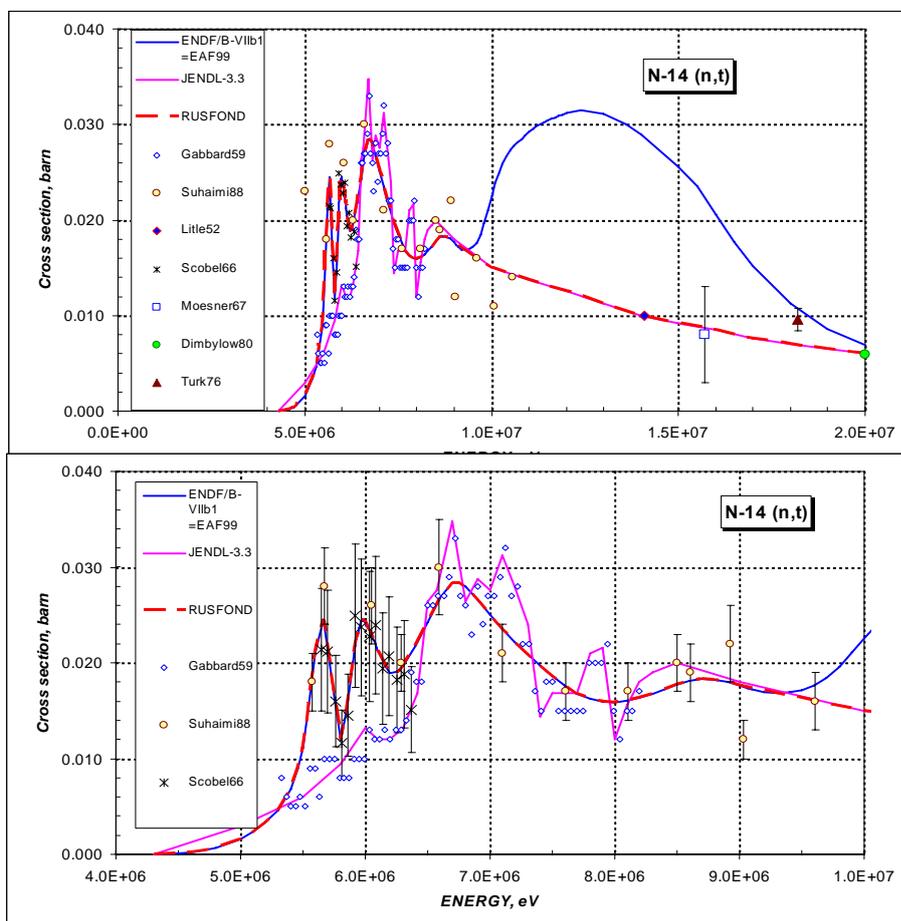


Рисунок 12 – Сечение реакции (n,t) в области энергий до 20.0 МэВ.

Выше 10 МэВ немногочисленные экспериментальные данные подтверждают ход сечения из JENDL-3.3.

В РОСФОНД предлагается включить комбинацию оценок из ENDF/B - до 9 МэВ и из JENDL-3.3 – выше этой энергии (см. рис.12).

### 3.3. Сечение неупругого рассеяния нейтронов (MT=4).

Для полного сечения неупругого рассеяния нейтронов отсутствуют экспериментальные данные, с помощью которых можно было бы оттестировать оцененные сечения из различных библиотек. Однако для первых девяти уровней, возбуждающихся при неупругом рассеянии нейтронов, экспериментальные данные имеются. Результат сравнения экспериментальных данных с оцененными функциями возбуждения первых двенадцати уровней показан на рисунке 13.

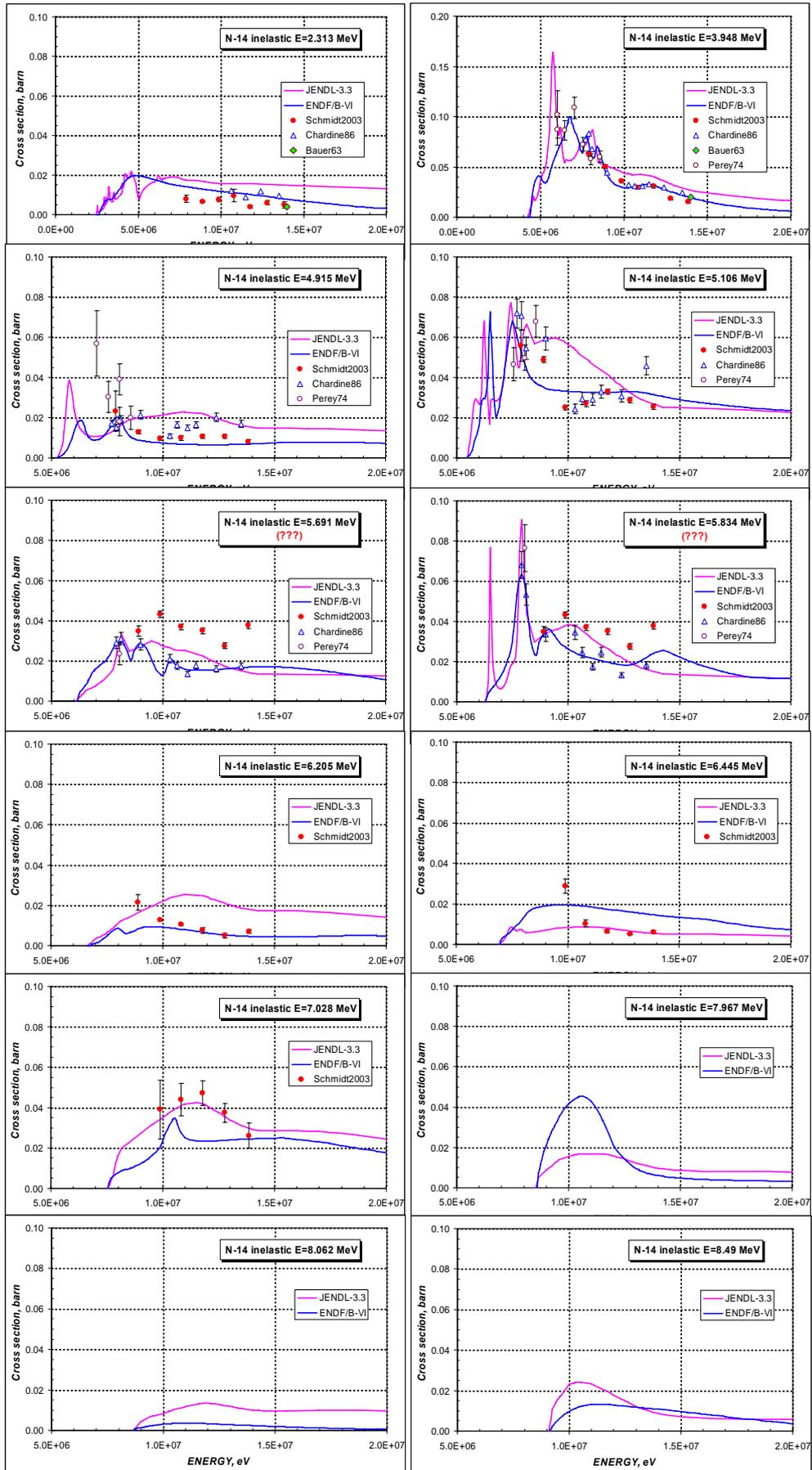


Рисунок 13 – Сечение неупругого рассеяния для первых двенадцати уровней.

Из представленного на рисунке 13 сравнения видно, что имеющиеся экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом, за исключением двух уровней с энергией 5.691 и 5.834 МэВ. Экспериментальные данные Шмидта (2003) вероятно приводятся для суммы этих уровней, как показано на рисунке 14.

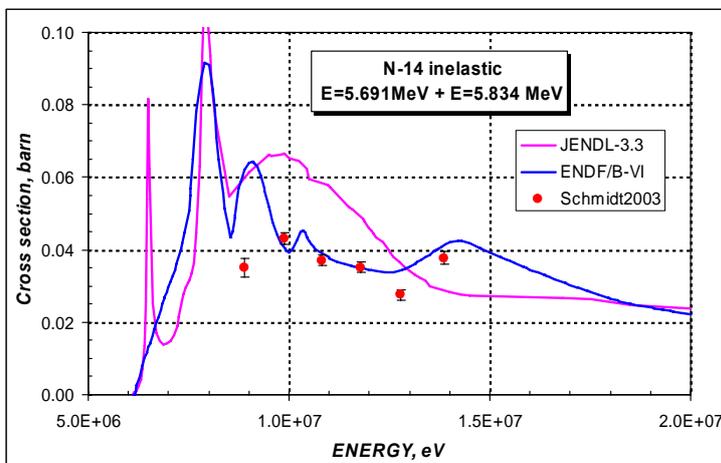


Рисунок 14 – Сечение неупругого рассеяния для уровней 5.691 и 5.834 МэВ.

Из приведенного на рисунках 13 и 14 сравнения, видно, что для первых шести уровней оцененные значения сечения неупругого рассеяния из ENDF/B лучше согласуются с экспериментальными данными, чем оценка из JENDL-3.3. Однако, начиная с седьмого уровня ( $E=6.205$  МэВ), оцененные значения сечений неупругого рассеяния лучше согласуется с новейшими экспериментальными данными Шмидта (2003). Учитывая, также, что в оценке JENDL-3.3 выполнена оценка для большего числа уровней неупругого рассеяния, **рекомендуется для оценки в РОСФОНД использовать оценку первых шести уровней из ENDF/B, а для последующих уровней использовать оценку из JENDL-3.3.** В пользу этого решения послужил и тот факт, что в ENDF/B начиная с 10 уровня (7.967 МэВ) в сечение реакции неупругого рассеяния на возбужденных уровнях добавлены вклады от реакций (n,na) и (n,np).

Результат сравнения суммарного сечения неупругого рассеяния для различных оценок показан на рисунке 15.

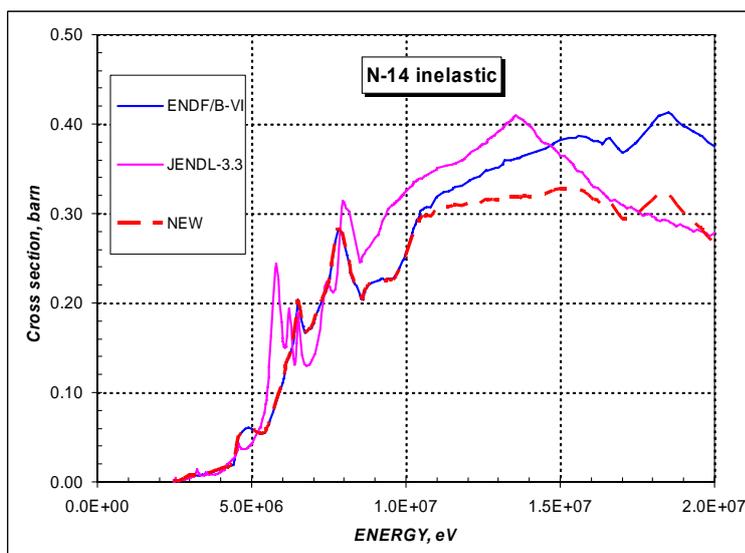


Рисунок 15 – Полное сечение неупругого рассеяния нейтронов.

