

В.В.Варламов, Д.С.Руденко, М.Е.Степанов

ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ И $^{232}\text{Th}(\gamma, \text{f})$ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА РЕДУКЦИИ

Исследована промежуточная структура сечений реакций фоторасщепления $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ и фотоделения $^{232}\text{Th}(\gamma, \text{f})$. С помощью *новой реализации* разработанного ранее метода редукции оценены энергетические зависимости сечений реакций $^{34}\text{S}[(\gamma, \text{n}) + (\gamma, \text{np}) + (\gamma, 2\text{n})]$ для энергий налетающих γ -квантов $E_\gamma = 10 - 28$ МэВ и $^{232}\text{Th}(\gamma, \text{f})$ для $E_\gamma = 4.8 - 8.9$ МэВ. Использовались соответственно модели редукции с минимизацией погрешностей и с дополнительным измерением. Сечение реакции $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ получено с энергетическим разрешением $\sim 200 - 300$ кэВ и статистической погрешностью $\sim 5 - 10$ %, сечение реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, \text{f})$ - соответственно 75 кэВ и $\sim 8 - 14$ %.

Введение

Сечения фотоядерных реакций широко используются как в фундаментальных и прикладных исследованиях, так и в разнообразных приложениях. К настоящему времени подавляющее большинство из них получено в экспериментах с использованием пучков тормозного γ -излучения. Спектр тормозного γ -излучения является *сплошным*, и вследствие этого сечение реакции определяется, как правило, в результате решения неустойчивой обратной задачи «развертки» сечения реакции σ из ее экспериментального выхода Y :

$$Y(E_{jm}) = \frac{N(E_{jm})}{\varepsilon D(E_{jm})} = \alpha \int_{E_{th}}^{E_{jm}} W(E_{jm}, k) \sigma(k) dk, \quad (1)$$

где $\sigma(k)$ - значение при энергии фотонов k сечения фотоядерной реакции с энергетическим порогом E_{th} ;

$W(E_{jm}, k)$ - энергетический спектр тормозного γ -излучения с верхней границей E_{jm} , описываемый спектром Шиффа /1/;

$N(E_{jm})$ - число зарегистрированных событий;

$D(E_{jm})$ - доза γ -излучения;

ε - эффективность детектирующей системы;

α - нормировочная константа.

Известно большое число методов, предложенных для решения интегрального уравнения (1): «обратной матрицы», «разности фотонов», «Пенфолда-Лейсса», «наименьшей структуры Кука», «регуляризации Тихонова», «статистической регуляризации» и другие, каждый из которых обладает определенными преимуществами и недостатками. Для расчета значений искомого сечения при

определенных энергиях используются разные /2, 3/ эффективные фотонные спектры (аппаратные функции), что приводит к различиям представлений о том, что именно интерпретируется как сечение в разных экспериментах и , как следствие, - к расхождениям (и иногда весьма значительным /3, 4/) получаемых сечений. Сложные формы аппаратных функций традиционных методов восстановления сечений реакций из выходов затрудняют оценку реально достигаемого энергетического разрешения.

Для преодоления проблемы подобных расхождений был предложен /2 - 4/ метод обработки выходов (сверток сечения с эффективными спектрами фотонов) реакций, основанный на математическом методе редукции /5/, позволяющий без решения неустойчивой обратной задачи (1) получать оптимальное моноэнергетическое представление информации о сечении реакции, содержащейся в ее выходе. Метод редукции, базирующийся на теории измерительно-вычислительных систем сверхвысокого разрешения и использующий идеи математической теории распознавания образов, дает возможность распознавать образ «истинного» сечения реакции среди совокупности представлений этого образа в виде экспериментально измеряемых выходов. Разработанный метод применялся /2 - 4, 6, 7/ для оценки сечений различных фотоядерных реакций целого ряда ядер.

