

## 14. КРЕМНИЙ

### Общие замечания.

Природный кремний содержит три стабильных изотопа в следующих атомарных концентрациях:

$^{28}\text{Si}$  – 92.23%;  $^{29}\text{Si}$  – 4.67%;  $^{30}\text{Si}$  – 3.10%.

Кроме того, существует бета-активный изотоп  $^{32}\text{Si}$ , имеющий период полураспада 132 г.

### 14.1. Кремний-28

#### 1. Общие характеристики

- a. **Z**=14
- b. **A**=28
- c. **AWR**= 27.73700
- d. Содержание в естественной смеси: 92.23%
- e. Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	E <sub>порог.</sub> , МэВ
16	(n,2n) $^{27}\text{Si}$	-17.17700	17.79700
22	(n,n $\alpha$ ) $^{24}\text{Mg}$	-9.985600	10.34600
28	(n,np) $^{27}\text{Al}$	-11.58600	12.00400
102	(n, $\gamma$ ) $^{29}\text{Si}$	8.473900	
103	(n,p) $^{28}\text{Al}$	-3.860000	3.999160
107	(n, $\alpha$ ) $^{25}\text{Mg}$	-9.361300	9.698800

- f. Радиоактивность: не радиоактивен

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных приняты следующие оценки:

**ENDF/B-7** - M.B.Chadwick, P.G.Young, D.Hetrick. EVAL-JUN97; REV1-SEP99.

**JENDL3.3** - H.Kitazawa, Y.Harima, T.Fukahori. EVAL-MAR88; REV3-JUL01.

**JEFF3.1** – S.Tagesen, H.Vonach, A. Trkov. EVAL-MAY96

Надо отметить, что оценка в библиотеке JEFF3.1 была получена из файла ENDF/B-VI путем пересмотра некоторых данных.

В ENDF/B-VII  $^{28}\text{Si}$  также представлен оценкой ENDF/B-6, только продленной до 150 MeV.

#### 2. Резонансная область: (MF=2)

В JENDL3.3 область разрешенных резонансов находится в интервале  $10^{-5}$  эВ до 1.81 MeV (что чуть ниже порога неупругого рассеяния). Резонансные параметры были получены на основе атласа Мухабхаба 1981 г.<sup>1</sup> Приводятся параметры 48 резонансов (7 s-, 17p- и 15d- резонансов) и одного связанного s-состояния.

<sup>1</sup> Mughabghab S.F. et al. ( "Neutron Cross Sections, Vol. 1 Academic Press, 1981.

В ENDF/B-7 и JEFF3.1 область разрешенных резонансов простирается до 1.75 МэВ, но резонансные параметры заданы до гораздо более высоких энергий. Параметры резонансов близки к указанным в новом атласе Мухабхаба<sup>2</sup>. Приводятся параметры 54 резонансов (12 s-, 17p- и 25d- резонансов) и шести связанных s-состояний. Параметры получены в 1996 г. Л.Лилом и др. по программе SUMMY с учетом экспериментальных данных для всех стабильных изотопов и для природного кремния.

В таблице 1 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхабом<sup>2</sup>.

Таблица 1. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов.

Величина	JEFF-3.1	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Мухабхаб <sup>2</sup>
$\sigma_t$	2.161	2.353	2.161	2.169±0.007
$\sigma_e$	1.992	2.177	1.992	1.992±0.006
$\sigma_\gamma$	0.1693	0.1769	0.1693	0.177±0.004
$R\Gamma_\gamma$	0.0820	0.0821	0.0820	0.080±0.015

Расхождение, превышающее указанную Мухабхабом погрешность имеет место только в случае сечения захвата. Поскольку процедура оценки данных по программе SUMMY более строга и определена, чем субъективная оценка данных Мухабхабом, менять тепловое сечение захвата не представляется целесообразным.

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

#### 3.1. Полное сечение (MT=1)

Во всех оценках полное сечение вне резонансной области оценивалось на основе экспериментальных данных для природного кремния.

Сравнение с представленными в EXFORe экспериментальными данными для основного изотопа, демонстрирует приемлемое согласие всех рассматриваемых оценок вплоть до 10 МэВ. При более высоких энергиях результаты двух последних оценок повторяют одну и ту же структуру, проявившуюся в экспериментах по полному сечению природного кремния ( в частности, в эксперимента Larson-80, результаты которого приведены для сравнения на рис.3)

<sup>2</sup> Mughabghab S.F. Atlas of neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. ELSEVIER, 2006.