### 3.4. Сечение неупругого рассеяния нейтронов с вылетом заряженных частиц (n,na), (n,np), и (n,nd).

Для указанных реакций экспериментальные данные отсутствуют. В оценке JENDL-3.3 имеется индивидуальная оценка для указанных реакций. В ENDF/B, как уже отмечено выше, сечения этих реакций замешаны с сечениями возбуждения уровнями неупругого рассеяния нейтронов.

На рисунке 16 показана энергетическая зависимость сечения реакций (n,na), (n,np) и (n,nd).

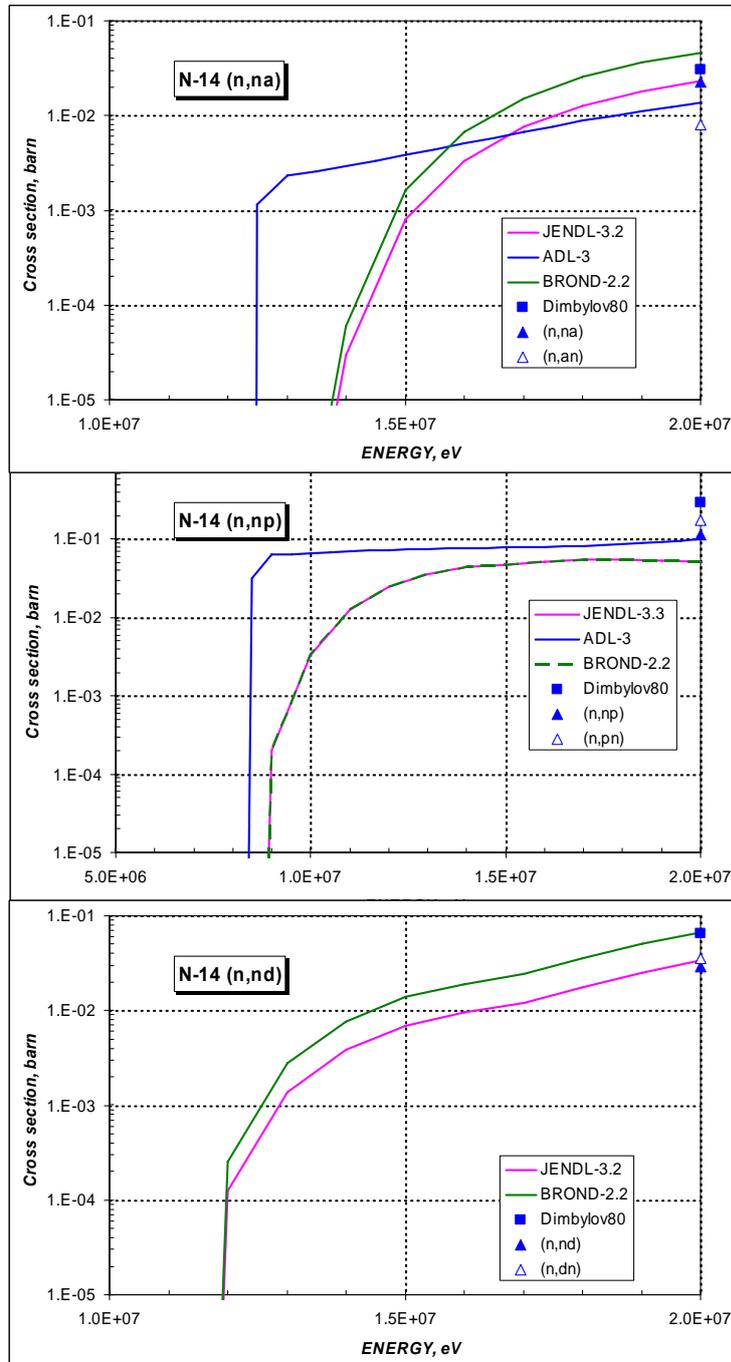


Рисунок 16 – Сечение реакции (n,na), (n,np) и (n,nd).

Сечения сравниваются с оценкой Димбилова (1980) с учетом очередности вылета заряженной частицы. Для **РОСФОНДА** рекомендуется использовать оценку из **JENDL-3.3**.

### 3.5. Сечение реакции (n,2n) (MT=16).

Имеется большое количество экспериментальных данных для указанной реакции. На рисунке 17 представлено сравнение оцененных сечений и наиболее полных наборов экспериментальных данных.

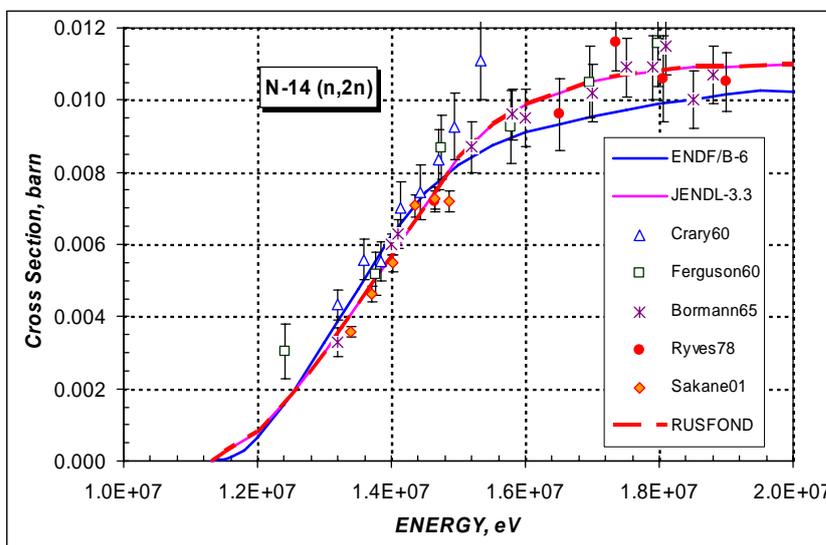


Рисунок 17 – Сечение реакции (n,2n).

Последние экспериментальные данные Сакане (2001) подтверждают форму кривой, принятой в JENDL-3.3. В целом, оценка из JENDL лучше согласуется с совокупностью экспериментальных данных во всем энергетическом диапазоне. Для **РОСФОНДА** рекомендуется использовать оценку из **JENDL-3.3**.

### 3.6. Сечение реакции (n,2alpha) (MT=108).

Сечение реакции (n,2a) имеет высокий порог реакции. Экспериментальных данных немного, точнее, одна работа Шмидта (1967), в которой приводятся результаты измерения сечения в 15 МэВ'ной точке. Сравнение оцененных сечений показано на рисунке 21.

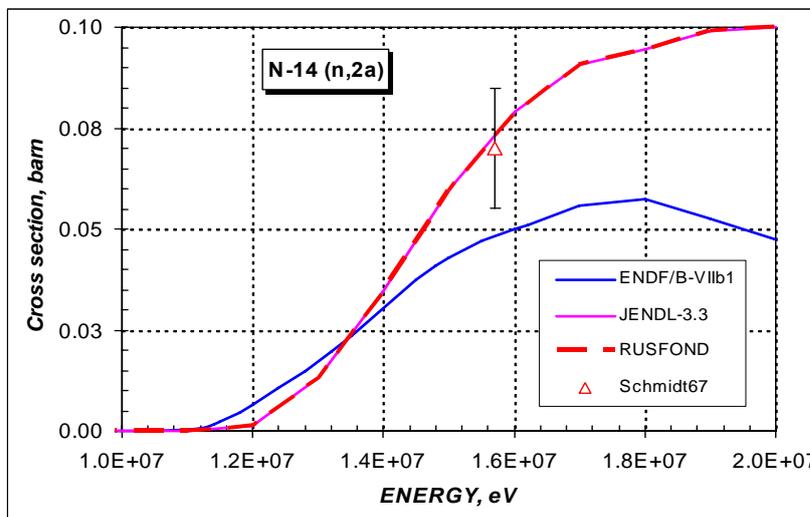


Рисунок 18 – Сечение реакции (n,2a).

Из представленного на рисунке 18 сравнения видно, что эксперимент Шмидта подтверждает оценку JENDL, которая и рекомендуется для РОСФОНДа.

### 3.7. Суммарное сечение неупругих взаимодействий (MT=3).

Сечений для этой реакции получают путем суммирования всех нейтронных сечений, приводящих к неупругому взаимодействию с ядром N-14. Наравне с сечением упругого рассеяния, оно приводится для контроля принятых выше сечений реакций, приводящих к неупругому взаимодействию с ядром N-14.

На рисунке 19 показано сравнение оцененных сечений неупругого взаимодействия в области энергий от 0.1 до 10 МэВ.

Экспериментальных данных немного, все они находятся в области энергий выше 5 МэВ. На рисунке 20 приводится сравнение оцененных сечений с имеющимися наборами экспериментальных данных.

Из представленного на рисунке 20 сравнения видно, что все оцененные сечения одинаковым образом согласуются с экспериментальными данными в пределах заявленных экспериментальных ошибок.

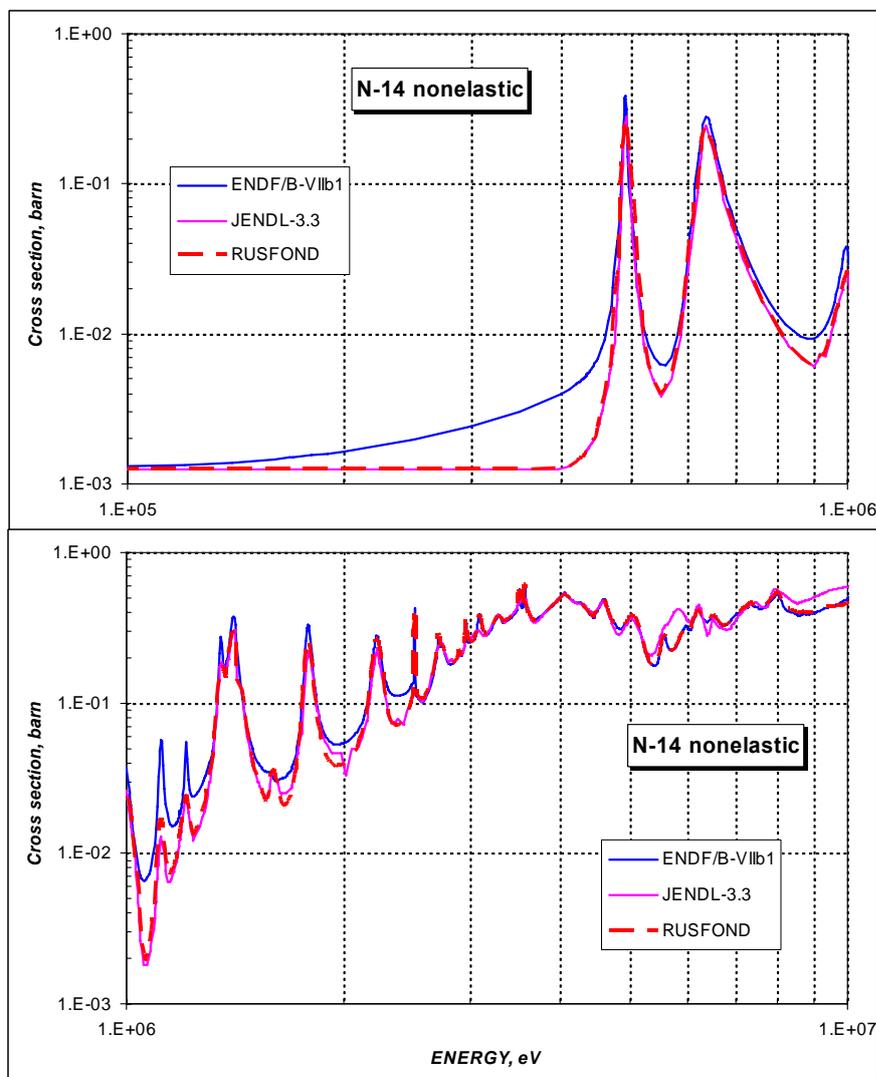


Рисунок 19 – Сравнение сечения реакции неупругих взаимодействий в области энергий 0.5 - 10.0 МэВ.