В настоящей работе с помощью редукционной обработки соответствующих кривых выхода получена точная и надежная информация о многочисленных структурных особенностях с полушириной ~ 100 кэВ в сечениях реакций $^{34}\text{S}(\gamma,sn) = [(\gamma,n) + (\gamma,np) + (\gamma,2n)]$ и $^{232}\text{Th}(\gamma,f)$. В случае первой из них использовалась кривая выхода, опубликованная в работе /8/, второй - авторские /9, 10/ числовые данные. Совместный анализ оцененных сечений с опубликованными ранее данными /8 - 10/ предоставляет возможность детального сравнения возможностей различных методов получения сечений фотоядерных реакций.

1. Опубликованные данные

1.1. Кривая выхода и сечение реакции $^{34}\text{S}(\gamma,sn)$

Кривая выхода реакции $(\gamma,sn) = [(\gamma,n) + (\gamma,np) + (\gamma,2n)]$ на ядре ^{34}S (обогащение 94.33 %) была измерена /8/ на пучке тормозного γ -излучения бетатрона университета Мельбурна (Австралия) с шагом 100 кэВ в области энергий налетающих фотонов $E_\gamma = 10.4 - 29.4$ МэВ. Выход реакции (эффект) был получен в результате вычитания из суммарного выхода (измерения с образцом - сумма эффекта и фона) выхода фона (измерения без образца), составившего при энергии $E_\gamma = 20$ МэВ величину ~ 18 % от суммарного. В области энергий выше $E_\gamma = 20.1$ МэВ (энергетический порог реакции $(\gamma,2n)$) с помощью статистической теории был осуществлен учет множественности фотонейтронов из реакции $^{34}\text{S}(\gamma,2n)^{32}\text{S}$.

Сечение реакции $^{34}\text{S}(\gamma,sn)$ было получено из экспериментальной кривой выхода с помощью метода Пенфолда-Лейсса с переменным шагом анализа при использовании в качестве ядра уравнения (1) проинтегрированного по углам спектра Шиффа /1/. Следует отметить, что вследствие использования описанной выше разностной процедуры («эффект - фон»), опубликованная кривая выхода имеет относительно невысокую статистическую точность (~ 30 % при $E_\gamma = 12$ МэВ, ~ 1.3 % при $E_\gamma = 18$ МэВ и ~ 0.5 % при $E_\gamma = 29.4$ МэВ).

Экспериментальная кривая выхода и сечение реакции $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ из работы /8/ приведены соответственно на Рис. 1а и 1в.

1.2. Кривая выхода и сечение реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$

Кривая выхода реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ была измерена /9/ на пучке тормозного γ -излучения микротрона ГНЦ «Физико-энергетический институт» раздельно в двух пересекающихся энергетических областях с различным шагом по энергии (0.025 МэВ в области энергий $E_\gamma = 4.800 - 7.025$ МэВ и 0.05 - 1.0 МэВ в области $E_\gamma = 5.025 - 8.925$ МэВ). Измерения выполнены с шагом 25 кэВ, близким к предельному энергетическому разрешению электронов микротрона, в подбарьерной области энергий ниже 6 МэВ специально с целью поиска структурных особенностей, возможность существования которых обсуждалась в некоторых выполненных ранее исследованиях.

Сечение реакции фотоделения вычислялось из данных по выходу реакции путем решения интегрального уравнения (1) методом минимизации направленного расхождения (М.З.Тараско). В работе /9/ полученное сечение реакции фотоделения $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ представлено в виде графика, числовые данные опубликованы в табличном виде в работе /10/.

Числовые данные для исходной кривой выхода были предоставлены ЦДФЭ А.С.Солдатовым.

Экспериментальная кривая выхода (авторские числовые данные) и сечение реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ из работы /9/ приведены соответственно на Рис. 2а и 2в.

