

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Давыдов Александр Иванович

**НОВЫЕ СЕЧЕНИЯ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ, ОЦЕНЕННЫЕ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДОСТОВЕРНОСТИ**

Специальность 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика
высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на Кафедре общей ядерной физики Физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Варламов Владимир Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Зеленская Наталья Семеновна**,
доктор физико-математических наук, профессор,
МГУ имени М.В. Ломоносова,
НИИЯФ имени Д.В.Скобельцына,
главный научный сотрудник

Камерджиев Сергей Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный Исследовательский Центр
«Курчатовский институт»,
ведущий научный сотрудник

Джилавын Леонид Завенович,
доктор физико-математических наук,
Институт ядерных исследований РАН,
ведущий научный сотрудник.

Защита диссертации состоится 20 октября 2023 г. в 15.00 на заседании диссертационного
совета МГУ.013.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по
адресу: Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 5 (19-й корпус НИИЯФ
МГУ), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ
имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале:
<https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.2/2605>

Автореферат разослан «___» _____ 2023.г.

Е-mail (диссертационного совета): galan_lidiya@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.2
кандидат физ.-мат. наук



Галанина Лидия Ивановна

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена решению проблем достоверности сечений фотоядерных реакций, обусловленных значительными систематическими расхождениями полученных данных по абсолютной величине. Для исследования расхождений экспериментальных сечений парциальных фотонейтронных реакций ($\gamma, 1n$), ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$) используются физические критерии достоверности, не зависящие от способов получения данных. С помощью экспериментально-теоретического метода оценки, основанного на таких критериях, получены [1–23] новые достоверные сечения реакций для ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{127}I , ^{165}Ho , ^{181}Ta , $^{206,207}\text{Pb}$.

Актуальность темы исследования

Исследования позволяют решить известную проблему существенных систематических расхождений между сечениями парциальных реакций из разных экспериментов, абсолютное большинство которых получено на пучках квазимоноэнергетических фотонов в Лоуренсовской Ливерморской национальной лаборатории США в Ливерморе и Центре ядерных исследований Франции в Сакле [24–28]. Сечения реакций ($\gamma, 1n$) и ($\gamma, 2n$), полученные при использовании метода разделения фотонейтронов по множественности для 19 ядер (^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U) в обеих лабораториях, до 100% величины разнонаправленно отличаются друг от друга. Актуальными являются вопросы о том, какие именно данные являются достоверными, и являются ли они таковыми вообще. Расхождения данных [27–31] были предметом сравнительных исследований [32–36]. В связи с разнонаправленностью расхождений рекомендации по согласованию данных противоречили друг другу: уменьшались расхождения по одной парциальной реакции. Но увеличивались по другой.

С целью разработки метода анализа достоверности экспериментальных сечений, не зависящего от способа их получения, были предложены физические критерии достоверности данных по сечениям парциальных реакций и экспериментально-теоретический метод оценки сечений таких реакций, основанный на совместном использовании как экспериментальных данных, так и результатов теоретических расчетов, не зависящих от проблем экспериментального определения множественности фотонейтронов [37,38]. Для большого числа ядер от ^{115}In до ^{209}Bi (например, [37–51]) с использованием Комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФЯР) [52,53] были оценены сечения реакций, удовлетворяющие физическим критериям и свободные от систематических погрешностей метода разделения фотонейтронов по множественности. Было установлено следующее:

- сечения реакций ($\gamma, 1n$), ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$), полученные в Ливерморе и/или в Сакле, в той или иной степени не соответствуют физическим критериям достоверности;
- новые оцененные сечения реакций, удовлетворяющие физическим критериям, существенно отличаются от экспериментальных сечений, и эти отличия обусловлены систематическими погрешностями экспериментального метода определения множественности нейтронов по их энергии;
- расхождения сечений реакций, полученных в разных лабораториях, между собой и с оцененными сечениями имеют индивидуальный характер, что означает особую важность и актуальность настоящей работы.

Предмет и объект исследований.

Предмет исследований – существенные расхождения результатов разных фотоядерных экспериментов. Объекты исследований – систематические погрешности сечений фотонейтронных реакций, выявляемые при использовании физических критериев достоверности.

Цели и задачи работы

Основными целями и задачами диссертационной работы являлись следующие:

- анализ с использованием физических критериев достоверности экспериментальных сечений парциальных фотонейтронных реакций на 22 ядрах;
- дополнение экспериментально-теоретического метода оценки достоверных сечений реакций детальным анализом разностей между оцененными и экспериментальными сечениями, позволяющим определять причины их систематических погрешностей;
- оценка с помощью экспериментально-теоретического метода новых сечений реакций, свободных от систематических погрешностей экспериментальных сечений;
- включение новых оцененных сечений фотонейтронных реакций в фонд международной электронной базы данных по ядерным реакциям [5].