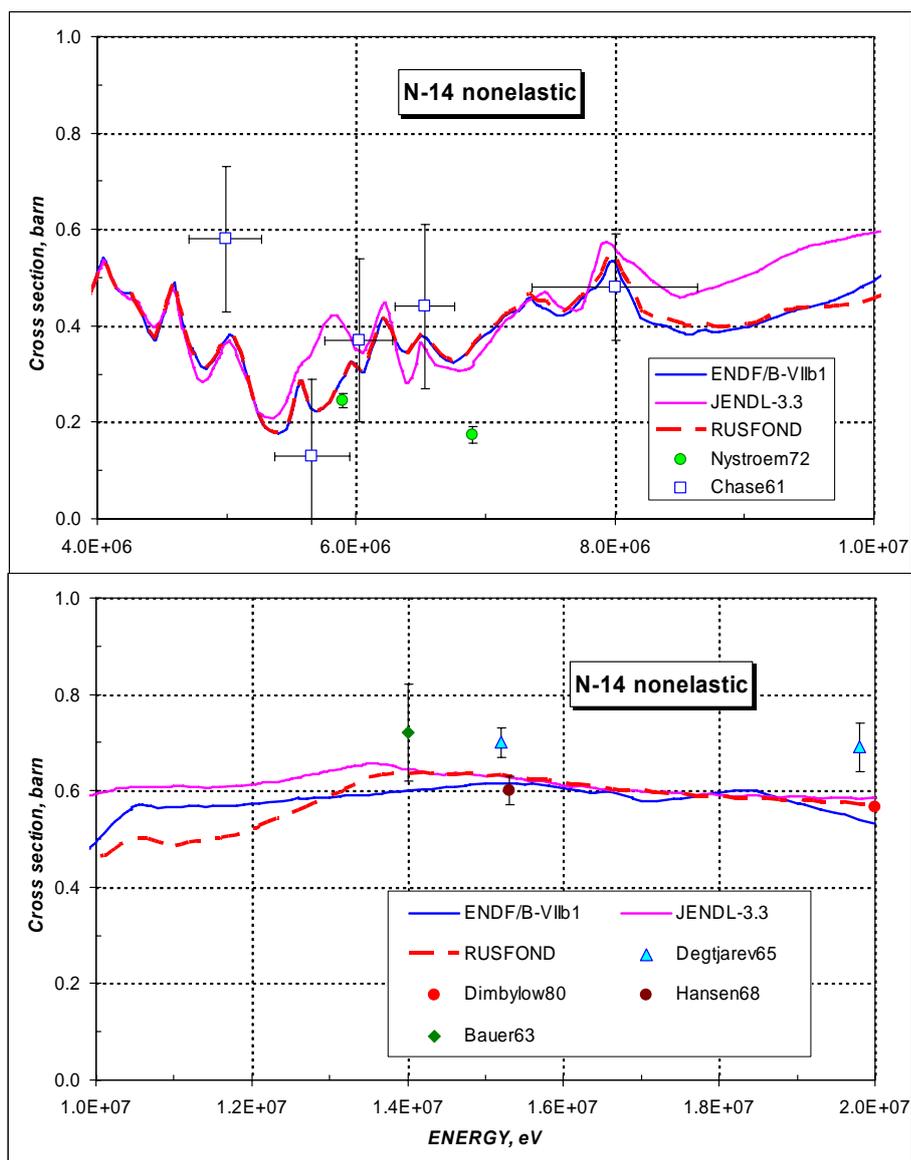


Рисунок 20 – Сравнение сечения реакции неупругих взаимодействий в области энергий выше 5 МэВ.

### 3.8. Сечение упругого рассеяния (MT=2).

Сечений для этой реакции получают из баланса сечений путем вычитания из величины сечения полного взаимодействия значений всех нейтронных сечений, приводящих к неупругому взаимодействию с ядром N-14. Наравне с сечением неупругих взаимодействий, оно приводится для контроля принятых выше сечений реакций с ядром N-14.

Экспериментальных данных по упругому рассеянию мало. На рисунках 21 – 23 показано сравнение оцененных и экспериментальных значений упругого рассеяния.

Из представленного на рисунках 21-23 сравнения видно, что все оцененные сечения одинаковым образом согласуются с экспериментальными данными в пределах заявленных экспериментальных ошибок.

**В РОСФОНД рекомендуется включить сечение из JENDL-3.3. Основание для этого выбора – см. п. 4.1.**

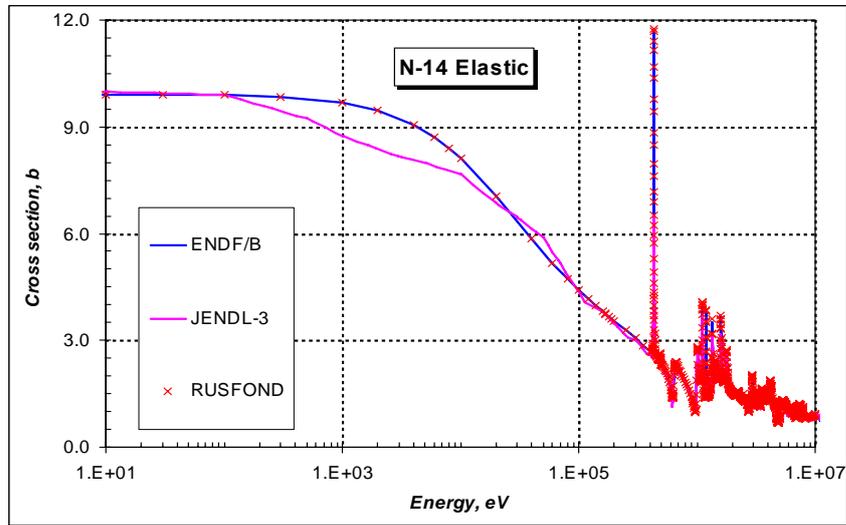


Рисунок 21 – Сечение упругого рассеяния в области 10 эВ – 10 МэВ.

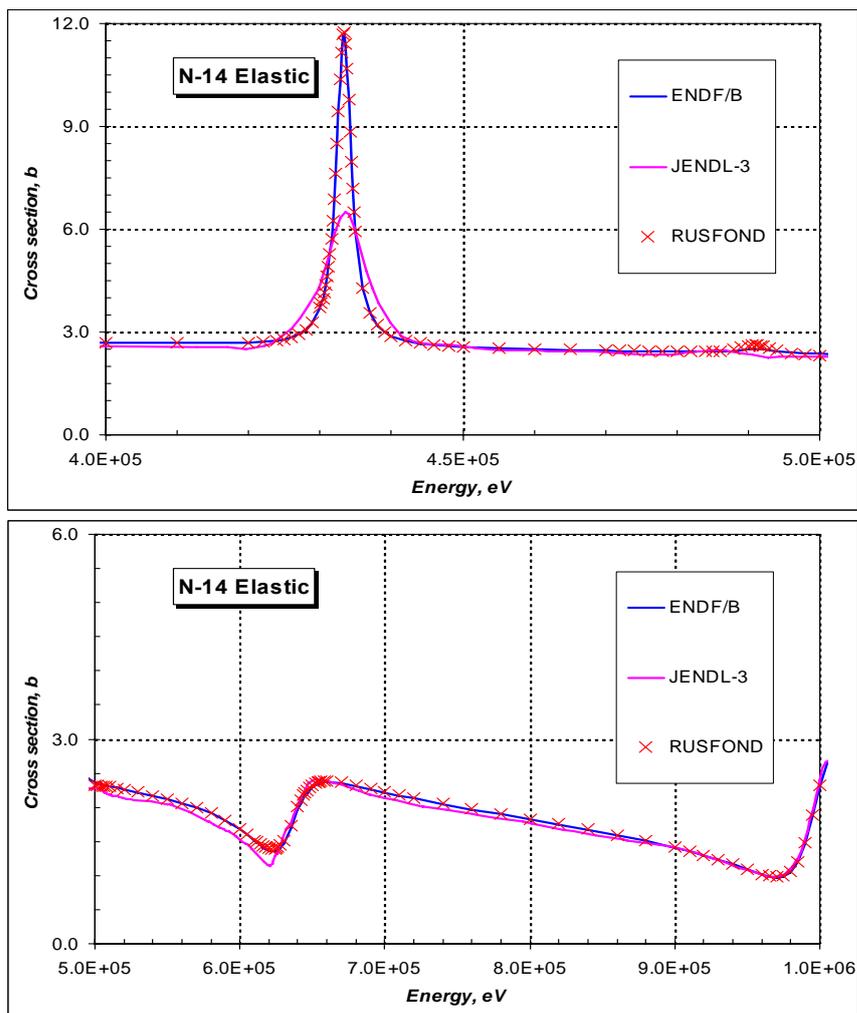


Рисунок 22 – Сечение упругого рассеяния в области 0.4 МэВ – 1.0 МэВ.