2. Оценка сечений реакций с помощью метода редукции

2.1. Краткое описание метода

Как было показано в исследованиях, выполненных ранее /2 - 4, 6, 7/, результат любого фотоядерного эксперимента является, по существу, не искомым сечением σ реакции, а лишь его сверткой с аппаратной функцией W . Поэтому по аналогии с экспериментом на пучке тормозного γ -излучения результат любого эксперимента может быть описан интегральным соотношением (1), если в качестве ядра уравнения использовать не проинтегрированный по углам спектр Шиффа /1/, а соответствующую аппаратную функцию конкретного эксперимента.

В этой связи для эксперимента с любой аппаратной функцией вместо матричного интегрального уравнения (1) может быть рассмотрена /2 - 7/ следующая математическая линейная конечномерная модель « $W\Sigma$ », где Σ - ковариационная матрица, характеризующая погрешность v выхода реакции, задачи определения сечения реакции σ по ее выходу y , искаженному случайным шумом V , в эксперименте, аппаратная функция которого описывается оператором W :

$$y = W\sigma + v. \quad (2)$$

Задача редукции ставится /5/ таким образом: найти оператор R

$$Ry = RW\sigma + Rv = U\sigma + (RW\sigma - U\sigma) + Rv, \quad (3)$$

где U – оператор, описывающий оптимально-моноэнергетическую аппаратную функцию нужного качества, например имеющий правильную гауссианообразную форму с заданной полушириной, строго определяющей величину достигаемого энергетического разрешения, такой чтобы при условии

$$M\|Ry - U\sigma\| = \min \quad (4)$$

вектор

$$\hat{\sigma} = Ry = RW\sigma + Rv = U\sigma + Rv \quad (5)$$

можно было бы интерпретировать как искаженный шумом Rv результат измерения сечения σ с помощью прибора U заданного качества.

Соотношения (3) и (4) позволяют определить /5/ такой оператор R

$$R = U(\Sigma^{-1/2}W)^{-1}\Sigma^{-1/2} = U(W^*\Sigma^{-1}W)^{-1}W^*\Sigma^{-1}, \quad (6)$$

позволяющий оценить искомое сечение $\hat{\sigma} = Ry$ (5) и ковариационную матрицу его погрешностей:

$$G = R\Sigma R^*. \quad (7)$$

Таким образом соотношения (5) и (7) определяют оптимально-моноэнергетические искомые оценки сечения реакции и его погрешностей.

2.2. Результаты оценки с помощью метода редукции

2.2.1. Сечение реакций $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$

Экспериментальная кривая выхода приведена /8/ в том виде, который она имела до введения плавно зависящей от энергии поправки на дозу γ -квантов, тогда как данные об этой поправке не приводятся. Для нормировки абсолютной величины оцененного сечения опубликованная кривая выхода была предварительно отнормирована по зависимости от энергии γ -квантов величин интегральных сечений, рассчитанных по полученному ранее с помощью метода Пенфолда-Лейсса.

Как отмечалось выше, вследствие использования описанной выше разностной процедуры («эффект - фон»), опубликованная /8/ кривая выхода имеет относительно невысокую статистическую точность. В этой связи кривая выхода была обработана путем редукции в модели « $W\Sigma$ » не к реальному прибору U с заданным заранее энергетически разрешением, а к идеальному /5/ прибору I при условиях ограничений на уровень шума. В этой связи энергетическое разрешение (ширина на половине высоты гауссианоподобного оператора U - (3) - (6)) полученного сечения плавно изменяется от величины ~ 200 кэВ при энергии $E_\gamma = 10$ МэВ до ~ 300 кэВ при энергии $E_\gamma = 28$ МэВ.

Оцененное в описанных условиях сечение реакции $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ представлено на Рис. 1б вместе с результатами предварительной оценки к реальному прибору, выполненной ранее /6/ для области энергий до $E_\gamma = 19$ МэВ без предварительной нормировки исходной кривой выхода.