Положения, выносимые на защиту

1. Расхождения результатов разных экспериментов обусловлены присутствием в них систематических погрешностей разных типов.
2. Экспериментальные сечения парциальных фотонейтронных реакций, полученные с помощью метода разделения нейтронов по множественности, физическим критериям достоверности не удовлетворяют.
3. Экспериментально-теоретический метод оценки позволяет получить достоверные сечения парциальных реакций.
4. Новые оцененные сечения реакций для ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{127}I , ^{165}Ho , ^{181}Ta , $^{206,207}\text{Pb}$ удовлетворяют физическим критериям.

Научная новизна работы

Проанализированы систематические расхождения результатов разных фотоядерных экспериментов вне зависимости от способов их получения. С помощью экспериментально-теоретического метода оценки получены новые сечения парциальных фотонейтронных реакций для 22 ядер, удовлетворяющие физическим критериям достоверности данных, определены причины проявляющихся в них систематических погрешностей. Новые оцененные сечения реакций позволяют существенно продвинуться в решении проблемы систематических расхождений результатов разных фотонейтронных экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость

Новые оцененные достоверные сечения фотонейтронных реакций являются важными для широкого класса исследований процессов взаимодействия γ -квантов с ядрами и имеют большую практическую значимость: будучи включены в международную электронную базу данных по ядерным реакциям, они используются в исследованиях и разнообразных приложениях. Расхождения оцененных и экспериментальных сечений реакций ставят на повестку дня вопрос о достоверности многих оценок физических эффектов, выполненных на основе экспериментальных сечений. Примененный подход и полученные результаты могут использоваться при анализе достоверности данных по другим ядерным реакциям, в тех случаях, когда расхождения экспериментальных данных существенно превосходят их статистические точности. Полученные результаты могут быть использованы в таких организациях, как НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ИЯИ РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, в других российских и международных ядерно-физических научных центрах, а также в курсах общей ядерной физики университетов и других учебных заведений.

Методология и методы исследования

Достоверные сечения фотонейтронных реакций получены с помощью экспериментально-теоретического метода оценки [37,38], в котором используются экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов [52,53], не зависящие от проблем экспериментального разделения фотонейтронов по множественности.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- строгостью использованных физических критериев достоверности;
- использованием результатов теоретических расчетов в рамках хорошо протестированной модели;
- согласием оцененных сечений с данными, полученными методами, в которых разделение реакций разной множественности осуществляется достоверно.

Личный вклад автора

Представленные в настоящей работе результаты получены либо самим автором, либо при его определяющем участии. Во всех опубликованных работах вклад автора является основополагающим.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на:

- международных конференциях “International Conference on Nuclear Data for Science and Technology” ND2016 (Бельгия, Брюгге), ND2019 (Китай, Пекин);
- международных конференциях ЯДРО–2015-2021;
- конференциях «Ломоносовские чтения», 2016-2022 гг.;
- конференциях «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 2019, 2020, 2021 гг.

Результаты опубликованы в 23 статьях, в том числе в 20 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus [1-23].

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя ВВЕДЕНИЕ, четыре ГЛАВЫ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ, СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ПРИЛОЖЕНИЕ, 33 рисунка, 20 таблиц.

Краткое содержание работы

Во **Введении** кратко описаны фотоядерные эксперименты разного типа и имеющиеся между их результатами существенные систематические расхождения, представлены методы, использованные ранее для учета этих расхождений, обоснована необходимость и актуальность исследований, выполненных в настоящей работе, сформулированы их основные цели и задачи. Описан новый подход к проблемам достоверности результатов фотоядерных экспериментов, новизна и научная важность.

Глава 1 посвящена описанию экспериментального метода получения абсолютного большинства сечений реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов – метода разделения фотонейтронов по множественности, основанного на измерении их энергий.

Квазимоноэнергетические фотоны с энергией

$$E_{\gamma} \approx E_{e^{+}} + 0.76 \text{ МэВ} \quad (1)$$

получались [25,34] в процессах аннигиляции на лету релятивистских позитронов с энергией E_{e+} . Спектр фотонов – сумма моноэнергетической линии от аннигилирующих позитронов и непрерывного спектра от их тормозного излучения. Эффект воздействия на ядро «квазимоноэнергетических» фотонов выделялся в 3 этапа: 1) измерение выхода Y_{e+} (фотоны от аннигиляции и тормозного γ -излучения позитронов), 2) измерение выхода Y_{e-} (фотоны от тормозного излучения электронов), 3) разность

$$Y(E) = Y_{e+}(E) - Y_{e-}(E) \approx \sigma(E), \quad (2)$$

где выходы Y_{e+} и Y_{e-} – свертки искомого сечения реакции $\sigma(E)$ и фотонных спектров $W_{e+}(E_{jm}, E)$ и $W_{e-}(E_{jm}, E)$ типа

$$Y(E_{jm}) = \frac{N(E_{jm})}{\varepsilon D(E_{jm})} = \alpha \int_{E_{th}}^{E_{jm}} W(E_{jm}, E) \sigma(E) dE, \quad (3)$$

где $\sigma(E)$ – значение при энергии фотонов E сечения реакции с порогом E_{th} , $W(E_{jm}, E)$ – спектр фотонов с верхней границей E_{jm} .