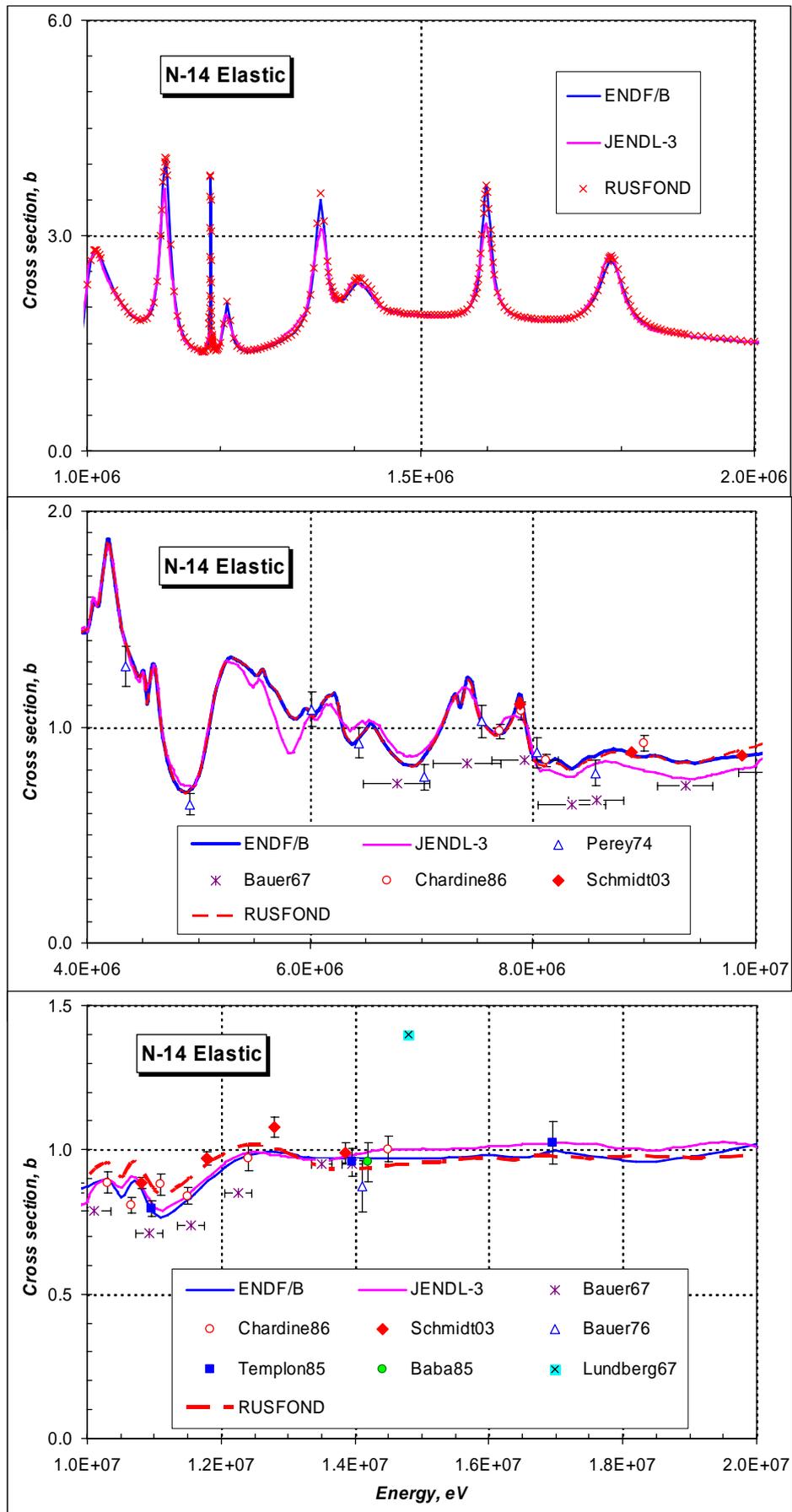


Рисунок 23 – Сечение упругого рассеяния в области 1.0 МэВ – 20.0 МэВ.

## 4. Угловые распределения нейтронов (MF=4)

### 4.1. Угловые распределения нейтронов при упругом рассеянии.

Угловые распределения в обеих оценках заданы с помощью разложения по полиномам Лежандра в системе центра масс.

В оценке ENDF/B угловое распределение задано в 614 точках по энергии. При этом, до 10 эВ распределение изотропно, от 10 эВ до 2.4 МэВ оно задано с помощью 4-х членов разложения, от 2.495 МэВ до 10 МэВ – с помощью 6 членов разложения, выше 10 МэВ угловое распределение задано с помощью 8 членов разложения по полиномам Лежандра.

В оценке JENDL угловое распределение задано в 91 точке по энергии. При этом, до 10 кэВ распределение изотропно, от 10 кэВ до 12 МэВ оно задано с помощью 10 членов разложения а выше 12МэВ угловое распределение задано с помощью 12 членов разложения по полиномам Лежандра.

Ниже на рисунке 24 -25 показано сравнение экспериментальных данных с восстановленными значениями функции углового распределения с помощью программы REBUS при использовании коэффициентов разложения из различных оценок. Сравнение приводится для ряда точек энергетического интервала таким образом, чтобы иметь представление о соответствии экспериментальных данных и восстановленных кривых во всем диапазоне энергий.

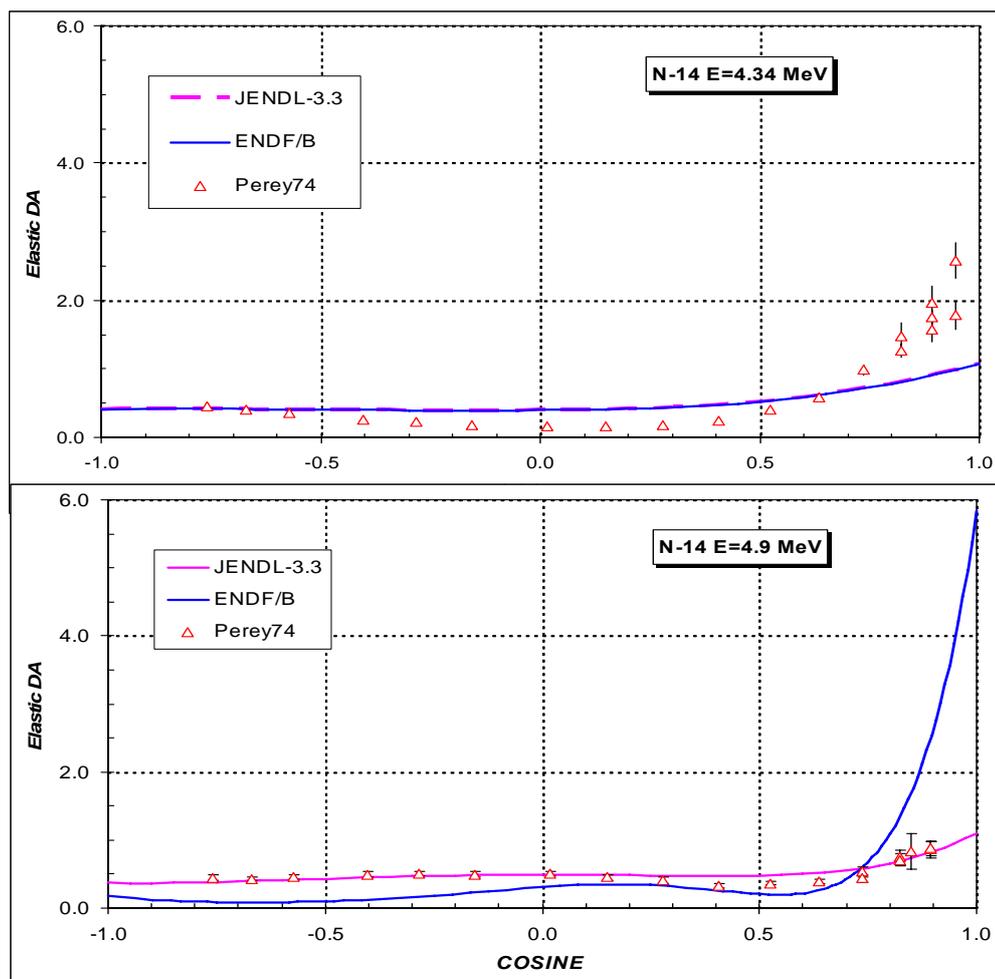


Рисунок 24 – Сравнение угловых распределений нейтронов рассеянных при упругом взаимодействии с N-14 в области энергий 4 - 5 МэВ.

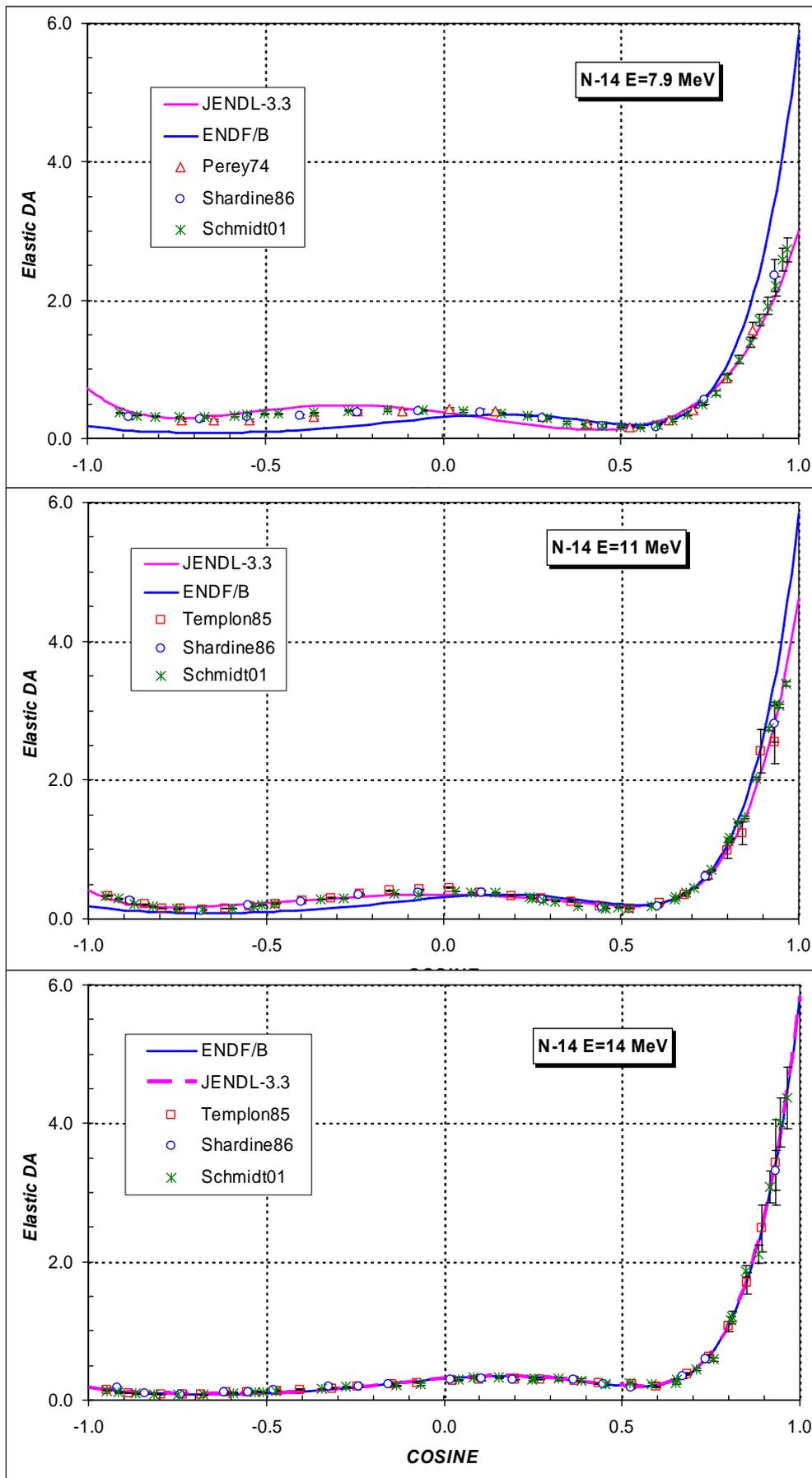


Рисунок 25 – Сравнение угловых распределений нейтронов рассеянных при упругом взаимодействии с N-14 в области энергий 8 - 14 МэВ.

Из приведенного на рисунках 24 - 25 сравнения видно, для лучшего согласия с имеющимися экспериментальными данными для восстановления угловых распределений нейтронов рассеянных при упругом взаимодействии с N-14 следует использовать коэффициенты разложения из оценки JENDL-3.3.