Из данных Рис.1 хорошо видно, что все три сравниваемых сечения (сечение из работы /6/ в области энергий до $E_\gamma = 19$ МэВ) весьма подобны по форме и количеству проявляющихся структурных особенностей. Вместе с тем очевидно, что достигнутое с помощью метода редукции энергетическое разрешение (200 - 300 кэВ) намного превосходит реальное разрешение работы /8/, а погрешности оцененного сечения оказываются в несколько раз меньшими погрешностей сечения /8/. Из Рис. 1б видно, что при достигнутом уровне погрешностей (5 - 10 %) в сечении реакции $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ достаточно надежно и отчетливо проявляются многочисленные структурные особенности. Параметры соответствующих максимумов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Параметры максимумов в оцененном сечении реакции фоторасщепления $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$

Энергия E_γ (МэВ)	12.34	13.08	14.02	15.41	16.80	17.74	19.62	21.25	21.99	22.83	23.63	25.41
Сечение (мб)	4.64	9.19	9.47	14.13	22.18	31.64	25.16	30.67	22.61	23.11	18.98	14.81
Погрешность (мб)	0.76	0.95	1.21	1.27	1.43	1.66	1.69	1.99	2.07	2.13	2.09	2.21

Как отмечалось выше, многие из перечисленных в Таблице 1 структурных особенностей намечены и в сечении /8/ (наблюдаемы и в исходной кривой выхода, Рис. 1а), однако при достигнутом уровне погрешностей сечения ни в коей мере не могли считаться надежно выделенными.

2.2.2. Сечение реакций $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$

Поскольку кривая выхода /9, 10/ была с высокой точностью измерена отдельно в двух пересекающихся энергетических областях, в данном случае, в отличие от предыдущего ($^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$), ставилась задача не минимизации погрешностей, а достижения максимально высокого энергетического разрешения. С этой целью была использована не рассмотренная выше модель редукции с минимизацией погрешностей « $W\Sigma$ », а модель редукции с дополнительным измерением « $WW_I\Sigma_I$ »:

$$\left[\left(\frac{W}{W_1} \right) \left(\frac{\Sigma, 0}{0, \Sigma_1} \right) \right].$$

В такой модели измерение « $W_I\Sigma_I$ » (область энергий $E_\gamma = 4.800 - 7.025$ МэВ, шаг 0.025 МэВ) является дополнительным к основному измерению « $W\Sigma$ » (область энергий $E_\gamma = 5.025 - 8.925$ МэВ, шаг

0.05 - 1.0 МэВ), и решение $\hat{\sigma} = Ry$ определяется не выражениями (6) и (7), а их соответствующими (5) модификациями:

$$R \begin{pmatrix} y \\ y_1 \end{pmatrix} = U(W^* \Sigma^{-1} W + W_1^* \Sigma_1^{-1} W_1)(W^* \Sigma^{-1} y + W_1^* \Sigma_1^{-1} y_1), \quad (8)$$

$$G = tr U(W^* \Sigma^{-1} W + W_1^* \Sigma_1^{-1} W_1)^{-1} U^* \quad (9)$$

Результаты оценки сечения реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ в модели редукции с дополнительным измерением приведены на Рис. 2б. При погрешностях (8 - 14 %) оцененного сечения, сравнимых с погрешностями сечения /9, 10/, было достигнуто разрешение (ширина на половине высоты соответствующего оператора U) ~ 75 кэВ для всей исследованной области энергий.

Оцененное сечение реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ сравнивается как с сечением (Рис. 2в), так и с выходом (Рис. 2а) реакции из работ /9, 10/. Из Рис. 2б видно, что как достаточно надежные и отчетливо проявляющиеся при достигнутом уровне погрешностей (8 - 14 %) оцененного сечения в нем могут быть выделены несколько структурных особенностей. Параметры соответствующих максимумов приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Параметры максимумов в оцененном сечении реакции фотоделения $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$

Энергия E_γ (МэВ)	6.11	6.35	6.55	6.87	7.35	7.67	7.91	8.31	8.59
Сечение (мб)	4.98	8.26	8.03	5.92	5.45	5.33	6.23	5.94	6.82
Погрешность (мб)	0.41	0.61	0.62	0.56	0.73	0.57	0.59	1.18	0.64

Обращает на себя внимание, что особенность при энергии $E_\gamma = 6.03$ является относительно слабой (в сечении реакции /9, 10/ также отмечена слабая особенность при $E_\gamma = 6.04$ МэВ), а максимумы при энергиях $E_\gamma = 6.35$ и 6.55 МэВ являются результатом расщепления основного максимума (максимум при $E_\gamma = 6.35$ МэВ /9, 10/).