Множественности реакции в предположении о том, что нейтроны из реакции $(\gamma, 1n)$ имеют энергии, большие, чем из реакции $(\gamma, 2n)$, определялись по времени замедления нейтронов из реакций до тепловой энергии в специальных “slowing-down” детекторах между импульсами от линейного ускорителя. В Сакле замедлителем и детектором служил жидкий сцинтиллятор большого объема. Детектор имел достаточно высокий уровень фона, приводивший к большим неопределенностям процессов его вычитания, и был предрасположен [26] к завышению вклада нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$. В Ливерморе использовалось большое количество газоразрядных $^{10}\text{BF}_3$ -счетчиков в парафиновом замедлителе, объединенных в концентрические кольца разных диаметров. Нейтроны больших энергий из реакции $(\gamma, 1n)$ должны были захватываться счетчиками внешних колец, но вследствие процессов многократного рассеяния нейтронов имели некоторую вероятность возвращения к счетчикам внутренних колец, что приводило к завышению вклада реакции $(\gamma, 2n)$.

Глава 2 посвящена описанию систематических расхождений между экспериментальными сечениями реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ и метода [32–36], использованного ранее для приведения их в соответствие друг с другом.

Сечения $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$, полученные и в Ливерморе и в Сакле для ядер ^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U , разнонаправленно и существенно отличаются друг от друга: средние отношения интегральных сечений $\langle R = \sigma_{\text{инт}} / \sigma_{\text{интЛ}} \rangle$ равны $\langle R(1n) \rangle = 1.08$ и $\langle R(2n) \rangle = 0.83$. Был предложен [32,33] метод взаимной корректировки $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$, основанный на данных активационного эксперимента. Сечение реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{179}\text{Ta}$ сравнивалось с сечением $\sigma^{\text{актив}}(\gamma, 2n)$, пересчитанным с учетом спектра виртуальных фотонов из сечения реакции $\sigma^{\text{актив}}(e, 2n)$

$$\sigma^{\text{актив}}(e, 2n) = 1/2(\sigma^{\text{актив}}(e, xn) - \sigma^{\text{актив}}(e, 1n)). \quad (4)$$

Было установлено, что $\sigma^{\text{актив}}(\gamma, 2n)$ согласуется с $\sigma(\gamma, 2n)$ Ливермора, но расходится с $\sigma(\gamma, 2n)$ Сакле. На основании данных по сечению выхода нейтронов

$$\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots \quad (5)$$

«плохие» $\sigma(\gamma, 1n)$ Сакле пересчитывались, и «лишние» нейтроны перемещались в $\sigma(\gamma, 2n)$ [32,33,35,36]. Результат сравнения данных для одного ядра вызывал сомнение: в «хороших» сечениях $\sigma(\gamma, 1n)$ Ливермора для многих ядер (например, ^{65}Cu , $^{78,80}\text{Se}$, $^{91,94}\text{Zr}$, ^{116}Sn , ^{153}Eu), имеется [25–28] значительное количество физически запрещенных отрицательных значений. Особую актуальность приобрела задача разработки метода

оценки сечений реакций, удовлетворяющих физическим критериям достоверности, не зависящего от конкретных способов их получения.

Глава 3 посвящена описанию такого метода оценки сечений парциальных фотонейтронных реакций, онованного на физических критериях.

В качестве физических критериев достоверности данных использованы отношения

$$F_i = \sigma(\gamma, in) / [\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots] \quad (6)$$

сечений парциальных реакций $\sigma(\gamma, in)$, где $i = 1, 2, 3$, к сечению выхода нейтронов (5) [37,38]. Они позволяют делать заключения о присутствии в экспериментальных сечениях систематических погрешностей. Отношения F_1 при физически достоверных условиях не могут превышать значения 1.00, F_2 – значения 0.50, F_3 – 0.33, F_4 – 0.25, F_5 – 0.20, F_6 – 0.17, F_7 – 0.14 и т. д. Превышения означают, что в эксперименте разделение нейтронов между каналами различной множественности выполнено с систематическими погрешностями, а, следовательно, полученные сечения являются физически недостоверными. Было показано [37–51], что в случаях многих ядер экспериментальные сечения парциальных реакций физическим критериям достоверности в той или иной степени не удовлетворяют. На Рис. 1 представлены типичные примеры сравнения отношений $F_{1,2}^{\text{эксп}}$ для ядер ^{116}Sn и ^{208}Pb , полученных по данным [54–37] и $F_{1,2}^{\text{теор}}$ [52,53].