#### 4.2. Угловые распределения нейтронов при неупругом рассеянии.

Сравнение последних экспериментальных данных Шмидта (2003) и оцененных угловых распределений нейтронов при неупругом рассеянии было сделано только для рассеяния на самом сильном уровне с энергией 3.943 МэВ. Сравнение приводится на рисунке 26.

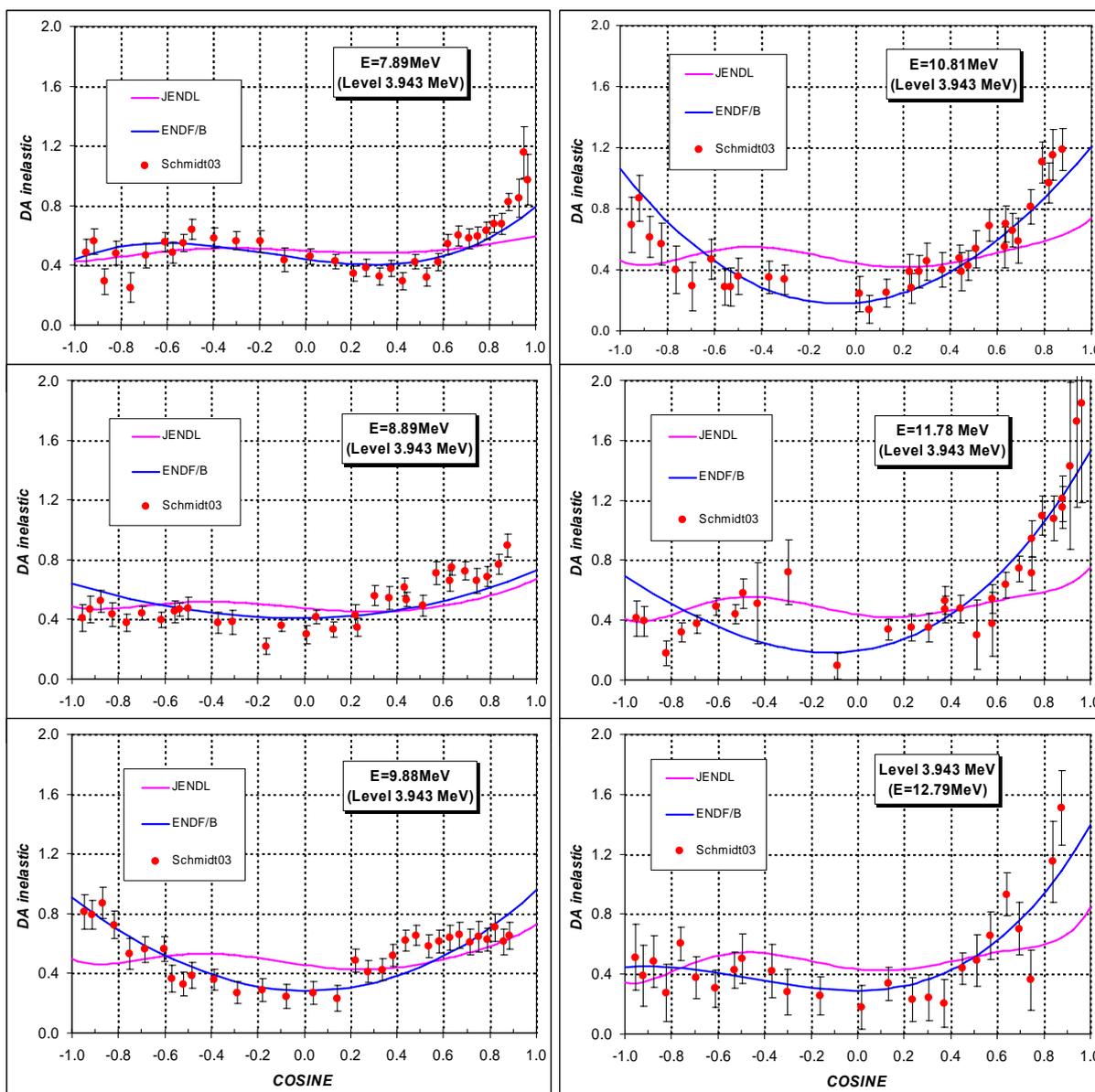


Рисунок 26 – Сравнение угловых распределений нейтронов рассеянных при неупругом взаимодействии с N-14 на уровне 3.943 МэВ.

Из приведенного на рисунке 26 сравнения видно, что, в целом, оценка ENDF/B согласуется с экспериментальными данными Шмидта (2003) лучше, чем оценка JENDL.

Поэтому, учитывая уже выполненную процедуру принятия оценки для *нейтронных сечений* неупругого рассеяния, **рекомендуется в РОСФОНД для угловых распределений нейтронов уровней неупругого рассеяния использовать оценку из ENDF/B.**

## 5. Энергетические распределения нейтронов (MF=5)

**Спектры нейтронов для реакций (n,2n), (n,np), (n,na), (n,nd) для РОСФОНДА рекомендуются использовать из JENDL, поскольку несколько ранее (разделы 3.4, 3.5) и нейтронные сечения для соответствующих реакций были рекомендованы из JENDL.**

## 6. Данные для фотонов (MF=12, 13, 14, 15)

При анализе фотонных данных использовались файлы оцененных нейтронных данных библиотек JENDL-3.3 и ENDF/B-VIIb1. В них представлены две независимые оценки фотонных данных.

В JENDL-3.3 оценка фотонов была взята из JENDL-3.2, в которой K.Shibata в 1994 году откорректировал данные фотонов при радиационном захвате (MT=102). В настоящее время в библиотеке фотоны представлены следующим образом:

MF=12(множественности образования фотонов) содержит MT=102, 103,

MF=13(сечения образования) – MT=3,

MF=14(угловые распределения) – MT=3, 102, 103 – все изотропны,

MF=15(энергетические распределения) – MT=3, 102, 103.

Фотонные данные в файлах MT=12, 13, 15 были получены по программе GNASH (Young P.G. and Arthur E.D.: LA-6947 (1977)).

С первого взгляда в библиотеке ENDF/B-7 фотоны представлены более подробно и представляют собой более позднюю оценку фотонов (2000г):

MF=12 MT=102,

MF=13 MT= 4, 28, 32, 103, 104, 105, 107;

MF=14 MT= 4, 28, 32, 102, 103, 104, 105, 107,

MF=15 MT=102.

Оценки фотонных данных для всех реакций выполнялись на основе многочисленных экспериментальных данных.

Однако следует отметить, что для реакций MT=28 и MT=32 в файле нет нейтронных данных (возникает вопрос баланса). Далее, энергетические распределения фотонов приведены только для радиационного захвата MT=102.

В целом, подход к оценке фотонных данных в ENDF/B выглядит более физичным.

На наш взгляд, в оценке ENDF/B присутствует ошибка следующего характера. Согласно описанию выполненной оценки (MT=451) фотонные данные для реакции (n,na) (MT=22) ошибочно приписаны реакции (n,nd) (MT=32). На этот факт дополнительно указывает информация об оценке нейтронных сечений на отдельных уровнях неупругого рассеяния.

Для сравнения фотонных данных по программе NJOY были получены матрицы выходов вторичных гамма квантом (28\_нейтронных × 15\_фотонных групп). При сравнении полученных данных оказалось, что матрицы фотонов для реакций (n,g) и (n,p) (MT=102, 103) практически совпадают. В полной матрице именно эти реакции определяют фотоны при взаимодействии нейтронов с энергией ниже 1.4 МэВ (с 5 по 28 нейтронную группу). В более высокой области энергии нейтронов, наблюдаемые расхождения по выходам фотонов проявляются из-за вкладов дополнительных реакций в оценке ENDF/B.

**Из выше изложенного, следует, что для РОСФОНД'а предпочтение следует отдать фотонным данным из ENDF/B, при этом откорректировать данные для реакции (n,na) и добавить энергетические распределения для реакции (n,p).**

## **7. Заключение**

### **7.1. Выводы.**

Для библиотеки РОСФОНД файл нейтронных данных для азота-14 рекомендуется сделать комбинированным. Его следует сформировать согласно проведенному анализу всей совокупности экспериментальных и оцененных нейтронных данных и рекомендациям, сделанным по каждому разделу данных.

### **7.2. Автор отбора оцененных данных:**

Кошечев В.Н.

## 7.2. Азот-15

### 1. Общее описание

Малораспространенный изотоп (содержание в естественной смеси (0.366%), выгодно отличающийся от основного изотопа – азота-14 – низким сечением поглощения. В связи с этим этот изотоп рассматривается как перспективный материал для изготовления нитридного топлива.

Имеется три полных файла для азота-15:

- оценка E.Arthur, P.Yound, G.Hale (1983), используемая в ФОНД, В-VII и JEFF-3.1,
- оценка T.Fukahori (1988), включенная в JENDL-3.3.
- и оценка А.Блохина и Н.Работнова и др. – БРОНД-2.2 (1989).

#### 1.1. $Z=7$

#### 1.2. $A=15.000\ 108\ 898\ 2(8)$

#### 1.3. $A_{wr}=14.871\ 250\ 764\ 0(8)$

#### 1.4. Содержание в естественной смеси: - 0.366 %

#### 1.5. Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}$ , МэВ	Ядро-продукт <sup>*)</sup>
4	(n,n')	<b>-5.2702</b>	<b>5.6246</b>	N-15
16	(n,2n)	<b>-10.8337</b>	<b>11.5622</b>	N-14
22	(n,na)	<b>-10.9911</b>	<b>11.7302</b>	B-11
28	(n,np)	<b>-10.2074</b>	<b>10.8938</b>	C-14(5730 y)
32	(n,nd)	<b>-16.1598</b>	<b>17.2464</b>	C-13
33	(n,nt)	<b>-14.8486</b>	<b>15.8471</b>	C-12
102	(n, $\gamma$ )	<b>2.4920</b>	<b>0.0</b>	N-16(7.13 s)
103	(n,p)	<b>-8.9892</b>	<b>9.5937</b>	C-15(2.45 s)
104	(n,d)	<b>-7.9827</b>	<b>8.5196</b>	C-14(5730 y)
105	(n,t)	<b>-9.9022</b>	<b>10.5680</b>	C-13
107	(n,a)	<b>-7.6218</b>	<b>8.1344</b>	B-11

#### 1.6. Схема уровней:

MT	LEVEL	ENERGY (MEV)	SPIN-PARITY
		<b>0.0</b>	<b>1.2-</b>
51	5.2702		5/2+
52	5.2988		1/2+
53	6.3239		3/2-
54	7.1551		5/2+
55	7.3008		3/2+
56	7.5671		7/2+
57	8.3126		1/2+
58	8.5714		3/2+
59	9.0497		1/2+
60	9.1519		3/2-
61	9.1549		5/2+
62	9.2221		1/2-
63	9.7600		5/2-
64	9.8290		7/2-

65	9.9250	3/2-
66	10.0660	3/2+
91 (cont)	10.4497	

1.7. Радиоактивность: не радиоактивен

## 2. Резонансная область: (MF=2)

2.1. Спин и четность  $J^\pi = 1^+$ ;

2.2. Радиус рассеяния:  $R=0.886366^{-12}$  см.

2.3. Область резонансных энергий. – области резонансных энергий нет.