Следует отметить, что все перечисленные в Таблице 2 особенности оцененного сечения в надбарьерной области энергий (прежде всего при энергиях $E_\gamma = 7.91, 8.31$ и 8.59 МэВ) «невооруженным глазом» просматриваются в исходной кривой выхода (Рис 2а). Их отсутствие в сечении /9, 10/, по-видимому, обусловлено реально невысоким энергетическим разрешением использованного метода «развертки» сечения из кривой выхода. В работе /9/ отмечалось, что примененный итерационный метод минимизации направленного расхождения выявляет лишь основные особенности энергетической зависимости сечения реакции: «При этом происходит, скорее, сглаживание решения, нежели его «раскачка»».

Следует отметить, что самый заметный из максимумов оцененного сечения в надбарьерной ($E_\gamma > 6$ МэВ) области энергий при $E_\gamma = 7.91$ МэВ достаточно отчетливо проявляется в сечениях реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$, исследованных различными методами в ряде других работ, например /11, 12/. В работе /13/, выполненной с весьма высоким энергетическим разрешением при использовании пучков моноэнергетических γ -квантов из реакций радиационного захвата протонов (p, γ) различными ядрами-

мишенями, обнаружено достаточно отчетливое расщепление ($E_\gamma = \sim 6.2 - 6.3$ и $\sim 6.5 - 6.6$ МэВ) основного максимума сечения.

Заключение

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

Исследована промежуточная структура сечений реакций фоторасщепления $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ и фотоделения $^{232}\text{Th}(\gamma, \text{f})$.

Кривые выхода реакций $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ и $^{232}\text{Th}(\gamma, \text{f})$, измеренные ранее с помощью пучков тормозного γ -излучения, обработаны с помощью современных моделей метода редукции. Без решения интегрального уравнения типичной неустойчивой обратной задачи «развертки» сечения из выхода реакции получены оптимально-моноэнергетические (для реакции $^{34}\text{S}(\gamma, \text{sn})$ достигнуто энергетическое разрешение $\sim 200 - 300$ кэВ, для реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, \text{f}) - 75$ кэВ) оценки сечений обеих реакций с вполне допустимым (типичным для экспериментов подобного типа) уровнем погрешностей $\sim 10\%$.

Определены параметры большого количества обнаруженных структурных особенностей сечений обеих реакций. Большинство из них наблюдались, но не могли считаться надежно выделенными в соответствующих экспериментальных сечениях реакций вследствие невысокого реального разрешения использованных методов обработки выходов реакций и низкой статистической точности рассчитанных сечений, хотя многие из них достаточно отчетливо просматриваются в самих исходных кривых выхода.

Установлено, что многие из структурных особенностей оцененных в настоящей работе сечений наблюдались ранее в экспериментах, выполненных другими методами, например с помощью пучков моноэнергетических фотонов из реакций радиационного захвата протонов.