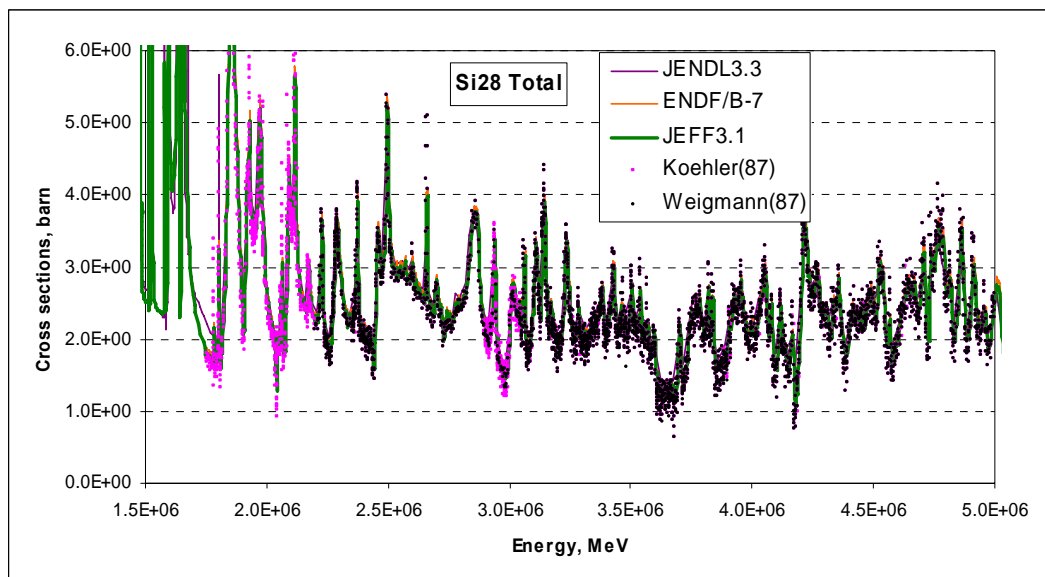


Рис.1. Полное сечение Si28 до 5 MeV

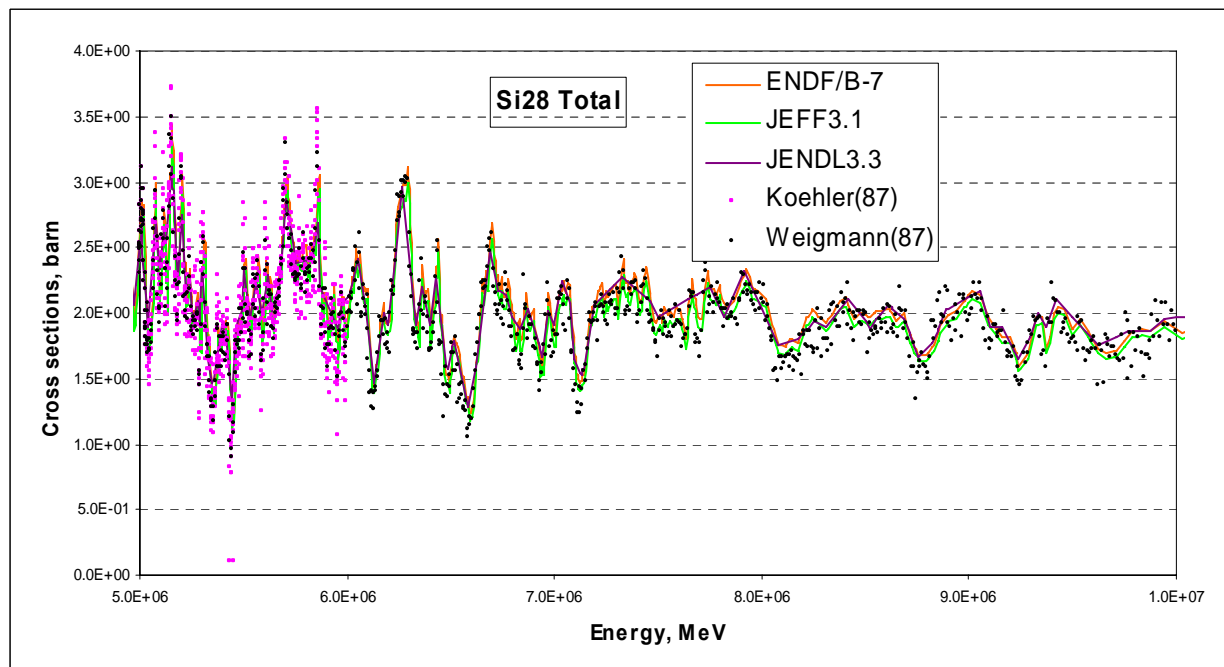


Рис.2. Полное сечение Si28 от 5 до 10 MeV

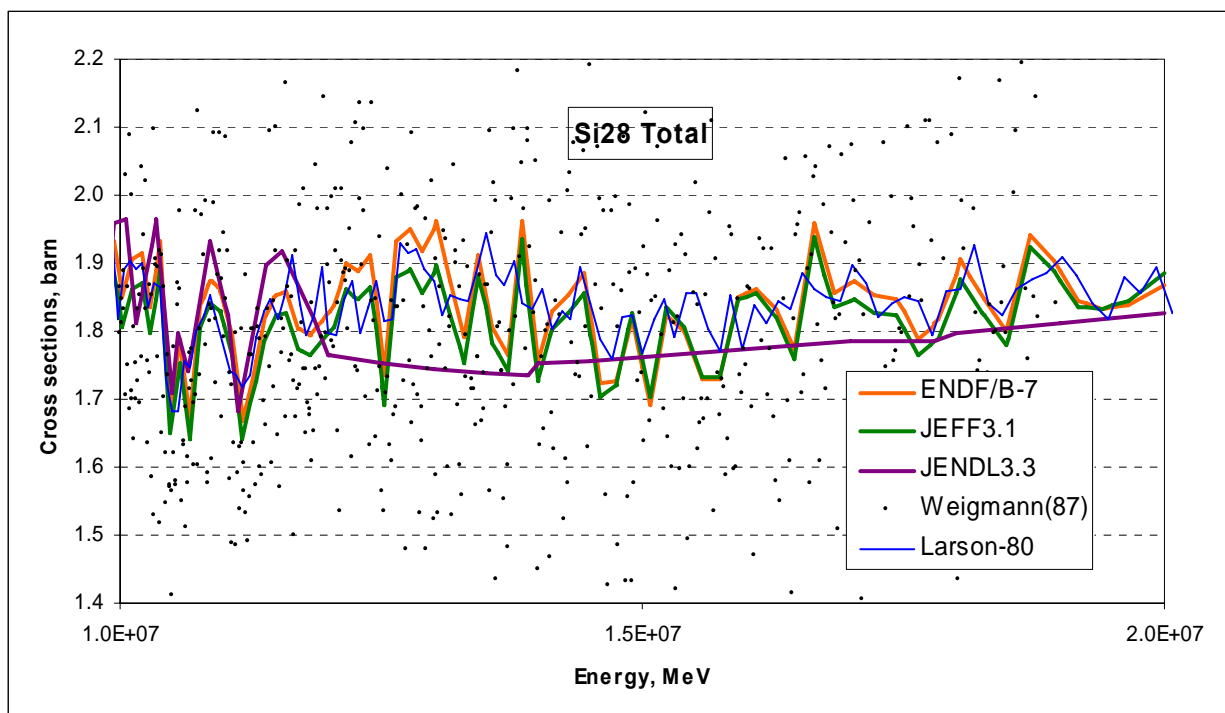


Рис.3. Полное сечение Si28 от 10 до 20 MeV

### 3.2.Сечение упругого рассеяния(МТ=2)

Во всех библиотеках сечение упругого рассеяния получается вычитанием из полного всех имеющихся нейтронных реакций. Экспериментальных данных нет.

### 3.3.Сечение неупругого рассеяния

На рис.4 оцененные сечения неупругого рассеяния сравниваются с результатами немногих измерений. Очевидна определяющая роль эксперимента Пири в оценках ENDF/B-7 и JEFF-3.1, определившего структуру сечения при энергиях ниже 3.5 МэВ. При более высоких энергиях структура оцененного сечения неупругого рассеяния определяется структурой полного сечения. В оценке JENDL-3.3 структура отсутствует и это является серьезным недостатком этой оценки относительно двух остальных.

Схемы уровней в оценках ENDF/B-7 и JEFF-3.1 близки друг к другу, но не совпадают: в ENDF/B-7 рассматривается два уровня (при энергиях 6.879 МэВ и 7.799 МэВ), отсутствующие в JEFF-3.1. Заметим, что уровень при 7.799 МэВ отсутствует и в базе данных PCNUDAT-2000. Возможно, что именно с этим связано несколько большая величина сечения неупругого рассеяния в ENDF/B-7.

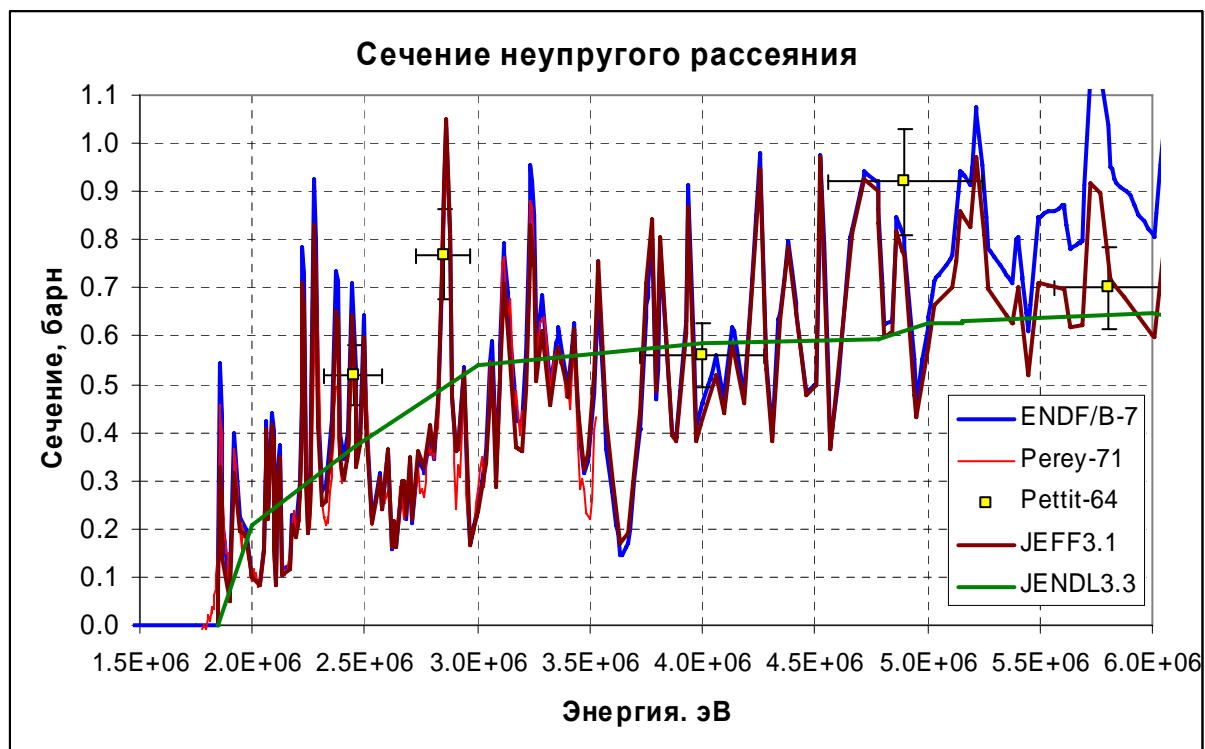


Рис. 4 Сечение неупругого рассеяния Si28

### 3.5. Сечение реакции (n,2n)

В JENDL3.3 расчет сечения (n,2n) проводился по программе GNASH с использованием статистической модели. В ENDF/B-7 сечения также получены расчетами по программе TNG. В JEFF3.1 ничего не сказано про способ получения сечений, но из рисунка видно, что они предпочли оценку JENDL3.3. Единственный эксперимент из EXFORa не согласуется с оцененными данными. Измерения проводились относительно реакции  $^{141}\text{Pr}(n,2n)$ , для которой принимались данные Рэйнборда (1963), согласующиеся с современными оценками. Заметим, что кремний-27, образующийся в результате рассматриваемой реакции, имеет период полураспада всего 4.16 с, что, разумеется, сильно осложняет применение активационной методики. Как бы то ни было, столь быстрый рост сечения вблизи порога, который следует из данных Арнольда, не согласуется с современными представлениями о возможном поведении сечения реакции (n,2n) вблизи порога.