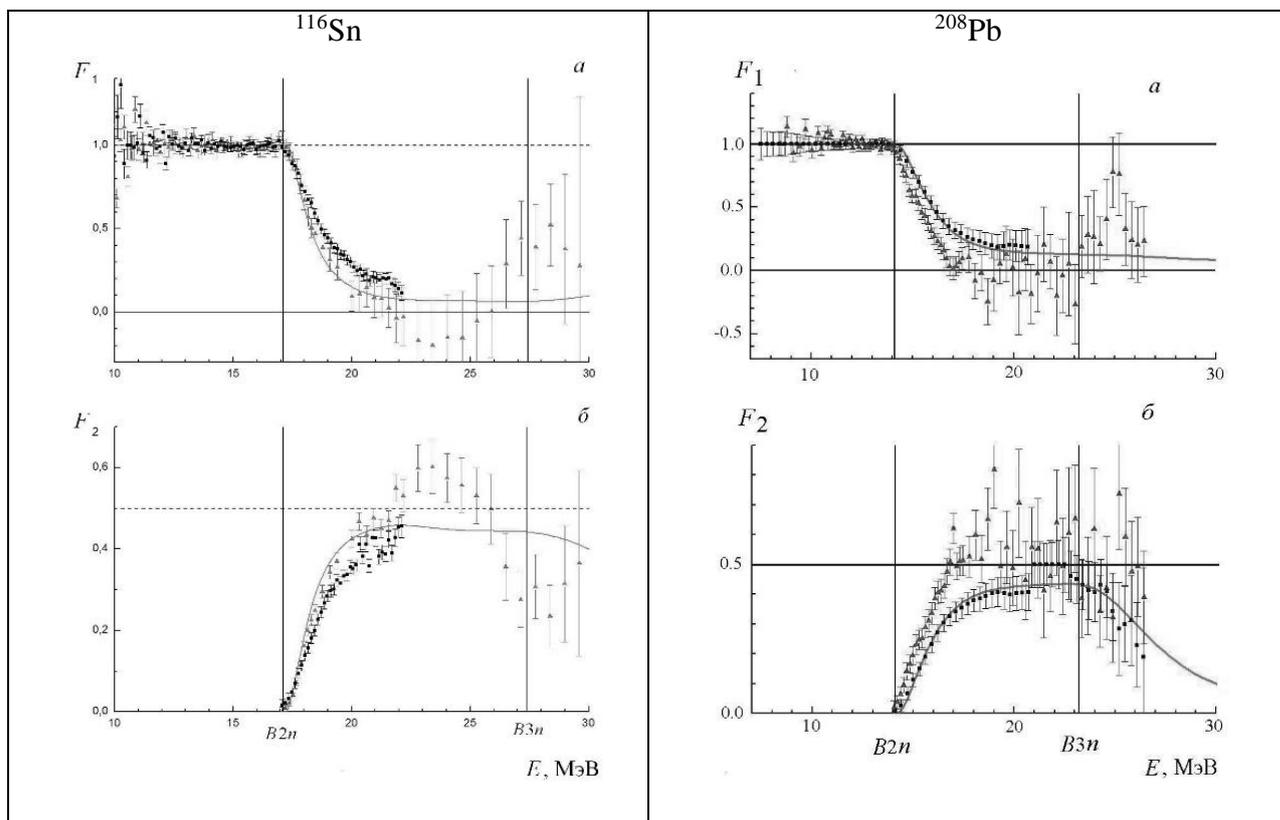


Рис. 1. Отношения $F_{1,2}^{\text{эксп}}$ для ядра ^{116}Sn (слева) и ^{208}Pb (справа). Данные Ливермора [54,55] – треугольники, Сакле [56,57] – квадраты. $F_{1,2}^{\text{теор}}$ – линии (КМФЯР [52,53]).

Сравнение $F_i^{\text{эксп}}$ и $F_i^{\text{теор}}$ позволяет делать выводы о достоверности экспериментальных данных в связи с тем, что отношения $F_{1,2,3}^{\text{теор}}$ (6), имеют определенные и ясные физические закономерности:

– $F_1^{\text{теор}}$ в области энергий E_γ до порога B_{2n} реакции $(\gamma, 2n)$ равны 1, при бóльших энергиях уменьшаются ($\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 1n)$ уменьшается, $\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 2n)$ возрастает);

– $F_2^{\text{теор}}$ в области $E_\gamma < B2n$ равны 0, при больших энергиях возрастают, снизу приближаются к физическому пределу “const = 0.50”, его не достигая, и при $E_\gamma > B3n$ уменьшаются (в знаменателе отношения (6) появляется вклад $3\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 3n)$).