Работа выполнялась в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер (ОЭПВАЯ) НИИЯФ МГУ и частично финансировалась Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в рамках Исследовательского контракта № 8839. Авторы выражают благодарность А.С.Солдатову (ГНЦ «Физико-энергетический институт») за предоставленные числовые данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schiff L.I. // Phys.Rev. 1951. V. 83. P. 252.
2. Efimkin N.G., Varlamov V.V. The Method of Reduction as Photonuclear Data Evaluation Tool. International Symposium on Nuclear Data Evaluation Methodology (USA BNL, 12 - 16 October 1992). // World Scientific Press, ISBN 981-02-1285-2, 1993, p. 585.
3. Варламов В.В., Ефимкин Н.Г., Ишханов Б.С., Сапуненко В.В // Вопр. атомной науки и техники. Сер.: Ядерные константы. 1993. Вып. 1. С. 52.
4. Varlamov V.V., Efimkin N.G., Lenskaja N.A., Chernjaev A.P. The Investigation of the Reasons for Discrepancies in Results of Photonuclear Experiments at the Beams of Bremsstrahlung and Quasimonoenergetic Gamma-Quanta. The Problem of Interpretation. // MSU INP Preprint–89–66/143. М., 1989.
5. Пытьев Ю.П. Методы анализа и интерпретации эксперимента. М.: 1990. Изд-во МГУ.
6. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Бобышев В.М. и др. // Укр. физ. журн. 1987. Т. 32. № 12. С. 1799.
7. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Ефимкин Н.Г., Черняев А.П.. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55. С. 1021.
8. Assafiri Y.I., Egan C.F., Thompson M.N. // Nucl.Phys.A 1984. V. 413. № 2. P. 416.
9. Смиренкин Г.Н., Солдатов А.С. // ЯФ. 1996. Т. 59. № 2. С. 203.
10. Солдатов А.С. // "Вопр. атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы". 1997. Вып. 1–2. С. 8.
11. Yester M.V., Anderl R.A., Morrison R.C. // Nucl.Phys.A 1973. V. 206. P. 593.
12. Mafra O.Y., Cezar M.F., Renner C., Goldemberg J. // Nucl.Phys.A 1974. V. 236. P. 1.
13. Zhang H.Z., Yeh T.R., Lancman H. // Phys.Rev. 1986. V. C34. P. 1397.