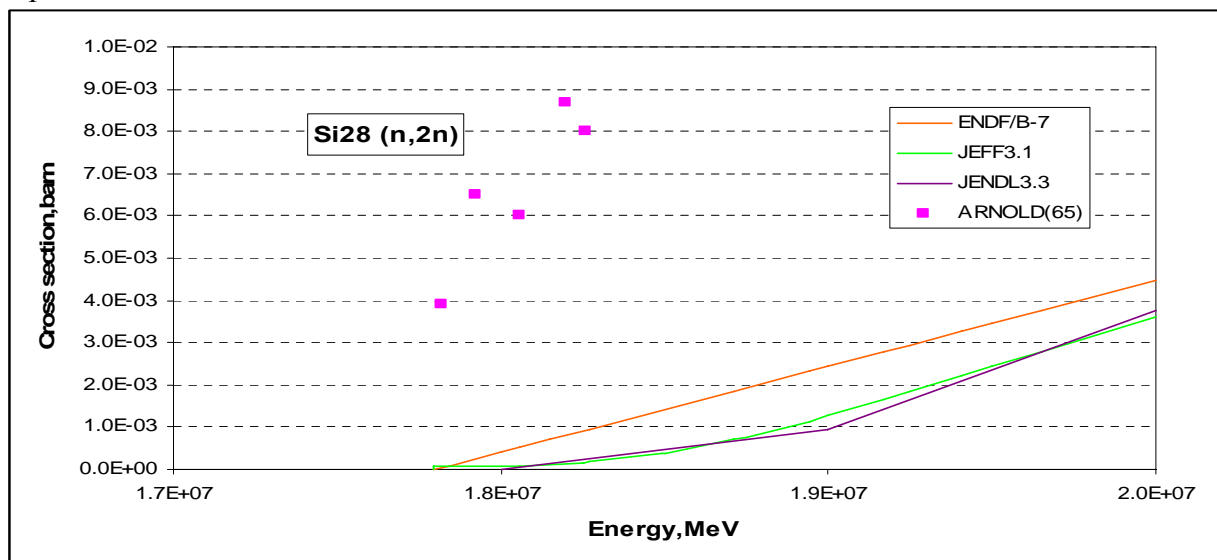


Рис.5. Сечение (n,2n)

### 3.4. Сечение реакции (n,na), (n,np)

В JENDL3.3 сечения реакций (n,na), (n,np) получено расчетным путем по программе GNASH с использованием статистической модели. В ENDF/B-7 сечения также рассчитывались по программе TNG. В JEFF3.1 нет информации о сечениях.

Экспериментальных данных практически нет.

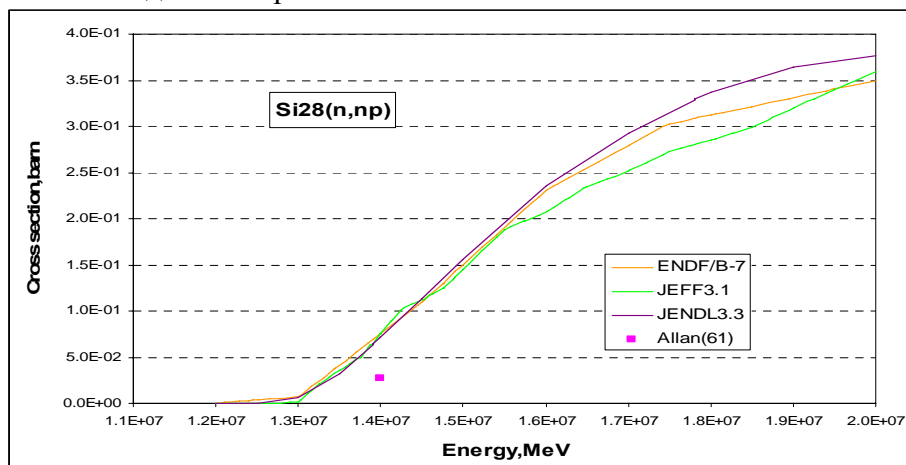


Рис.6. Сечение реакции (n,nα)

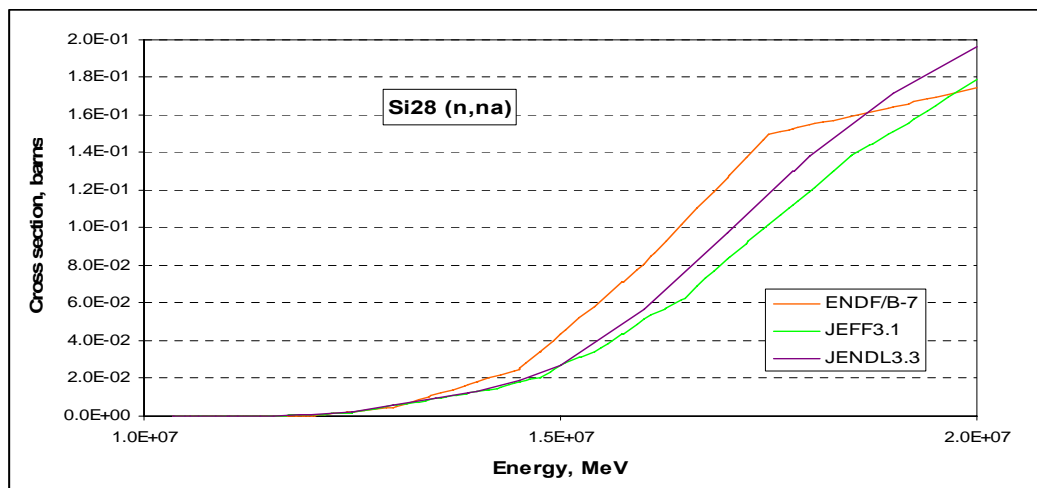


Рис.7. Сечение реакции (n,np)

### 3.5. Сечение реакции (n, $\gamma$ )

Сечение радиационного захвата в JENDL3.3 рассчитывалось по программе GNASH. В ENDF/B-7 и JEFF3.1 оценки в области разрешенных резонансов совпадают, далее в JEFF3.1 сечение, как видно из рисунков 8, 9, повторяет практически оценку JENDL3.3