## 3. Сечения нейтронных реакций (MF=3)

Основные нейтронные реакции для N-15 в области энергий до 10 МэВ показаны на рисунке 27.

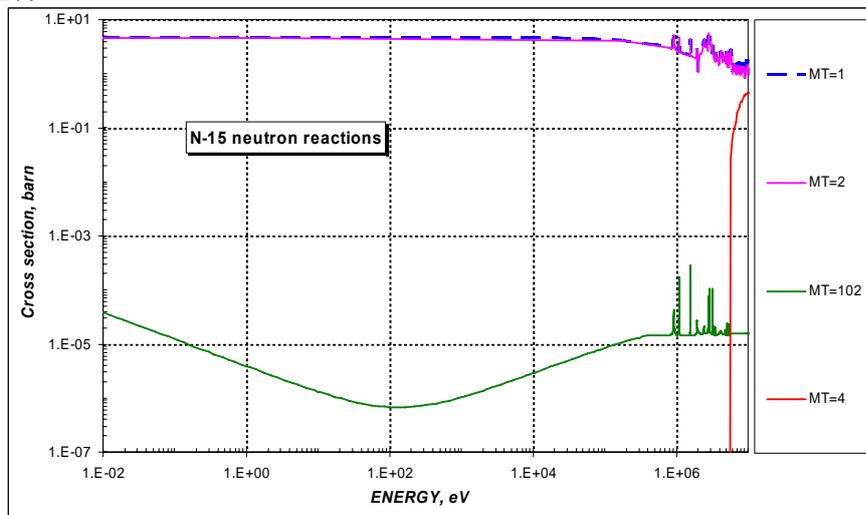


Рисунок 27 – основные нейтронные реакции на N-15.

Из приведенной на рисунке 27 информации видно, что в области энергий до 5 МэВ основным сечением является сечение упругого рассеяния. Сечение радиационного захвата по величине на несколько порядков меньше.

Энергетические зависимости пороговых реакций, которые возможны на N-15, показаны на рисунке 28. Откуда видно, что до 10 МэВ основной вклад в полное сечение из них дает неупругое рассеяние нейтронов.

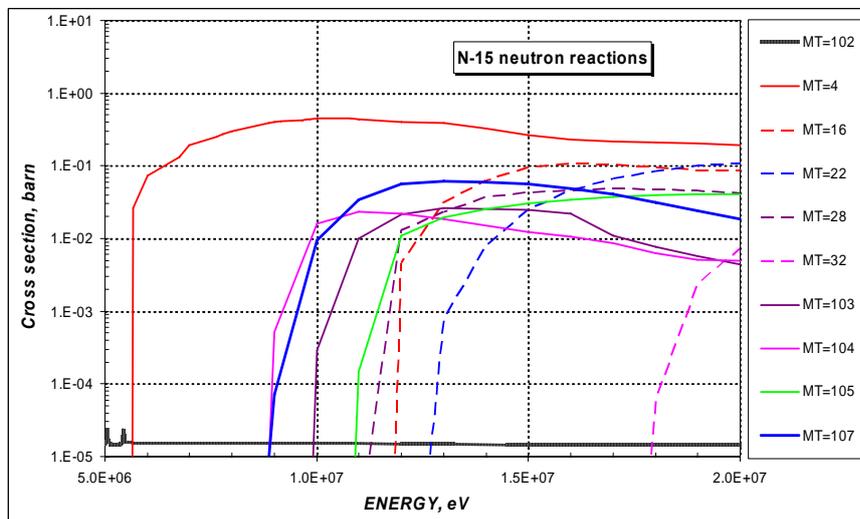


Рисунок 28 – основные нейтронные реакции на N-15.

### 3.1. Полное сечение (MT=1).

На рисунке 29 представлено сравнение оцененных нейтронных данных из перечисленных трех библиотек в области энергий от 10 эВ -1 МэВ, из которого видно, что оценки по-разному согласуются с рекомендованным значением Мухабхаба.

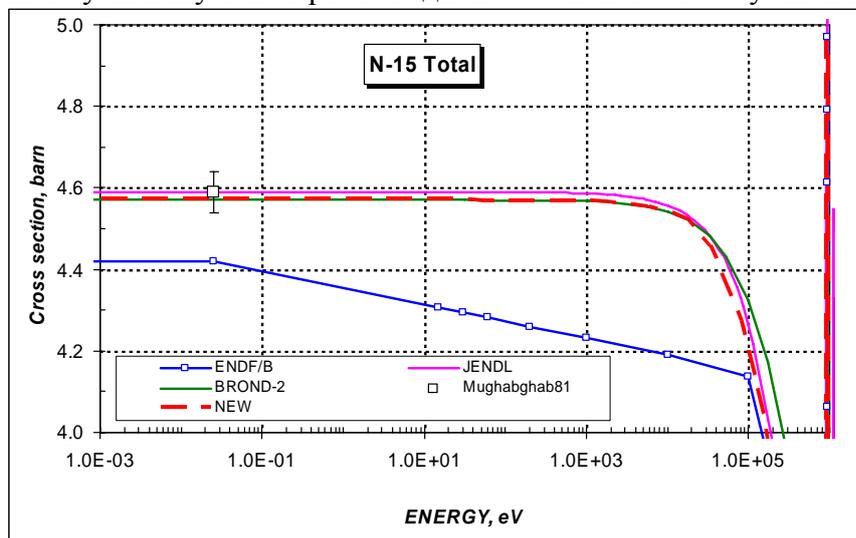


Рисунок 29 – Сравнение полных сечений N-15 в области энергий до 1 МэВ.

Из приведенного сравнения видно, что оценка ENDF/B не согласуется с рекомендованным значением полного сечения, а в области энергий от 0.0253 эВ до 100 кэВ скорее всего ошибочна из за некорректной интерполяции сечения на одном из рабочих этапов. На рисунке 30 показано сравнение расчетных сечений с экспериментальными данными в области энергий первого резонанса (0.85-1.0 МэВ).

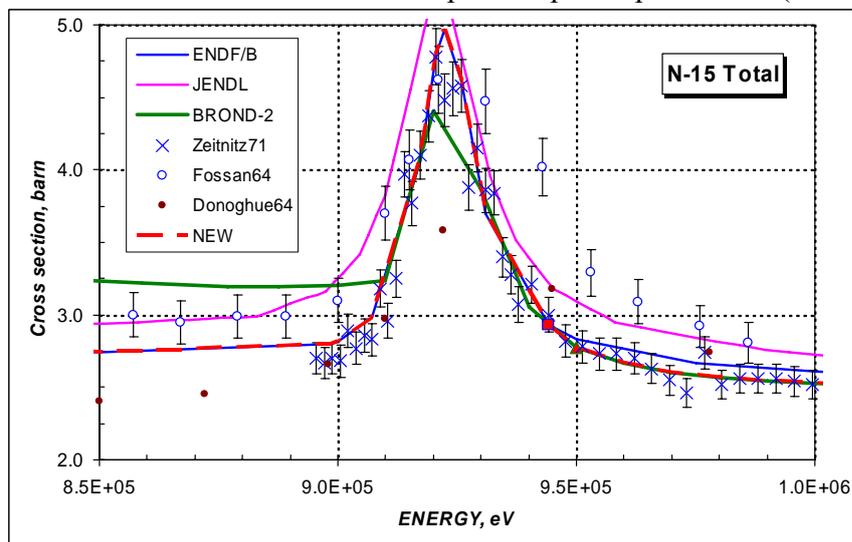


Рисунок 30 – Сравнение полного сечения N-15 в области энергий 0.850-1.0 МэВ.

Из приведенного сравнения видно, что оценка ENDF/B наилучшим образом описывает довольно подробный эксперимент Зейтнитца (1971), в то время, как другие оценки с эти экспериментом не согласуются.

На рисунке 31 показано сравнение оцененных и экспериментальных данных в области энергий от 1 – 20 МэВ.

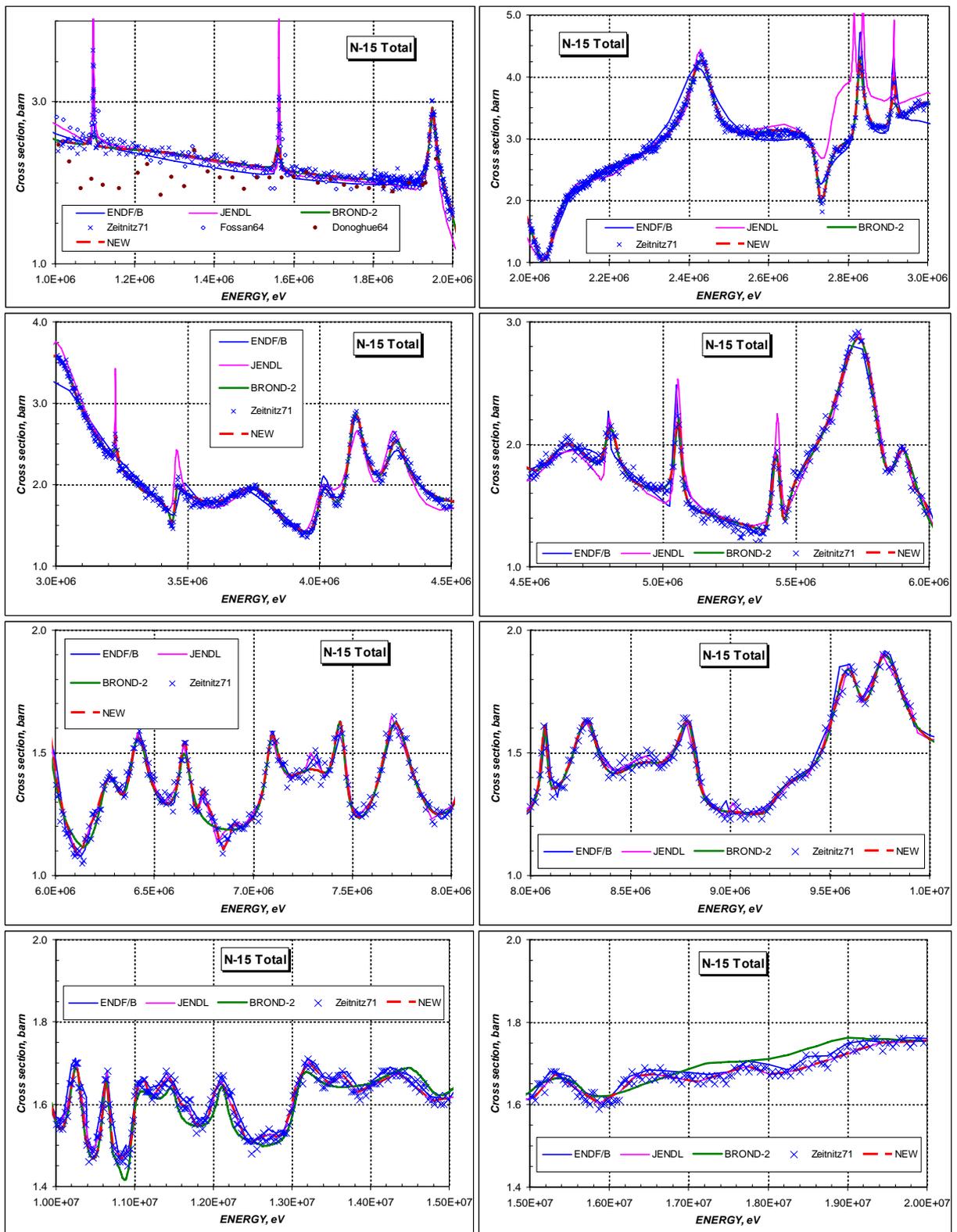


Рисунок 31 - сравнение оцененных и экспериментальных данных для полного сечения N-15 в области энергий от 1 – 20 МэВ

Из приведенного на рисунке 31 сравнения видно, что, в целом, все оценки в пределах экспериментальной точности согласуются между собой. Но в области энергий до 10 МэВ оценки БРОНД и ENDF/B лучше согласуются с экспериментом. А в области энергий выше 10 МэВ с экспериментом лучше согласуются оценки ENDF/B и JENDL.