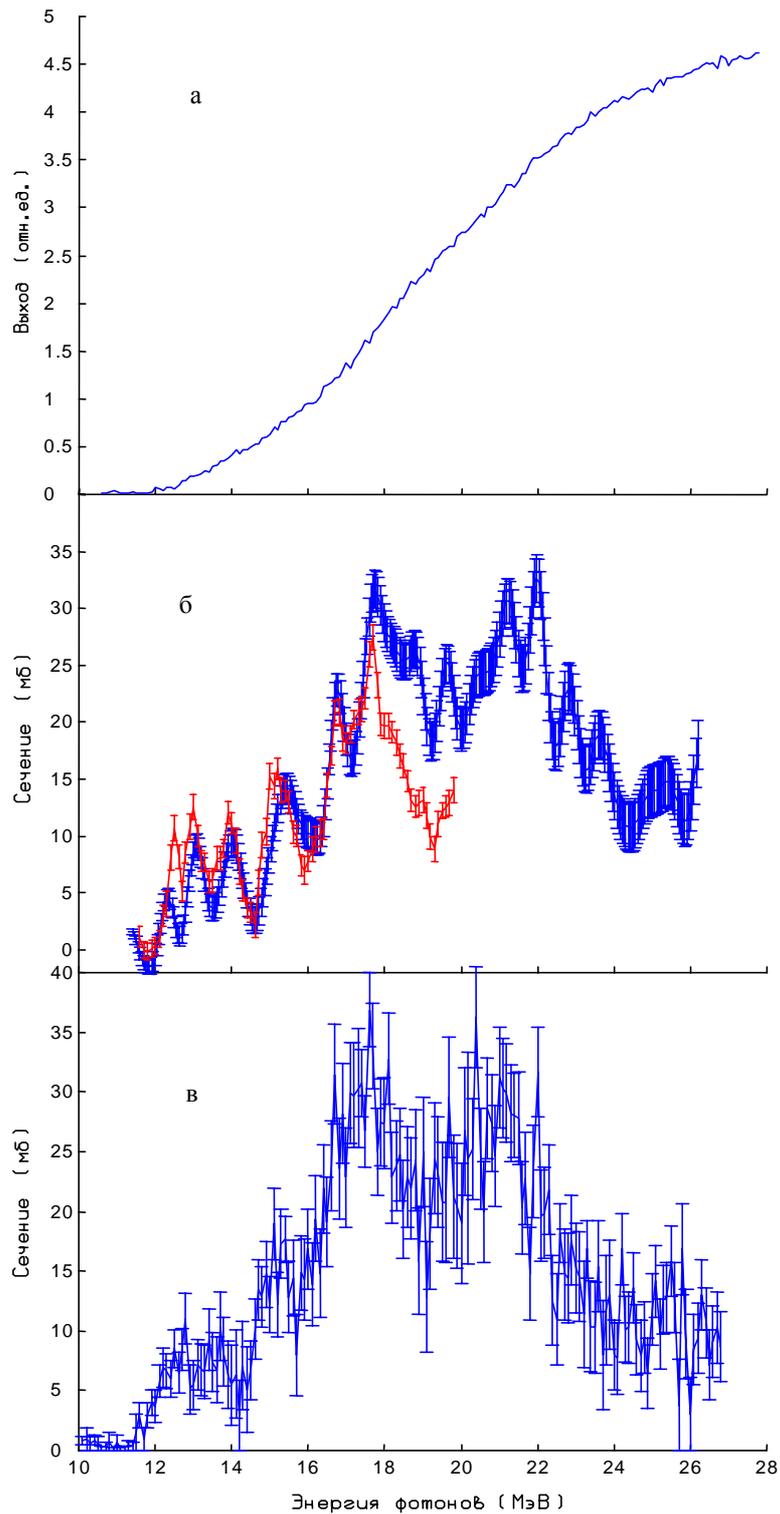


Рис.1. Сравнение оцененного сечения реакции $^{34}\text{S}[(\gamma,n) + (\gamma,np) + (\gamma,2n)]$ с исходными данными:

- а - экспериментальная кривая выхода /8/;
- б - сечение, оцененное с помощью метода редукции (тонкая линия - предварительные ненормированные данные работы /6/);
- в - сечение, полученное с помощью метода Пенфолда-Лейсса /8/.