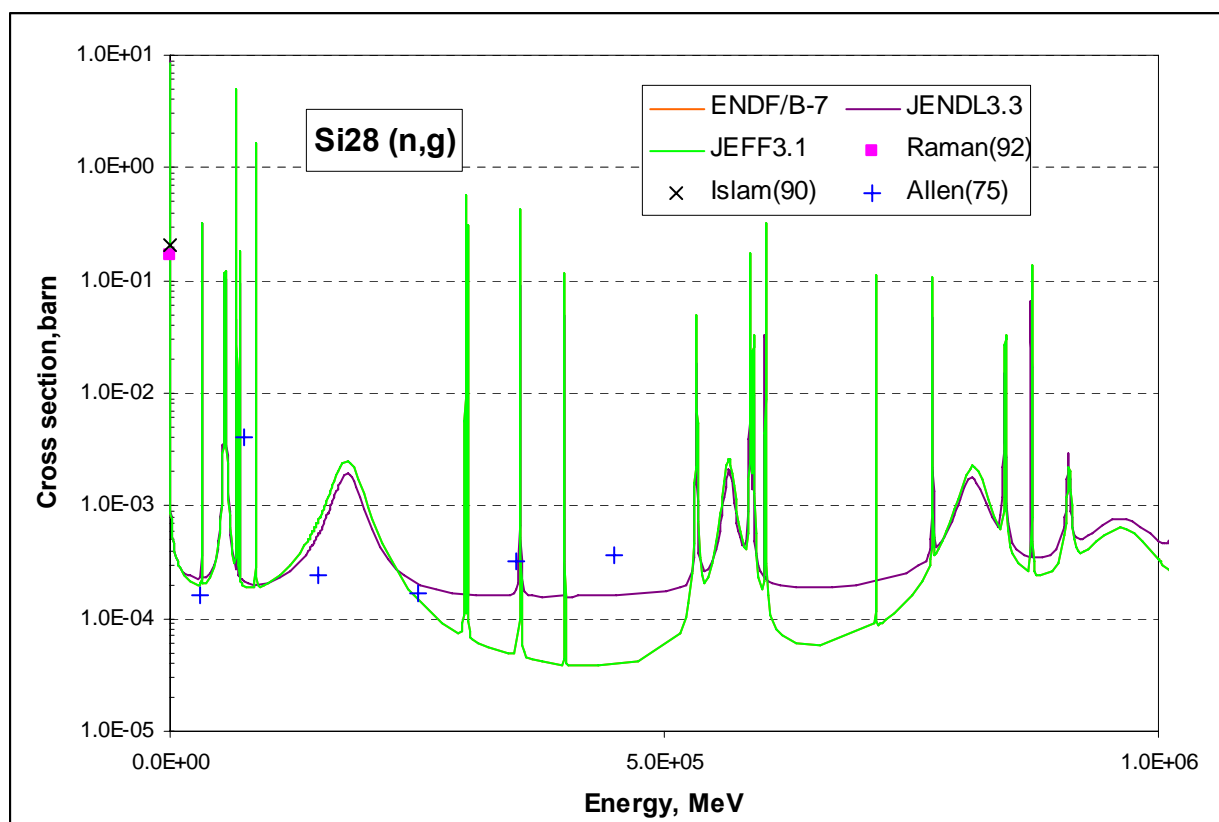


Рис.7. Сечение Si28(n, $\gamma$ ) до 1MeV

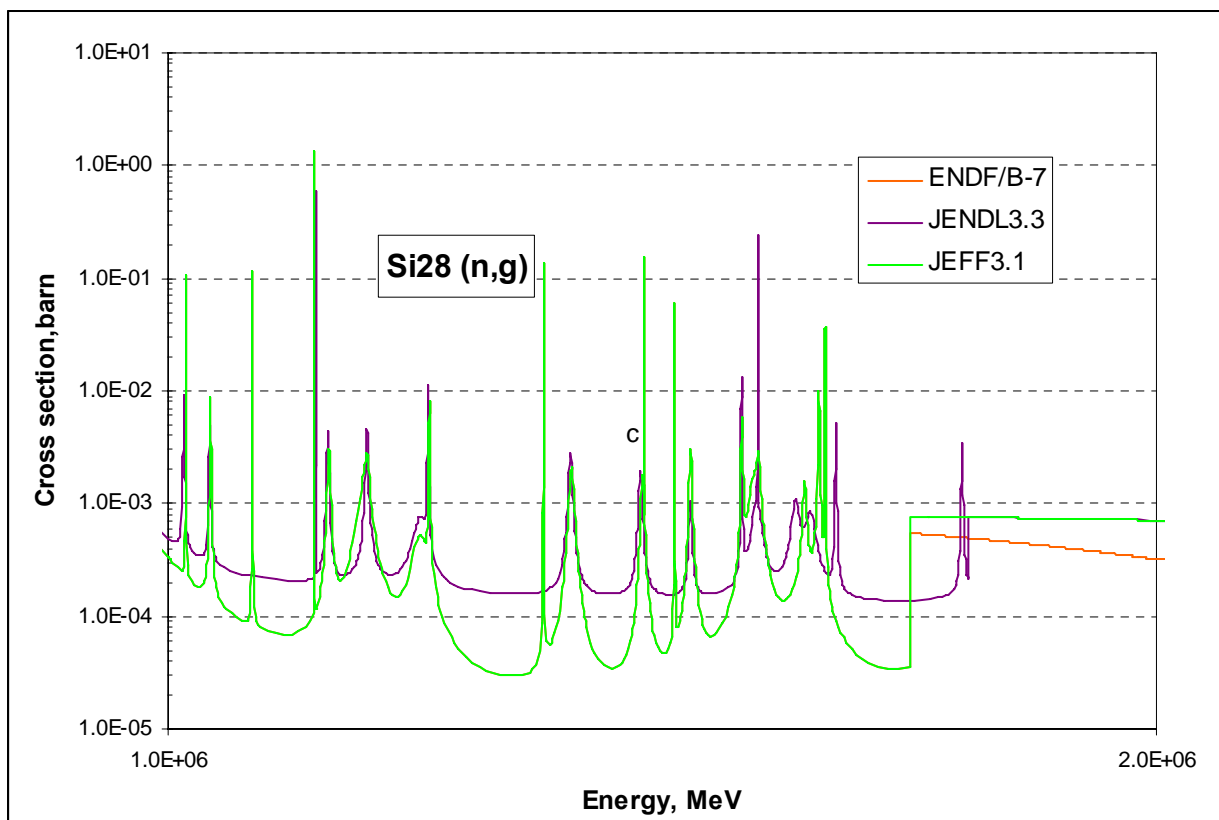


Рис.8. Сечение Si28(n, $\gamma$ ) от 1 до 2 MeV

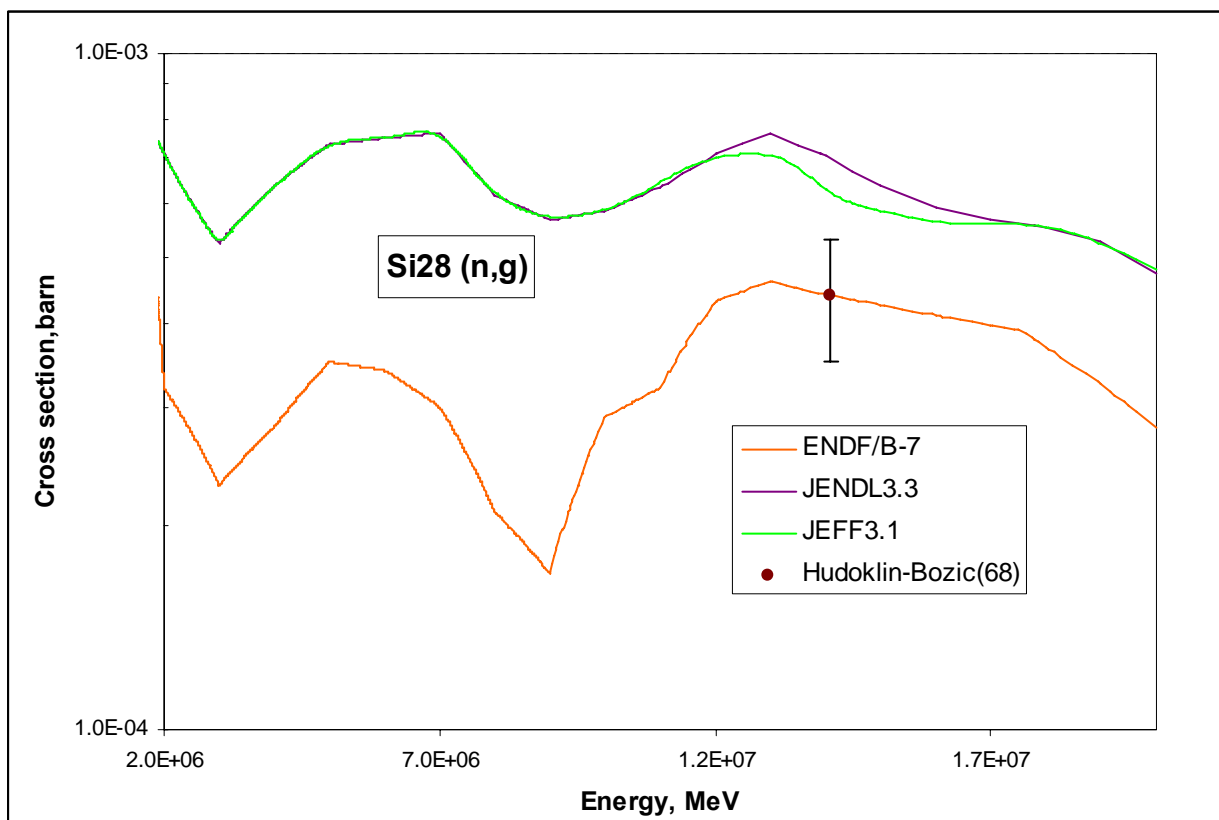


Рис.9. Сечение Si28(n, $\gamma$ ) от 2 до 20 MeV

Экспериментальные данные недостаточны для того, чтобы отдать предпочтение какой-либо из оценок (совпадение Оценки ENDF/B-VII с единственным старым экспериментом при 14 МэВ едва ли можно считать основанием для предпочтения этой оценки).



### 3.10. Сечение реакции (n,p)

Поведение сечения реакции (n,p) во всех трех оценках разное. В ENDF/B-7 и JENDL3.3. расчеты проводились соответственно по программам TNG и GNASH. Оценка в JEFF3.1 была выполнена на основе экспериментов, как видно из рисунков.

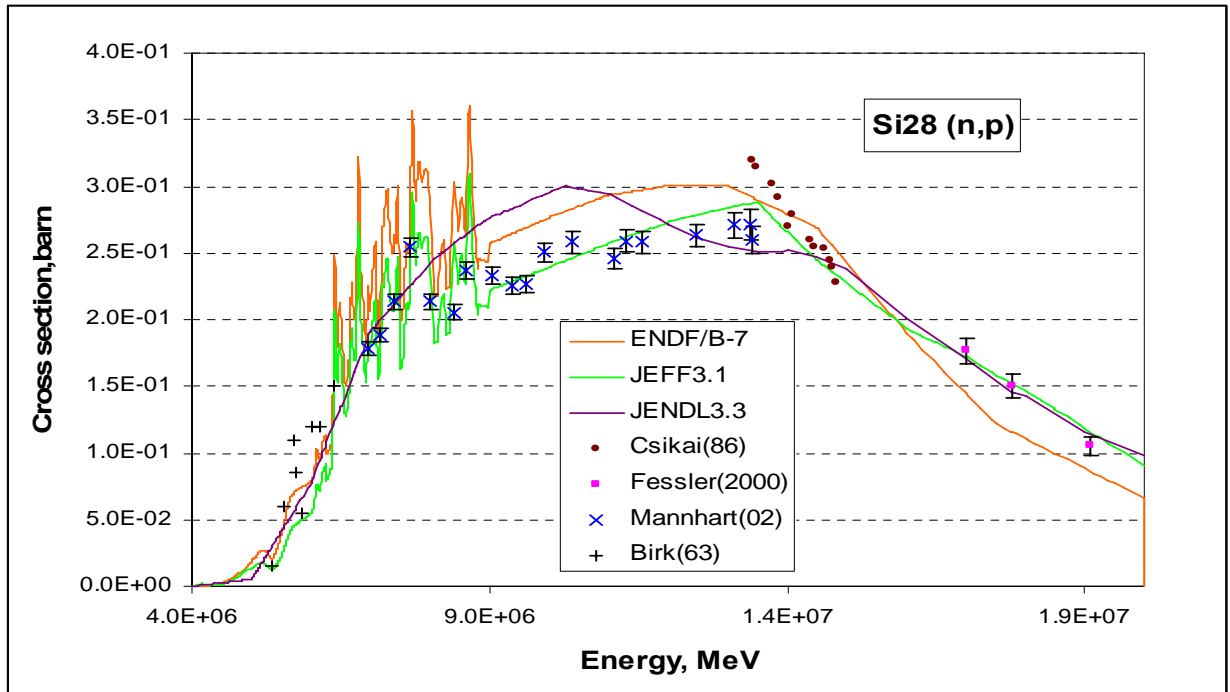


Рис.18. Сечение (n,p)

### 3.12. Сечение реакции (n,d)

Сечение реакции (n,d) присутствует только в двух библиотеках. Оценки отличаются довольно сильно друг от друга, отдать предпочтение какой-либо нельзя, т.к. экспериментальных данных нет.