Полученные данные для ядра ^{65}Cu [2] представлены далее на Рис. 2. Сравнения $F_{1,2}^{\text{эксп}}$ и $F_{1,2}^{\text{теор}}$ свидетельствуют о том, что сечения реакций для ядра ^{65}Cu , как и для ^{116}Sn и ^{208}Pb , полученные в Ливерморе [54,55,58,59], определенно являются недостоверными, поскольку в широких областях E_γ наблюдается большое количество физически запрещенных отрицательных отношений $F_1^{\text{эксп}}$, а также отношений $F_2^{\text{эксп}} > 0.50$. К достоверности данных Сакле [56,57] имеются претензии [50,51] в связи с большими расхождениями отношений $F_{1,2}^{\text{эксп}}$ и $F_{1,2}^{\text{теор}}$.

Выполненный для большого числа ядер анализ [37–51] показал, что во многих случаях экспериментальные сечения парциальных реакций не являются достоверными (очевидные признаки несоответствия физическим критериям). Систематические погрешности экспериментальных сечений реакций и их расхождения между собой и с оцененными сечениями в случаях конкретных ядер имеют индивидуальный характер, что требует проведения анализа достоверности экспериментальных сечений реакций для каждого ядра.

Для оценки сечений реакций, удовлетворяющих физическим критериям достоверности, использован экспериментально-теоретический метод [37,38], в котором сечения реакций $\sigma(\gamma, in)$ получаются с помощью соотношения

$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in) = F_i^{\text{теор}} \times \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn), \quad (7)$$

в котором как сечение выхода нейтронов $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, содержащее (5) вклады от всех парциальных реакций, так и отношения $F_i^{\text{теор}}$ (6), рассчитанные в КМФЯР [52,53], не зависят от особенностей экспериментального метода разделения нейтронов по множественности.

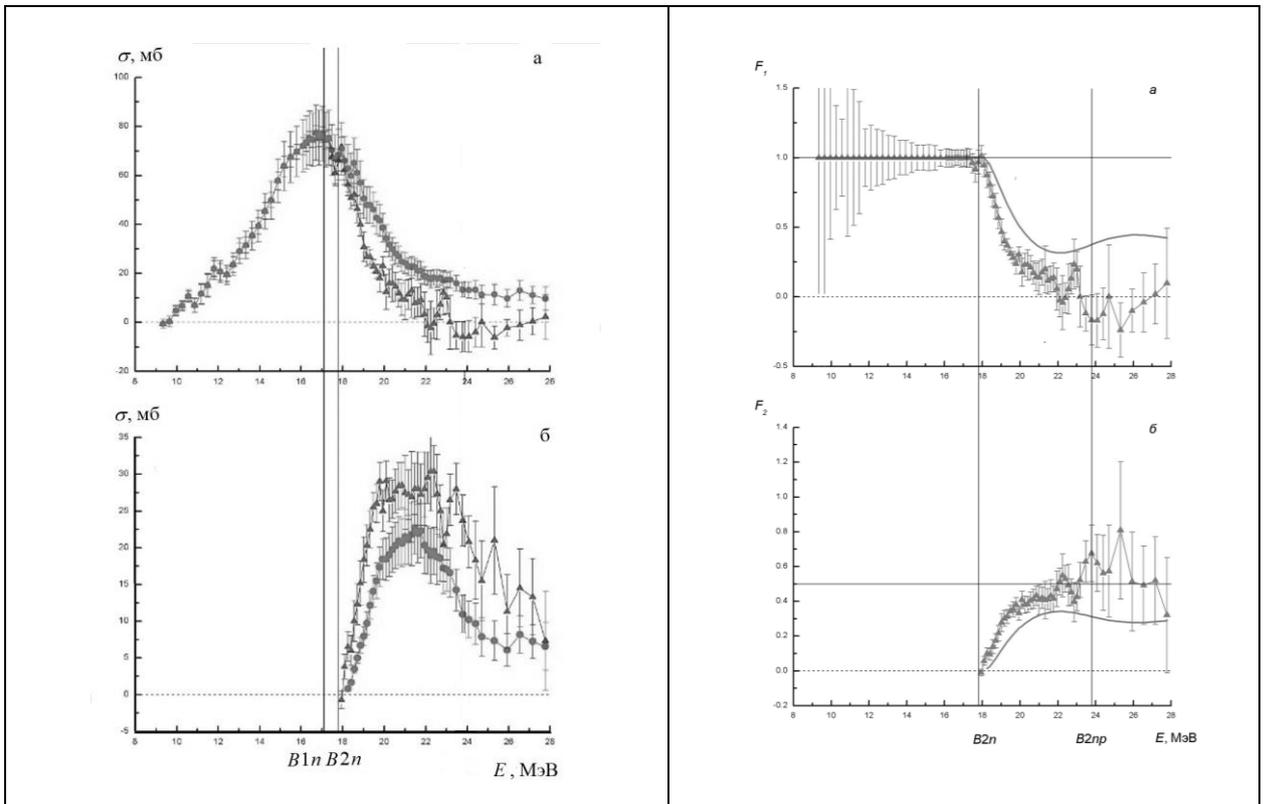


Рис. 2. Оцененные и экспериментальные сечения и отношения F_i для ядра ^{65}Cu .