## Вывод

Для библиотеки РОСФОНД следует модифицировать оценку БРОНД на основе оценок ENDF/B и JENDL в тех областях энергий, где последние оценки лучше описывают эксперимент Зейтнитца (1971). На рисунках модифицированная кривая обозначена как оценка NEW.

### 3.2. Сечение радиационного захвата (MT=102).

Общее представление о поведении оцененных сечений радиационного захвата можно получить из рисунка 32 (при отсутствии экспериментальных данных).

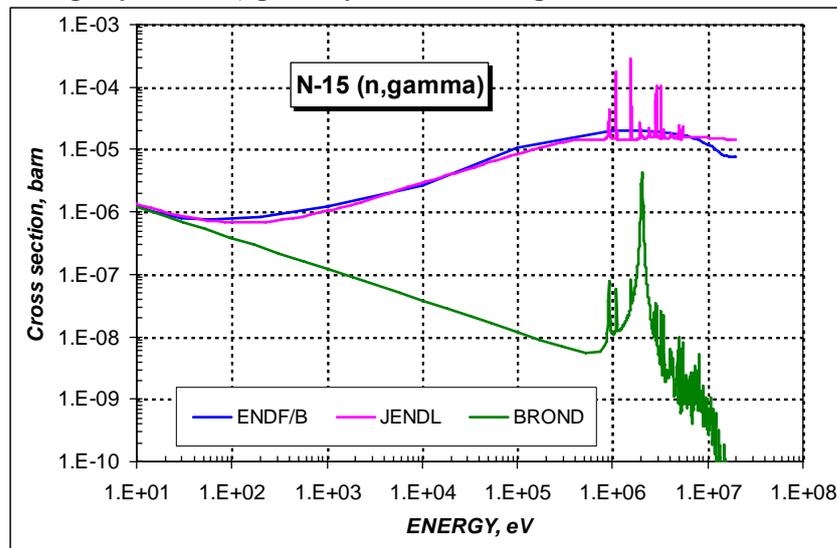


Рисунок 32 – Оцененные сечение радиационного захвата для N-15.

Различный характер поведения оцененных кривых объясняется тем, что в оценках ENDF и JENDL учитывается прямой p-wave захват. В JENDL его вклад оценивался по формуле Мейсснера и др. А в ENDF/B его вклад рассчитывался по статистической модели с использованием аппроксимации Акселя для коэффициентов прохождения гамма квантов гигантского дипольного резонанса. В оценке БРОНД сечение получено с использованием обычного формализма многоуровневого Брейта-Вигнера. Поскольку прямой захват, повидимому, присутствует в природе, то оценка JENDL является более привлекательной при наличии корреляций между полным сечением и сечением захвата.

На рисунке 33 показано сравнение резонансной структуры упомянутых двух сечений, приведенных к виду удобному для сравнения.

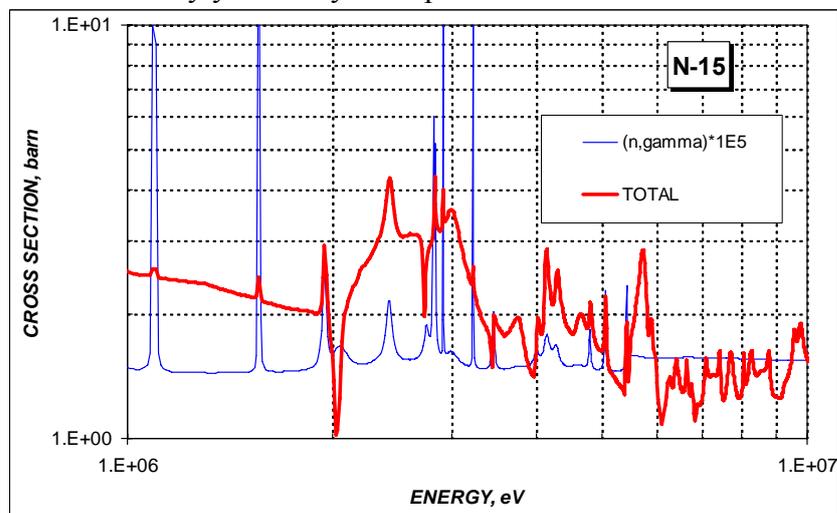


Рисунок 33 – Сравнение резонансной структуры сечений радиационного захвата и полного взаимодействия для N-15.

## Вывод

Для библиотеки РОСФОНД следует использовать оцененную кривую сечения радиационного захвата на основе JENDL.

### 3.3. Сечение неупругого рассеяния нейтронов (MT=4).

На рисунке 34 приведено сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния нейтронов на N-15 (экспериментальные данные отсутствуют).

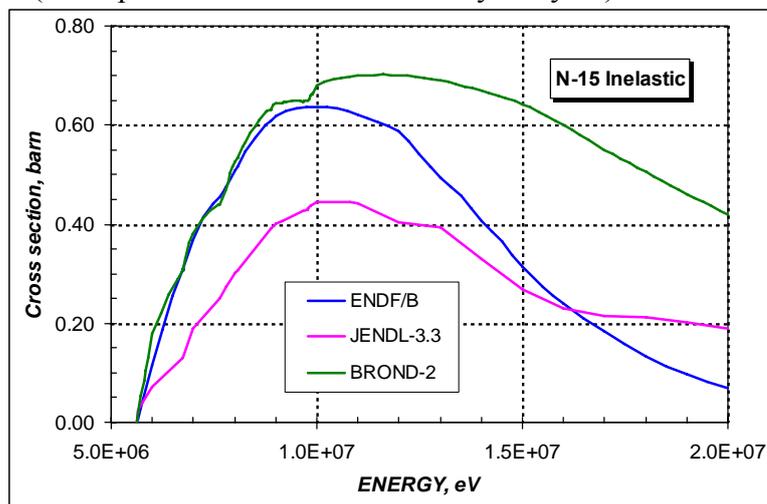


Рисунок 34 – Сечение неупругого рассеяния нейтронов на N-15.

Из приведенного на рисунке 34 сравнения видно, что оценки БРОНД и ENDF/B согласуются между собой в области энергий до 10 МэВ. Более резкий спад оценки ENDF/B вероятно вызван конкуренцией сечений пороговых реакций, имеющих более высокие значения сечений. В следующих разделах сравнения на это следует уделить внимание. Оценка JENDL, по-видимому, является чересчур заниженной.

### 3.4. Сечение реакций с вылетом протона (MT=103 и MT=28).

На рисунке 35 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,p) с экспериментальными данными.

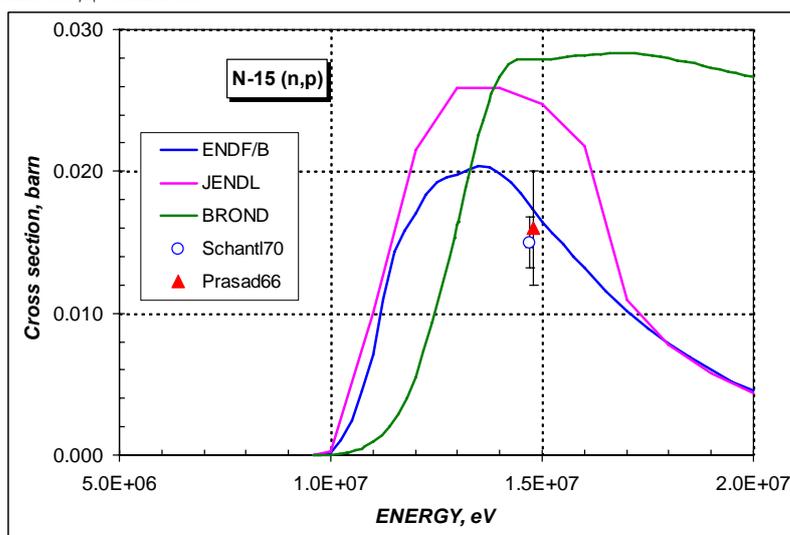


Рисунок 35 – Сечение реакции (n,p) на N-15.

Из приведенного на рисунке 35 сравнения видно, что оценка ENDF/B единственным образом согласуется с экспериментом.

На рисунке 36 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,np).

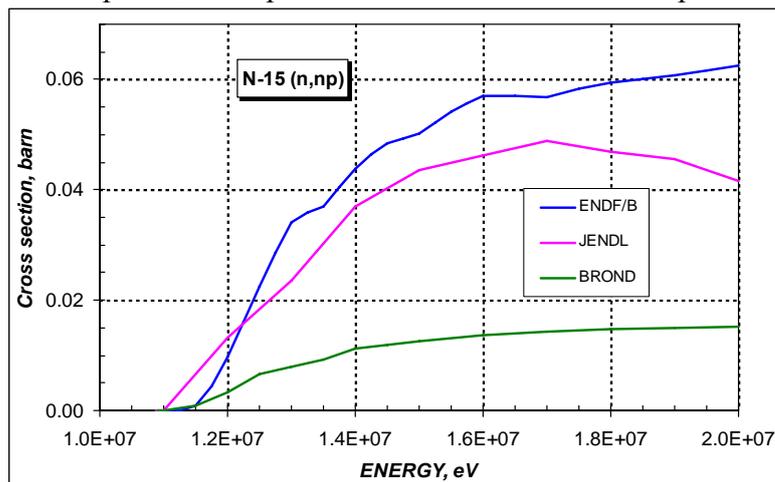


Рисунок 36 – Сечение реакции (n,np) на N-15.

Из приведенного на рисунке 36 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

### 3.5. Сечение реакций с вылетом дейтона (MT=104 и MT=32).

На рисунке 37 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,d) и (n,nd).