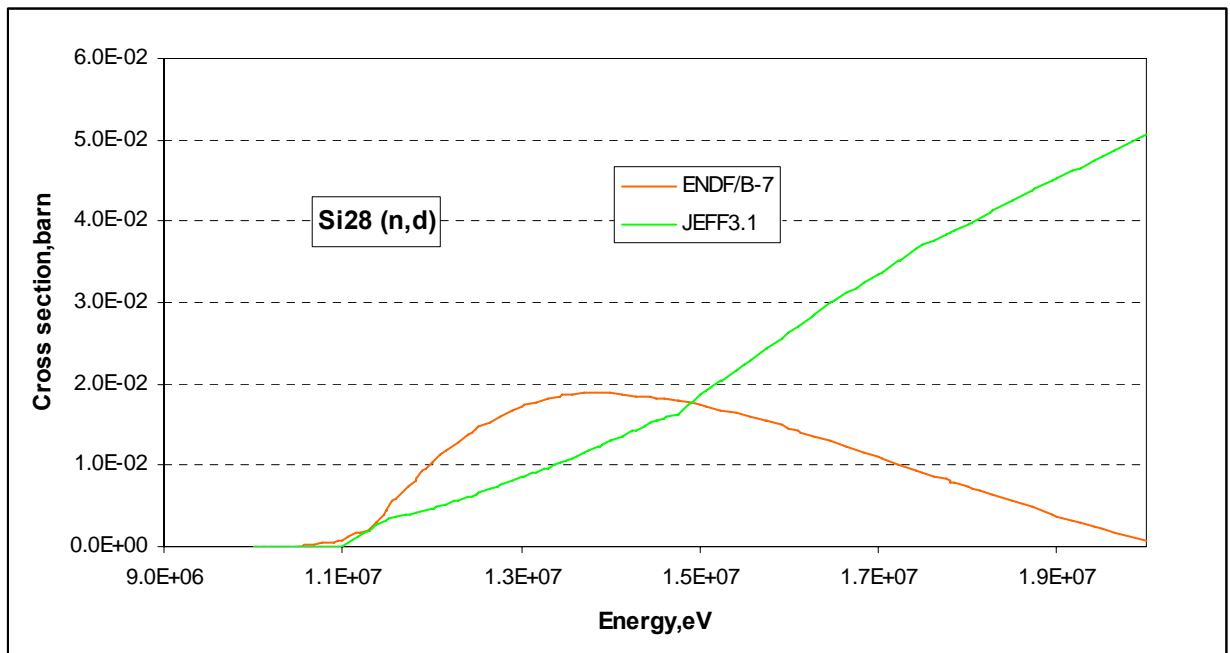


Рис.19. Сечение (n,d)

### 3.12. Сечение реакции (n,t)

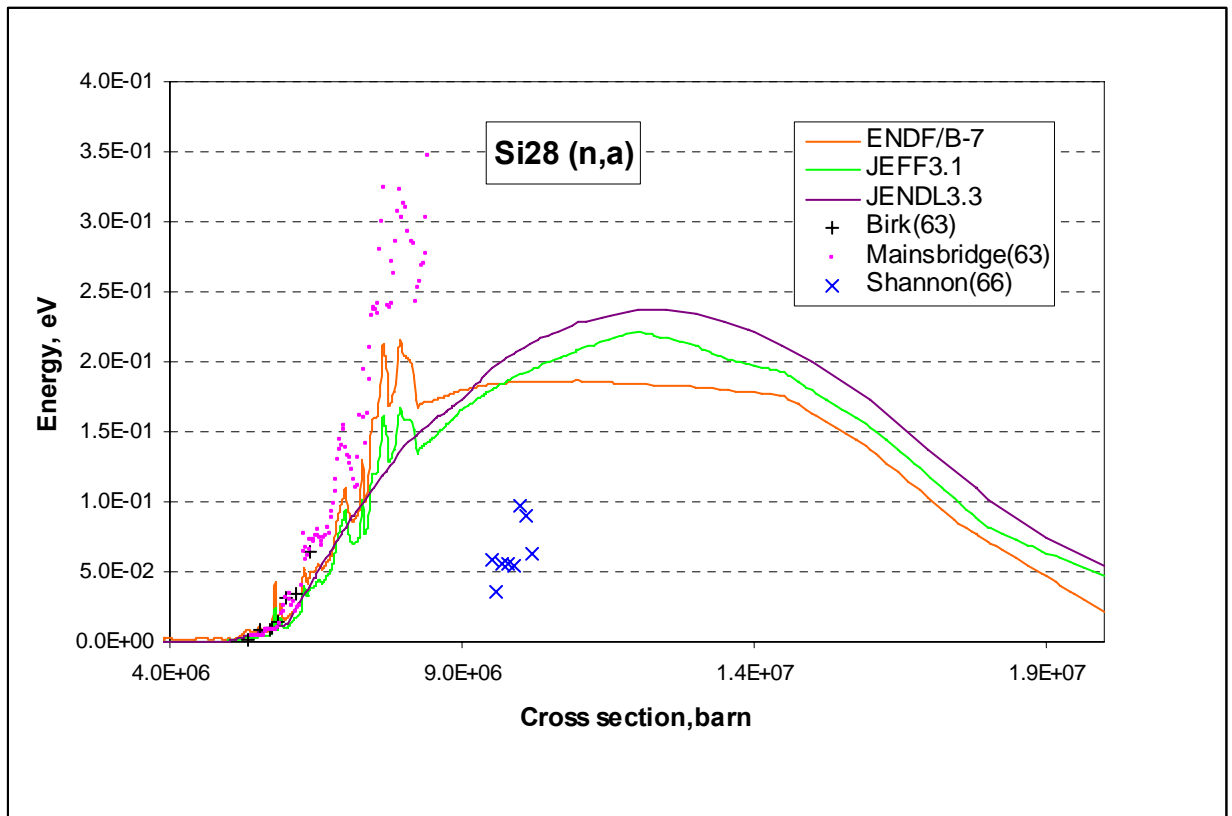


Рис.20. Сечение (n, $\alpha$ )

Как видно, разброс экспериментальных данных столь велик, что не позволяет отдать предпочтение какой-либо из оценок,

## 4. Заключение

Изложенное выше показывает, что оценка, принятая в JENDL-3.3 уступает по качеству двум другим. Между оценками JEFF-3.1. и ENDF/B-VII трудно сделать выбор: в практически весьма важной области разрешенных резонансов они полностью совпадают, а при более высоких энергиях достаточно близки друг к другу. Решено рекомендовать в РОСФОНД оценку из JEFF-3.1 в частности потому, что она не распространяется на область энергий выше 20 МэВ, как ENDF/B-VII (в РОСФОНДе область энергий выше 20 МэВ не рассматривается)

**4.2. Автор обоснования оцененных данных:** Забродская С.В.

## 14.2. Кремний-29

$Z=14$

$A=29$

$AWR= 28.72760$

Содержание в естественной смеси: 4.683%

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}, \text{ МэВ}$
16	$(n,2n)^{28}\text{Si}$	-8.47388	8.76886
22	$(n,n\alpha)^{25}\text{Mg}$	-11.12670	11.5140
28	$(n,np)^{28}\text{Al}$	-12.3337	12.7630
102	$(n,\gamma)^{30}\text{Si}$	10.6143	
103	$(n,p)^{29}\text{Al}$	-2.89783	2.9987
107	$(n,\alpha)^{26}\text{Mg}$	-0.33150	0.343039
111	$(n,2p)^{28}\text{Mg}$	-13.38310	13.8490

Радиоактивность: не радиоактивен

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных приняты следующие оценки:  
**ENDF/B-7** - M.B.Chadwick, P.G.Young, D.Hetrick. EVAL-JUN97; REV2-NOV01.