Слева: оцененные ([2] – кружки) и экспериментальные ([58] – треугольники) сечения реакций: а- $\sigma(\gamma, 1n)$, б- $\sigma(\gamma, 2n)$;

справа: экспериментальные ([58] – треугольники) и теоретические ([52,53] – линии) отношения F_1 (а) и F_2 (б).

На Рис. 2 представлен типичный случай сравнения оцененных и экспериментальных сечений реакций (ядро ^{65}Cu), а также соответствующих отношений $F_i^{\text{эксп}}$ и $F_i^{\text{теор}}$.

В областях энергий E_γ , в которых реакции $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ конкурируют между собой, оцененные и экспериментальные сечения реакций существенно различаются, а отношения $F_i^{\text{эксп}}$ свидетельствуют о недостоверности данных.

Как отмечалось, в случаях конкретных ядер расхождения имеют индивидуальный характер. Так, превышение оцененного сечения $\sigma(\gamma, 1n)$ над экспериментальным составляет в случае ядра ^{63}Cu 13%, ядра ^{65}Cu 34% [2], ядра ^{80}Se 15% [2], а обратные превышения экспериментальных $\sigma(\gamma, 2n)$ над оцененными сечениями равны 96%, 64% и 19%.

С помощью описанного метода (7) ранее были оценены сечения реакций для ядер ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{129}Xe , ^{133}Cs , ^{138}Ba , ^{139}La , $^{140,142}\text{Ce}$, ^{141}Pr , $^{145,148}\text{Nd}$, ^{153}Eu , ^{159}Tb , ^{160}Gd , ^{181}Ta , ^{186}W , $^{186,188,190,192}\text{Os}$, ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{209}Bi .

В настоящей работе оценки были выполнены для ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{127}I , ^{165}Ho , ^{181}Ta , $^{206,207}\text{Pb}$.

Глава 4 посвящена описанию основных результатов, полученных для указанных выше 22 ядер. Выполнены анализ достоверности экспериментальных данных, оценка сечений фотонейтронных реакций, удовлетворяющих физическим критериям и определение причин систематических погрешностей экспериментальных сечений.

Установлено, что в случаях ядер $^{76,78,80,83}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ и ^{103}Rh основной причиной обсуждаемых расхождений экспериментальных и оцененных сечений $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$ является недостаток использованного метода определения множественности фотонейтронов по их энергии. Приведенные на Рис. 2 результаты сравнения оцененных и экспериментальных сечений реакций с соответствующими отношениями F_i для ядра ^{65}Cu [2] являются типичными примерами обсуждаемых расхождений и свидетельствуют о том, что эти расхождения обусловлены недостоверным перемещением некоторого количества нейтронов из одной реакции в другую. В случае ядра ^{65}Cu , как и в случаях, например, $^{78,80}\text{Se}$, $^{91,94}\text{Zr}$, ^{116}Sn , ^{153}Eu [25–28], в результате такого недостоверного изъятия нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$ её сечение уменьшается вплоть до появления в нем физически запрещенных отрицательных значений, а сечение $\sigma(\gamma, 2n)$ возрастает до величин, для которых $F_2^{\text{эксп}} > 0.50$.

Недостоверное распределение нейтронов между реакциями определено подтверждается разностями между оцененными и экспериментальными сечениями реакций

$$\Delta\sigma = \sigma^{\text{оцен}} - \sigma^{\text{эксп}}. \quad (8)$$

Разности $\Delta\sigma$ (8) между оцененными и экспериментальными сечениями реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ для ядра ^{92}Zr приведены на Рис. 3.

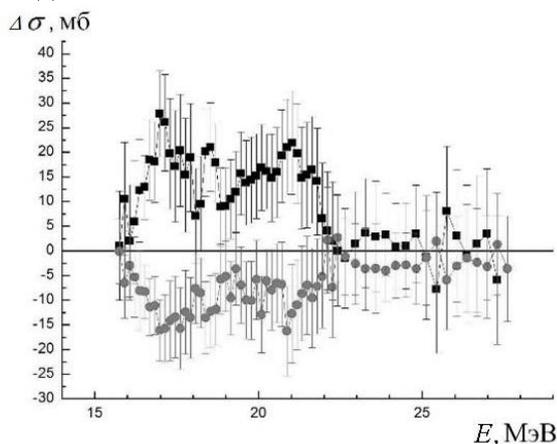


Рис. 3. Сравнение разностей ($\Delta\sigma(1n)$ – квадраты и $\Delta\sigma(2n)$ – кружки) между оцененными и экспериментальными сечениями реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на ядре ^{92}Zr [3].