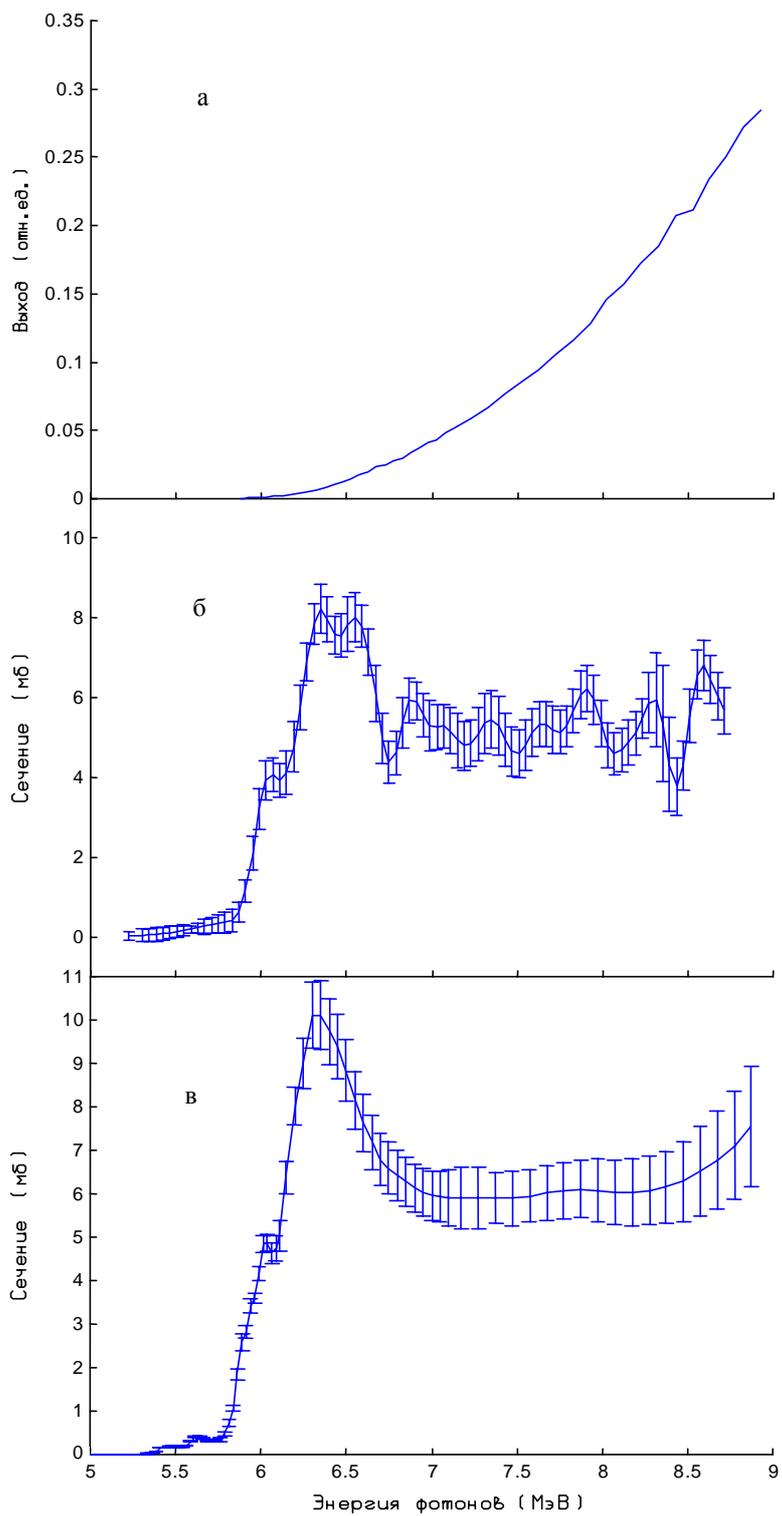


Рис.2. Сравнение оцененного сечения реакции $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ с исходными данными:

- а -экспериментальная кривая выхода /9, 10/;
- б -сечение, оцененное с помощью метода редукиции;
- в -сечение, полученное с помощью метода минимизации направленного расхождения /9, 10/.

V.V.Varlamov, D.S.Rudenko, M.E.Stepanov

**$^{34}\text{S}(\gamma,\text{sn})$ AND $^{232}\text{Th}(\gamma,\text{f})$ REACTION CROSS SECTION EVALUATION
USING METHOD OF REDUCTION**

The photodesintegration reaction $^{34}\text{S}(\gamma,\text{sn})$ and photofission reaction $^{232}\text{Th}(\gamma,\text{f})$ cross section intermediate structure has been investigated. The energy dependencies of the $^{34}\text{S}[(\gamma,\text{n}) + (\gamma,\text{np}) + (\gamma,2\text{n})]$ reaction cross section for the initial γ -quanta energies $E_\gamma = 10 - 28$ MeV and the $^{232}\text{Th}(\gamma,\text{f})$ reaction cross section for $E_\gamma = 4.8 - 8.9$ MeV have been evaluated using the new advanced version of the method of reduction. The reduction models of the uncertainty minimization and of additional information have been used correspondingly. The $^{34}\text{S}(\gamma,\text{sn})$ reaction cross section has been obtained for energy resolution of about 200 - 300 MeV and statistical uncertainty $\sim 5 - 10$ % and $^{232}\text{Th}(\gamma,\text{f})$ - for correspondingly 75 keV and $\sim 8 - 14$ %.

D.V.Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics

M.V.Lomonosov Moscow State University

119899 Moscow, Russia