**JENDL3.3** и **JEFF3.1** - H.Kitazawa, Y.Narima, T.Fukahori. EVAL-MAR88; REV3-JUL01.

### 14.2.1. Резонансная область: (MF=2)

В JENDL-3.3 область разрешенных резонансов распространяется только до 200 кэВ и содержит параметры двух р-резонансов и одного связанного s-состояния. В файле MF=3 в этой области задана существенная подложка.

В ENDF/B-7 область разрешенных резонансов простирается до 1300 кэВ и содержит параметры 4-х s-, 17 р- и 2-х d-резонансов не считая Пармев тров 3-х связанных состояний и 3-х резонансов, лежащих выше границы области. Резонансные параметры были определены Лилом и др. по программе SUMMY с учетом всех имеющихся экспериментальных данных для всех стабильных изотопов кремния и для природного кремния. Параметры заметно отличаются от приведенных в атласе Мухабхаб<sup>2</sup> (в частности, отсутствует самый низколежащий s-резонанс при 15.3 кэВ с малой нейтронной шириной – 7.5 эВ). Учитывая, что оценка Лила и др. принята и для остальных стабильных изотопов кремния и использование ее позволяет надеяться на взаимокompенсацию погрешностей в оцененных данных для стабильных изотопов, целесообразно включить в РОСФОНД именно эту оценку резонансных параметров.

В таблице 2 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхабом<sup>2</sup>.

Таблица 2. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов для кремния-29.

Величина	JEFF-3.1	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Мухабхаб <sup>2</sup>
$\sigma_t$	2.995	2.995	2.750	2.739±0.050
$\sigma_e$	2.893	2.893	2.630	2.62±0.13
$\sigma_\gamma$	0.1016	0.1016	0.120	0.119±0.003
$R\Gamma_\gamma$	0.0648	0.0648	0.0625	0.077±0.015

#### 14.2.2. Сечения вне резонансной области

Оценка, принятая в JENDL-3.3, в окончательном виде выполнена в 2000 г. В ENDF/B-VII в области ниже 20 МэВ принята оценка из ENDF/B-VI, которая, как сказано в заголовочной секции взята из ENDF/B-V. Между тем в ENDF/B-V файла для Si-28 не содержится, имеются данные только для природного кремния.

Вне резонансной области в JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII сечения нейтронных реакций описаны с разной детальностью. Так в JENDL-3.3 описывается возбуждение при неупругом рассеянии 29 уровней ядра-мишени до энергии 7.06 МэВ (в ENDF/B-VII только 14 уровней до энергии 6 МэВ). С другой стороны, в ENDF/B-VII описывается возбуждение 15 уровней ядер-продуктов, образующихся в реакции (n,p) и 19 уровней ядер-продуктов, образующихся в реакции (n, $\alpha$ ), тогда как в JENDL-3.3 приводятся только полные сечения этих реакций. В JENDL-3.3 приводится сечение реакции (n,2p), которой в ENDF/B-VII нет.

На рис. 21 сравниваются полные сечения вне резонансной области. Экспериментальные данные отсутствуют (по крайней мере, их нет в EXFORe). Происхождение структуры полного сечения в оценке ENDF/B неясно. Возможно, эта структура повторяет структуру сечения природного кремния.

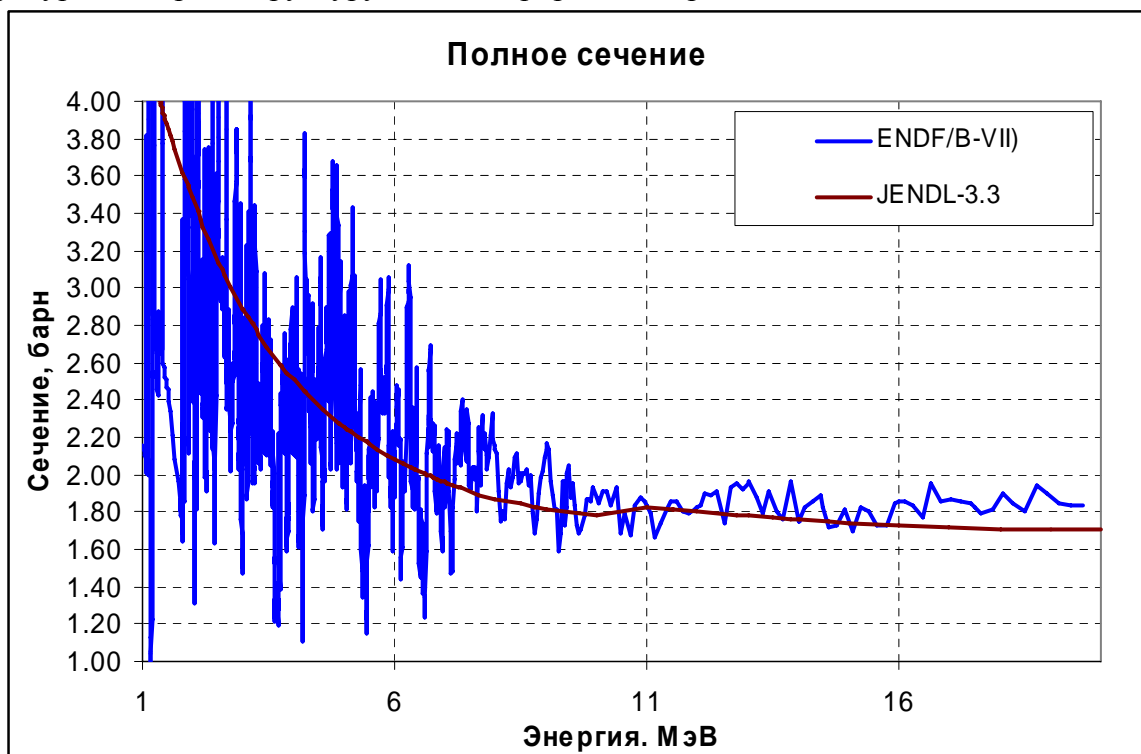


Рис.21. Полное сечение кремния-29 вне резонансной области.

На рис. 22 сравниваются оцененные сечения неупругого рассеяния и реакции (n,2n). Экспериментальных данных не имеется.

На рис. 23 приводятся оцененные сечения реакций с вылетом заряженных частиц вместе с экспериментальными данными. Как видно, отдать предпочтение той или иной оценке на основе сравнения с экспериментальными данными нелегко; разве что оценка сечения реакции (n,p) в JENDL-3.3 лучше согласуется с экспериментами, выполненными много позже ее.

### 14.2.3. Энерго-угловые распределения вторичных частиц.

Эти данные приводятся и в той и в другой оценке. Для сравнения их по надежности никаких оснований нет.