Разность $\Delta\sigma(1n)$ практически полностью соответствует обратной разности $-\Delta\sigma(2n)$: многие нейтроны из реакции $(\gamma, 1n)$ недостоверно интерпретированы как нейтроны из реакции $(\gamma, 2n)$. Это обусловлено тем, что нейтроны из реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ имеют заметно различающиеся энергии в том случае, когда конечное ядро реакции $(\gamma, 1n)$ образуется в основном состоянии. При образовании этого ядра в возбужденных состояниях вылетающие нейтроны имеют энергии меньшие и близкие к энергиям обоих нейтронов из реакции $(\gamma, 2n)$. Это проиллюстрировано результатами расчетов в КМФЯР энергетических спектров фотонейтронов из ядер ^{141}Pr и ^{186}W [48]. Формы и средние энергии спектров, рассчитанных для различных энергий (15, 20, 24, 30 и 40 МэВ) возбуждения ядер, весьма близки, а их основные максимумы расположены приблизительно в одной области энергий $\sim 0.7\text{--}1.0$ МэВ.

Аналогичные данные получены для остальных из упомянутых выше ядер ^{75}As [4], $^{76,78,82}\text{Se}$ [1], ^{89}Y [5], $^{90,92,94}\text{Zr}$ [3], ^{103}Rh [6] и ^{165}Ho [6].

В случаях ядер ^{51}V [7,21], ^{59}Co [8], $^{58,60}\text{Ni}$ [9–11] и $^{63,65}\text{Cu}$ [2] проявляются систематические погрешности иного типа, обусловленные отсутствием учета вклада двухнуклонной реакции $(\gamma, 1n1p)$. При прямой регистрации нейтронов в обсуждаемых экспериментах вместо сечения $\sigma(\gamma, 1n)$ реально получалась сумма сечений $\sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 1n1p)$. В относительно легких ядрах $\sigma(\gamma, 1n1p)$ по энергетическому положению и амплитуде сравнимо с $\sigma(\gamma, 2n)$, и реакция $(\gamma, 1n1p)$ является дополнительным источником неопределенности процедуры определения множественности: распределение энергии возбуждения исследуемого ядра между нуклонами в реакции $(\gamma, 1n1p)$ приблизительно такое же, как в реакции $(\gamma, 2n)$, но в первой множественности равно 1, а во второй – 2.