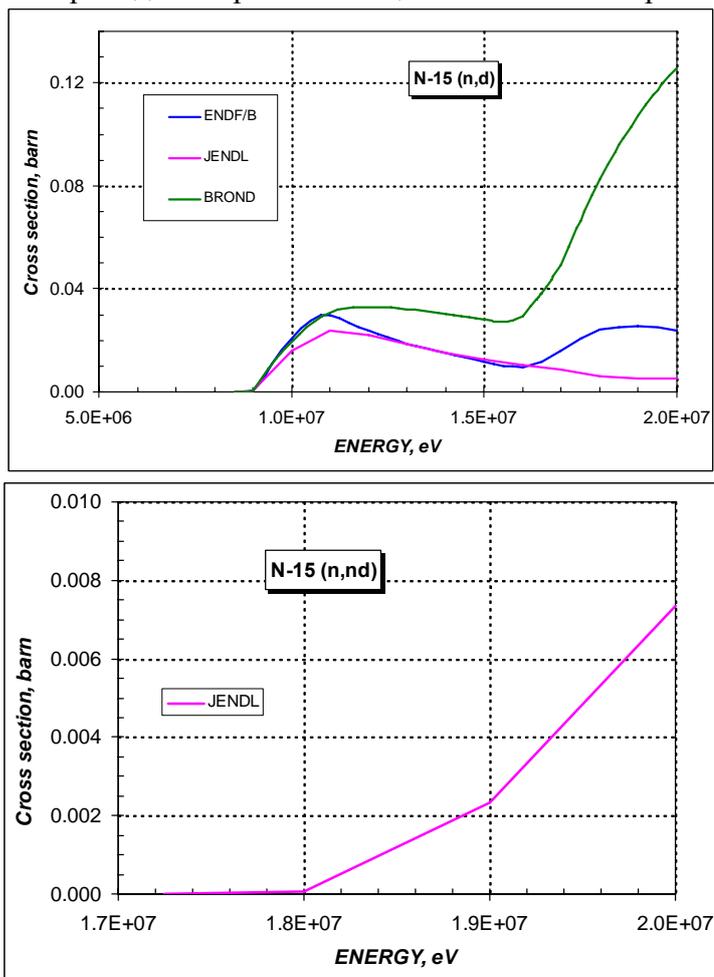


Рисунок 37 – Сечение реакции (n,d) и (n,nd) на N-15.

Из приведенного на рисунке 37 сравнения, видно, что оценки ENDF/B и JENDL согласуются между собой, в то время, как оценка БРОНД имеет другую форму кривой.

Из приведенного на рисунке 37 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

### 3.6. Сечение реакций с вылетом альфа частицы (MT=107 и MT=22).

На рисунке 38 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,a) и (n,na).

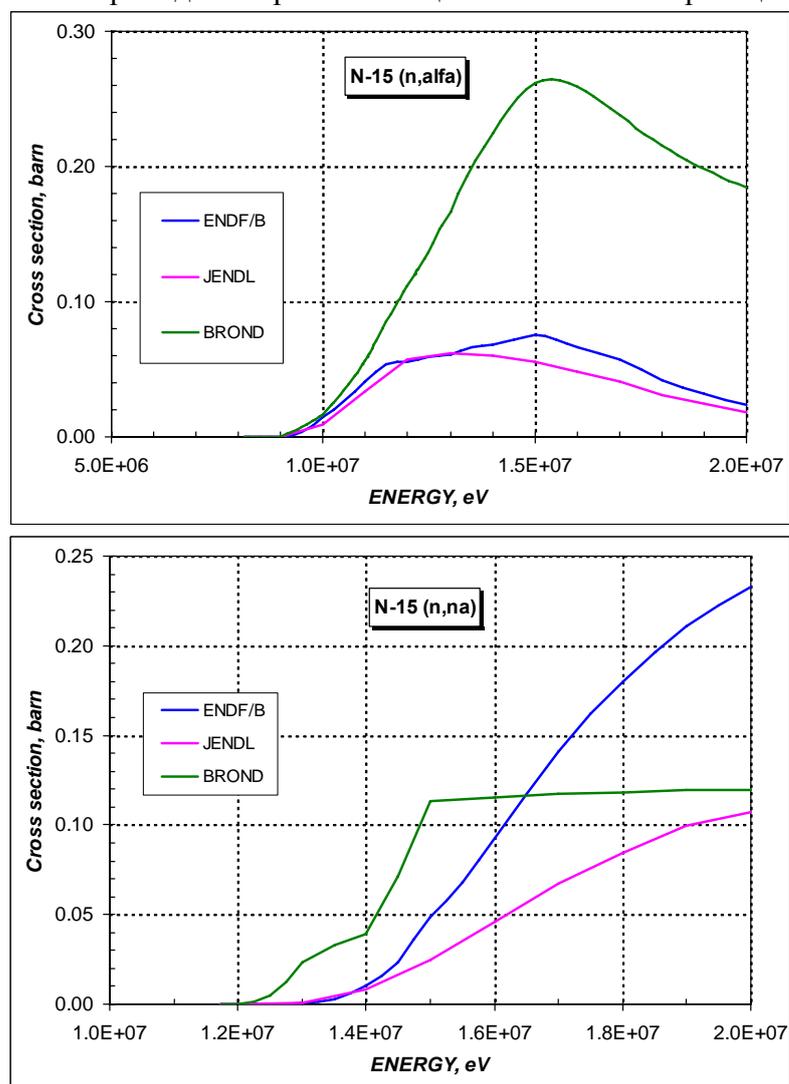


Рисунок 38 – Сечение реакции (n,a) и (n,na) на N-15.

Из приведенного на рисунке 38 сравнения, видно, что оценки ENDF/B и JENDL согласуются между собой, в то время, как оценка БРОНД имеет другую форму кривой.

Из приведенного на рисунке 38 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

### 3.7. Сечение реакций с вылетом нейтрона (MT=16).

На рисунке 39 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,2n).

Из приведенного на рисунке 39 сравнения, видно насколько оценки ENDF/B, JENDL и БРОНД согласуются между собой. Отметим, что оценка ENDF/B имеет максимальные значения сечения.

Из приведенного на рисунке 39 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

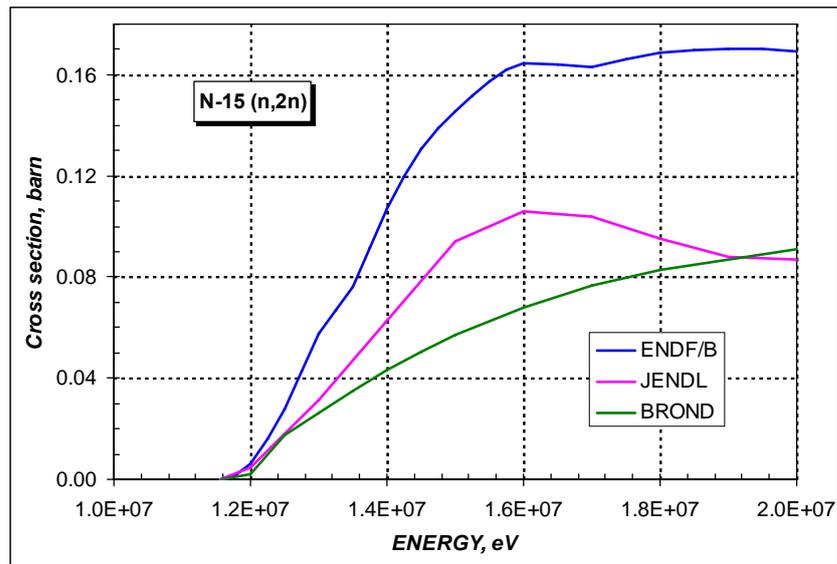


Рисунок 39 – Сечение реакции (n,2n) на N-15.

### 3.7. Сечение реакций с вылетом трития (MT=105 и MT=33).

На рисунке 40 приводится сравнение оцененных сечений реакции (n,a) и (n,na).

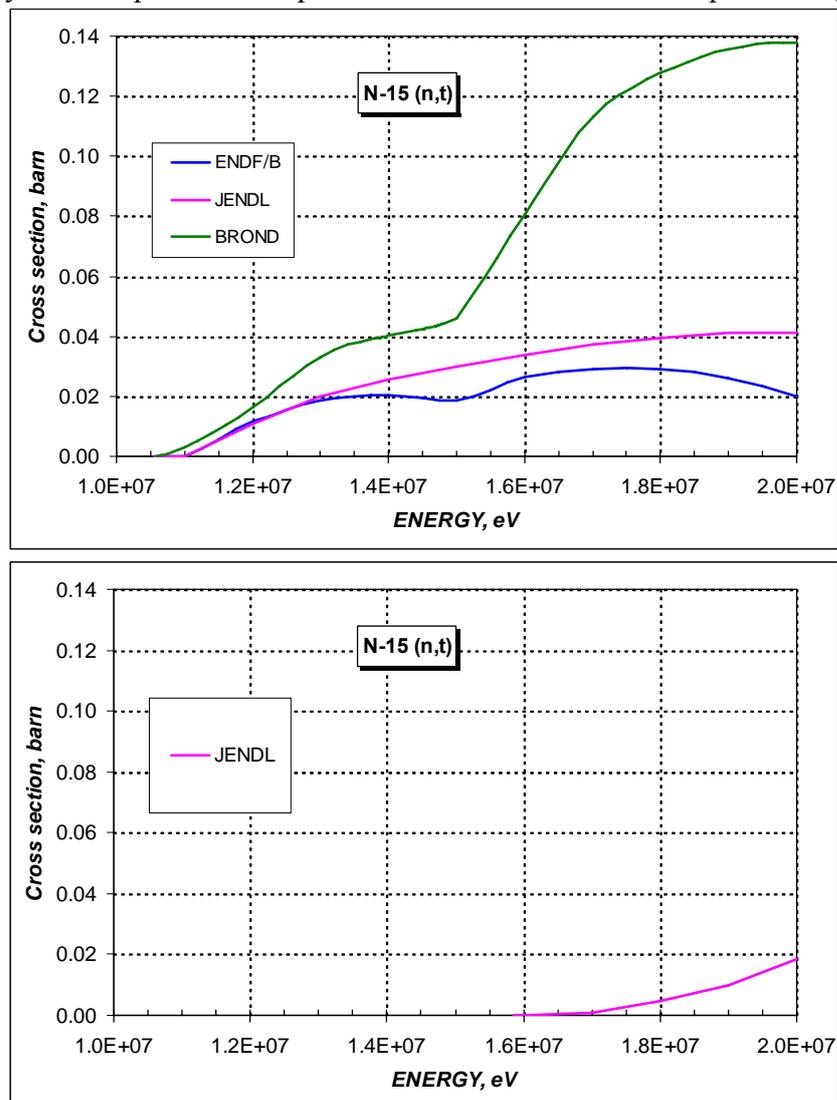


Рисунок 40 – Сечение реакции (n,t) и (n,nt) на N-15.

Из приведенного на рисунке 40 сравнения, видно, что оценки ENDF/B и JENDL согласуются между собой, в то время, как оценка БРОНД имеет другую форму кривой.

Из приведенного на рисунке 40 сравнения, трудно отдать предпочтение какой либо оценке при отсутствии экспериментальных данных.

#### **Выводы**

Из приведенного на рисунках 34 – 40 сравнения сечений пороговых реакций видно, что в целом, наиболее согласованной оценкой можно назвать оценку ENDF/B, поскольку она согласуется с экспериментом для реакции (n,p) а в отсутствии экспериментальных данных не противоречит другим оценкам.

### **4. Заключение**

#### **4.1. Выводы**

В библиотеку РОСФОНД для изотопа N-15 предлагается включить модификацию оценки ENDF/B, выполненную следующим образом:

- обновить полное сечение на основе оценки БРОНД и экспериментальных данных Зейтнитца;
- обновить сечение захвата на основе оценки JENDL, в которой учтен прямой p-захват;
- остальные нейтронные и фотонные данные взять из оценки ENDF/B;
- сечение упругого рассеяния нейтронов получить из условия баланса всех сечений.

#### **4.2. Автор отбора оцененных данных:**

Кощев В.Н.