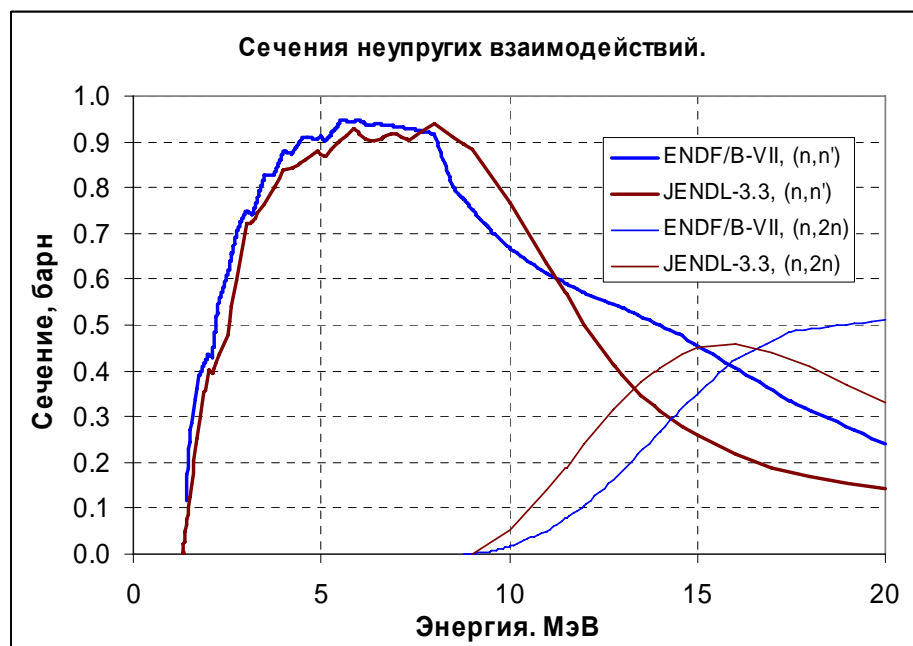


Рис.21. Сечения неупругого рассеяния и реакции (n,2n) для кремния-29

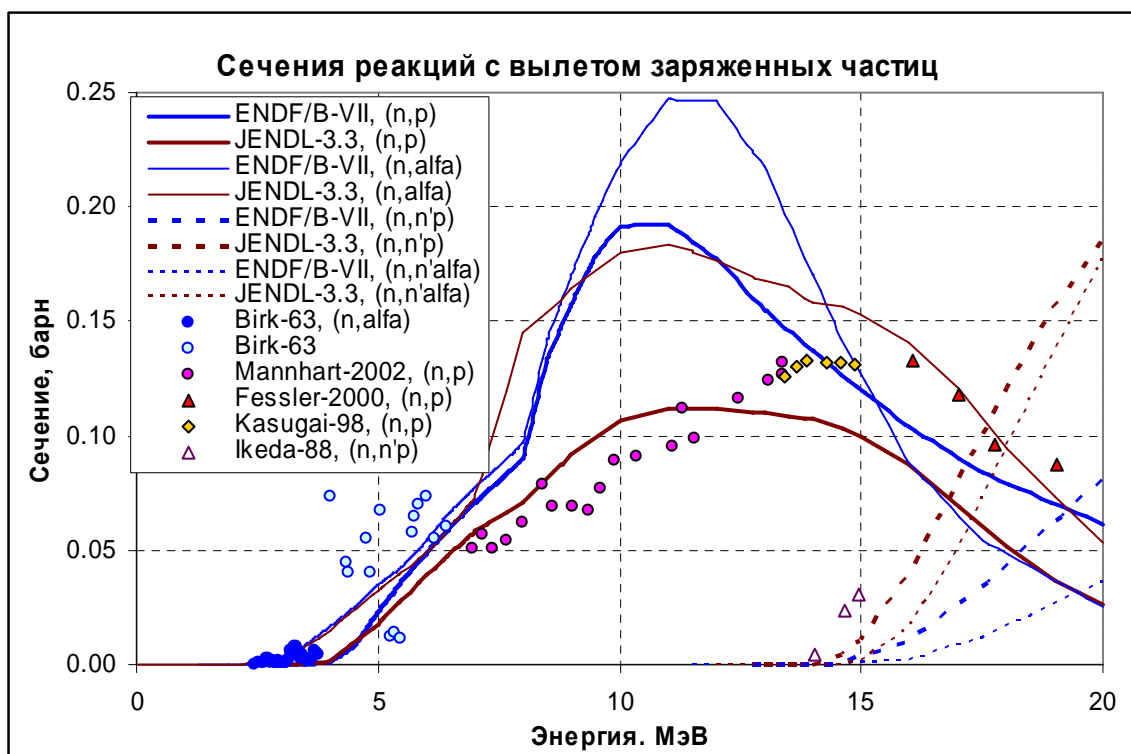


Рис.23. Сечения реакций с вылетом заряженных частиц

### 14.2.4. Заключение

Представляется целесообразным сформировать для РОСФОНДа комбинированный файл взяв резонансные параметры из ENDF/B-VII, а сечения вне резонансной области – из

JENDL-3.3. Избыточные данные о суммарных сечениях образования протонов и альфа-частиц, содержащиеся в JENDL-3.3, в файл РОСФОНДа не включать.

Автор рекомендации – Николаев М.Н.

### 14.3. Кремний -30

$Z=14$

$A=30$

$AWR= 29.74230$

Содержание в естественной смеси: 3.087%

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	$E_{\text{порог.}}, \text{ МэВ}$
16	$(n,2n)^{29}\text{Si}$	-10.6097	10.9667
22	$(n,n\alpha)^{26}\text{Mg}$	-10.6428	11.0009
28	$(n,np)^{29}\text{Al}$	-13.5075	13.9620
102	$(n,\gamma)^{31}\text{Si}$	6.59199	
103	$(n,p)^{30}\text{Al}$	-7.75882	8.019930
107	$(n,\alpha)^{27}\text{Mg}$	-4.19984	4.34118
111	$(n,2p)^{29}\text{Mg}$	-18.3851	-19.0038

Радиоактивность: не радиоактивен

В современных библиотеках оцененных нейтронных данных приняты следующие оценки:  
**ENDF/B-7** - M.B.Chadwick, P.G. Young, D. Hetrick. EVAL-JUN97; REV2-NOV01.

**JENDL3.3** и **JEFF3.1** - H. Kitazawa, Y. Harima, T. Fukahori. EVAL-MAR88; REV3-JUL01.

#### 14.3.1. Резонансная область: (MF=2)

В JENDL-3.3 область разрешенных резонансов распространяется только до 500 кэВ и содержит параметры одного s- резонанса, двух p-резонансов и трех d-резонансов. В файле MF=3 в этой области задана существенная подложка.

В ENDF/B-7 область разрешенных резонансов простирается до 1500 кэВ и содержит параметры одного s-резонанса, 16 p-резонансов и 7 d-резонансов не считая параметров 3-х связанных состояний и 2-х резонансов, лежащих выше границы области. Резонансные параметры были определены Лилом и др. по программе SUMMY с учетом всех имеющихся экспериментальных данных для всех стабильных изотопов кремния и для природного кремния. Параметры заметно отличаются от приведенных в атласе Мухабхаба<sup>2</sup> (в частности, отсутствует самый низлежащий s-резонанс при 15.1 кэВ с малой нейтронной шириной – 5 эВ и резонансы при 5 кэВ и при 63.4 кэВ, проявившиеся в (d,p)-реакции). Учитывая, что оценка Лила и др. принята и для остальных стабильных изотопов кремния и использование ее позволяет надеяться на взаимокompенсацию погрешностей в оцененных данных для стабильных изотопов, целесообразно включить в РОСФОНД именно эту оценку резонансных параметров.

В таблице 2 проводится сравнение тепловых сечений и резонансного интеграла захвата с данными, рекомендованными Мухабхабом<sup>2</sup>.

Таблица 2. Сравнение тепловых сечений и резонансных интегралов для кремния-29.

Величина	JEFF-3.1	JENDL-3.3	ENDF/B-VII	Мухабхаб <sup>2</sup>
$\sigma_t$	2.641	2.641	2.607	2.597±0.040

$\sigma_e$	2.533	2.533	2.500	$2.49 \pm 0.04$
$\sigma_\gamma$	0.1078	0.1078	0.1072	$0.107 \pm 0.002$
$R\Gamma_\gamma$	0.7048	0.7048	0.5812	$0.63 \pm 0.03$

### 14.3.2. Сечения вне резонансной области

В ENDF/B-VII в области ниже 20 МэВ принята оценка из ENDF/B-VI, которая, как сказано в заголовочной секции, взята из ENDF/B-VI.5.

Как и в случае кремния-28, вне резонансной области в JENDL-3.3 и в ENDF/B-VII сечения нейтронных реакций описаны с разной детальностью: неупругое рассеяние в JENDL-3.3 описывается возбуждение при неупругом рассеянии большего числа уровней, чем в ENDF/B-VII; в ENDF/B-VII описывается возбуждение уровней ядер-продуктов, образующихся в реакции (n,p) и (n, $\alpha$ ), тогда как в JENDL-3.3 приводятся только полные сечения этих реакций. В JENDL-3.3 приводится сечение реакции (n,2p), которой в ENDF/B-VII нет.

На рис. 24 сравниваются полные сечения вне резонансной области. Экспериментальные данные отсутствуют (по крайней мере, их нет в EXFORe). Происхождение структуры полного сечения в оценке ENDF/B неясно. Возможно, эта структура повторяет структуру сечения природного кремния.

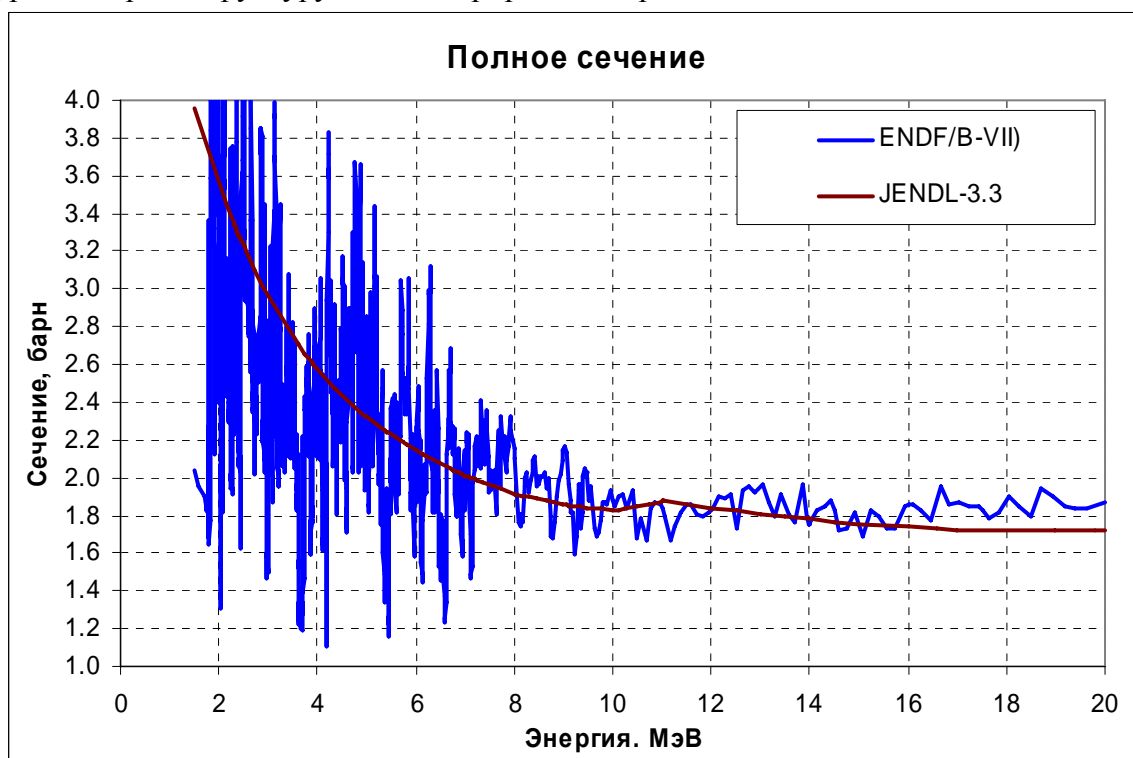


Рис.24. Полное сечение кремния-30 вне резонансной области

На рис.25 проводится сравнение оцененных сечений неупругого рассеяния и реакции (n,2n).

На рис.26 оцененные сечения реакций с вылетом заряженных частиц сравниваются с экспериментальными данными. Экспериментальные данные по сечению реакции (n,p) весьма противоречивы. Интересно, что оценки ближе к последним результатам, полученным уже после завершения оценок.

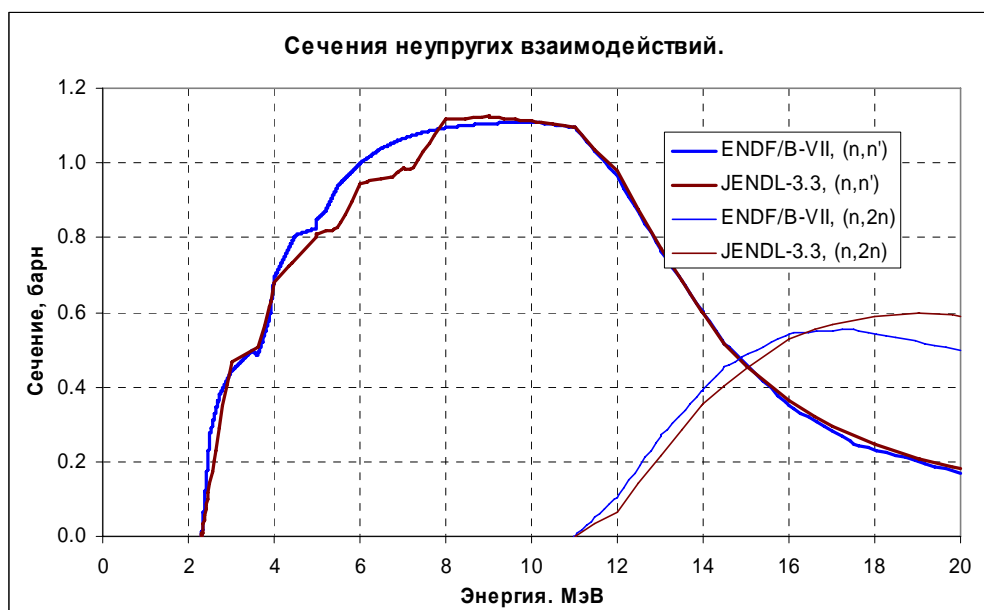


Рис.25. Неупругое рассеяние и реакция (n,2n) на кремнии-30

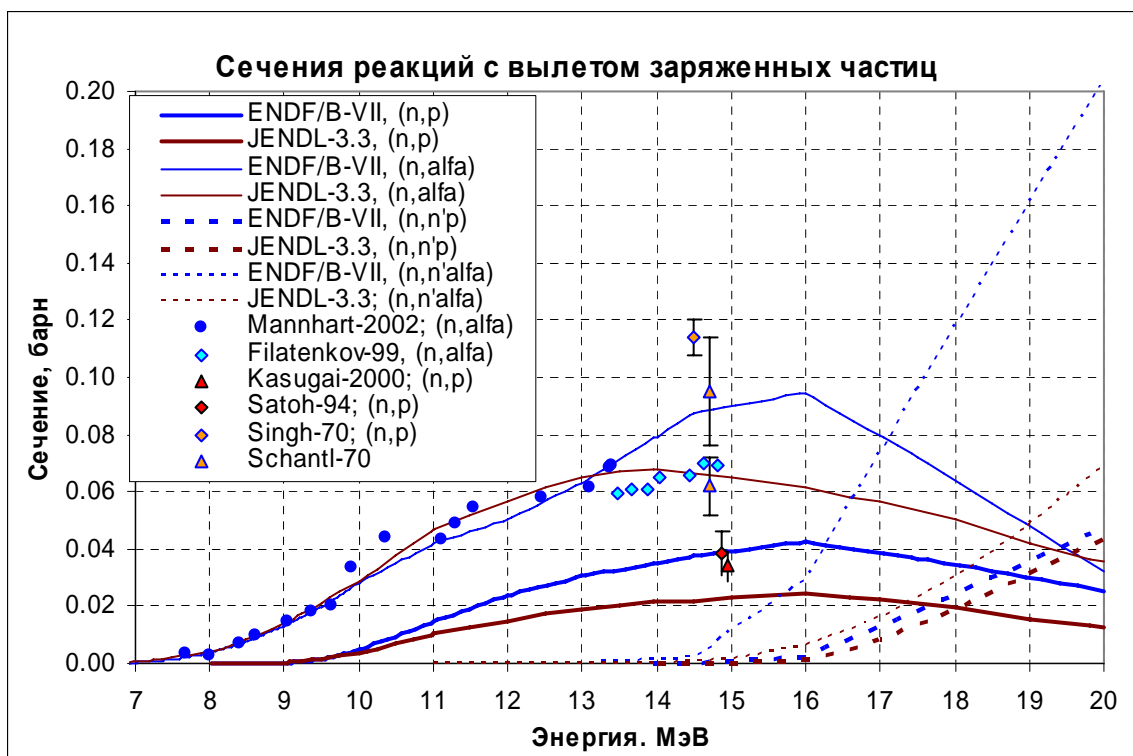


Рис.26. Сечения реакций с вылетом заряженных частиц.

### 14.3.3. Энерго-угловые распределения вторичных частиц.

Эти данные приводятся и в той и в другой оценке. Для сравнения их по надежности никаких оснований нет.

### 14.2.4. Заключение

Представляется целесообразным сформировать для РОСФОНДа комбинированный файл взяв резонансные параметры из ENDF/B-VII, а сечения вне резонансной области – из JENDL-3.3. Преимущество ENDF/B-VII перед JENDL-3.3 проявившееся в лучшем



согласии оценки сечения реакции (n,p) с экспериментальными данными компенсируется недостатком, проявившемся в явно избыточном сечении реакции (n,p'α). Избыточные данные о суммарных сечениях образования протонов и альфа-частиц, содержащиеся в JENDL-3.3, в файл РОСФОНДа не включать.

**Автор рекомендации** – Николаев М.Н.

## 14.4. Кремний-32

**Z**=14

**A**=32

**AWR**= 31.6995

Содержание в естественной смеси: нет

Перечень нейтронных реакций

MT	Реакция	Q, МэВ	E <sub>порог.</sub> , МэВ
16	(n,2n) <sup>31</sup> Si	-9.200	9.4875
17	(n,3n) <sup>30</sup> Si	-15.798	16.2870
22	(n,nα) <sup>28</sup> Mg	-11.490	11.8490
28	(n,np) <sup>31</sup> Al	-16.41566	16.93322
102	(n,γ) <sup>33</sup> Si	4.4829	
103	(n,p) <sup>32</sup> Al	-12.23	12.612
104	(n,d) <sup>31</sup> Al	-14.19108	14.63854
105	(n,t) <sup>30</sup> Al	-15.09	15.562
107	(n,α) <sup>29</sup> Mg	-7.78	8.0231

Радиоактивность: испытывает бета-распад в <sup>32</sup>P с периодом T<sub>1/2</sub>=132 г., а затем – в <sup>32</sup>S с периодом T<sub>1/2</sub>=14.262 д.

Полных файлов нейтронных данных для этого радионуклида ни в одной из известных библиотек нет. В EAF-2003 содержится файл Форреста, Копецкого и Саблета, содержащий только оценки сечений нейтронных реакций, ведущих к изменению исходного ядра. Этот файл и рекомендуется включить в РОСФОНД.

Следующие из файла тепловое сечение захвата и резонансный интеграл равны, соответственно, 5.62 миллибарн и 60.617 миллибарн.

**Автор рекомендации** - В.Н.Кошечев