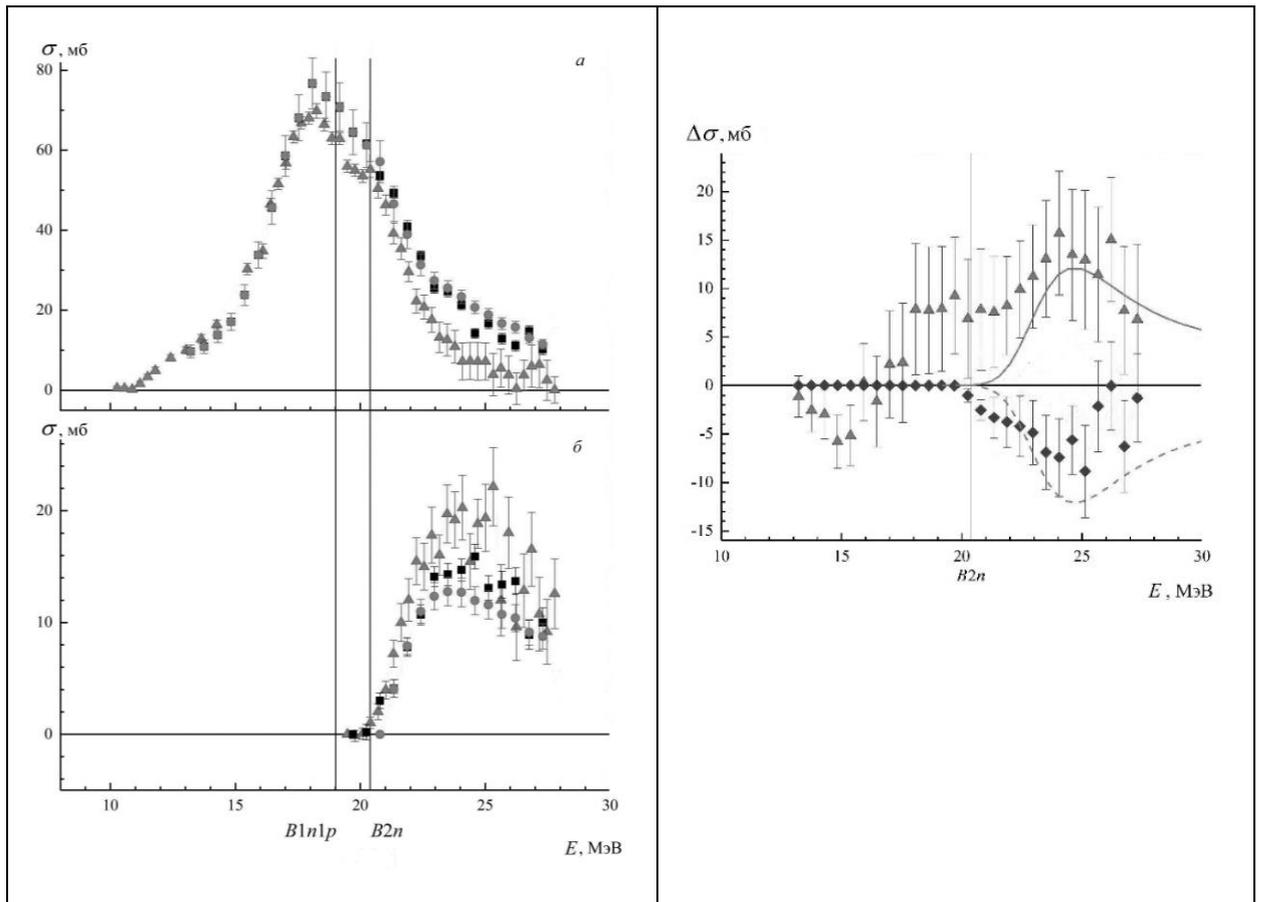


Рис. 4. Слева – сравнение оцененных [7,21] и экспериментальных [60] сечений реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ для ядра ^{51}V . Справа - сравнение разностей $\Delta\sigma(7)$ между оцененными [7,21] и экспериментальными [60] сечениями реакций $(\gamma, 1n)$ – треугольники и $(\gamma, 2n)$ - ромбы с результатами расчетов (линии) сечения реакции $(\gamma, 1n1p)$ в КМФЯР [52,53].

На Рис. 4 видно, что в случае ядра ^{51}V разности $\Delta\sigma$ (8) практически полностью аппроксимируются теоретически рассчитанными в КМФЯР сечениями реакции $(\gamma, 1n1p)$.

Завышение сечения $\sigma(\gamma, 2n)$ происходит вследствие недостоверной интерпретации принадлежности ему заметного количества нейтронов из реакции $(\gamma, 1n1p)$. Аналогичные результаты получены для ^{59}Co [8], $^{58,60}\text{Ni}$ [9–11] и $^{63,65}\text{Cu}$ [2].

Учет роли реакции $(\gamma, 1n1p)$ позволил объяснить известное различие характеристик фоторасщепления соседних ядер $^{58,60}\text{Ni}$. В случае ^{60}Ni имеет место традиционное для $A \sim 60$ существенное (~ 2 раза) превышение по абсолютной величине сечениями фотонейтронных реакций сечений фотопротонных реакций, тогда как в случае ^{58}Ni наблюдается абсолютно нехарактерное обратное их соотношение. Расчеты в КМФЯР сечений разных реакций показывают, что положения, пороги и амплитуды сечений $\sigma(\gamma, 1n1p)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$ близки в случае ^{60}Ni , а в случае ^{58}Ni $B1n1p$ на несколько МэВ меньше $B2n$, а амплитуда $\sigma(\gamma, 1n1p)$ в ~ 20 раз превышает амплитуду $\sigma(\gamma, 2n)$. Показано [9–11], что экспериментальное сечение реакции $^{58}\text{Ni}(\gamma, 2n)^{56}\text{Ni}$ [62] практически полностью представляет собой сечение реакции $^{58}\text{Ni}(\gamma, 1n1p)^{56}\text{Co}$. Доминирование реакции $(\gamma, 1n1p)$ над реакцией $(\gamma, 2n)$ в случае изотопа ^{58}Ni устанавливает приоритет протонных каналов распада состояний гигантского резонанса и объясняет отмеченное различие соотношений сечений фотонейтронных и фотопротонных реакций на изотопах $^{58,60}\text{Ni}$.

Особое место среди исследованных в работе 22 ядер занимают ^{75}As [4,12,14,18,22], ^{127}I [13,18,23], ^{181}Ta [12–14,22], $^{206,207}\text{Pb}$ [15,16,18] и ^{208}Pb [13,15]: соотношения между сечениями различных реакций кардинально иные по сравнению с таковыми для остальных ядер, для которых наблюдаются до 100% величины расхождения между $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$, тогда как расхождения между сечениями $\sigma(\gamma, xn)$ весьма невелики ($\sim 10\%$ величины). В области энергий $E_\gamma < B2n$ проблемы множественности нейтронов отсутствуют, и $\sigma(\gamma, xn)$, $\sigma(\gamma, sn)$ и $\sigma(\gamma, 1n)$ должны быть идентичными, однако для указанных 6 ядер в области энергий $E_\gamma < B2n$ сечения $\sigma(\gamma, xn)$ Ливермора, существенно уступают по величине сечениям Сакле. Типичные примеры для случаев ^{75}As и ^{127}I приведены на Рис. 5.

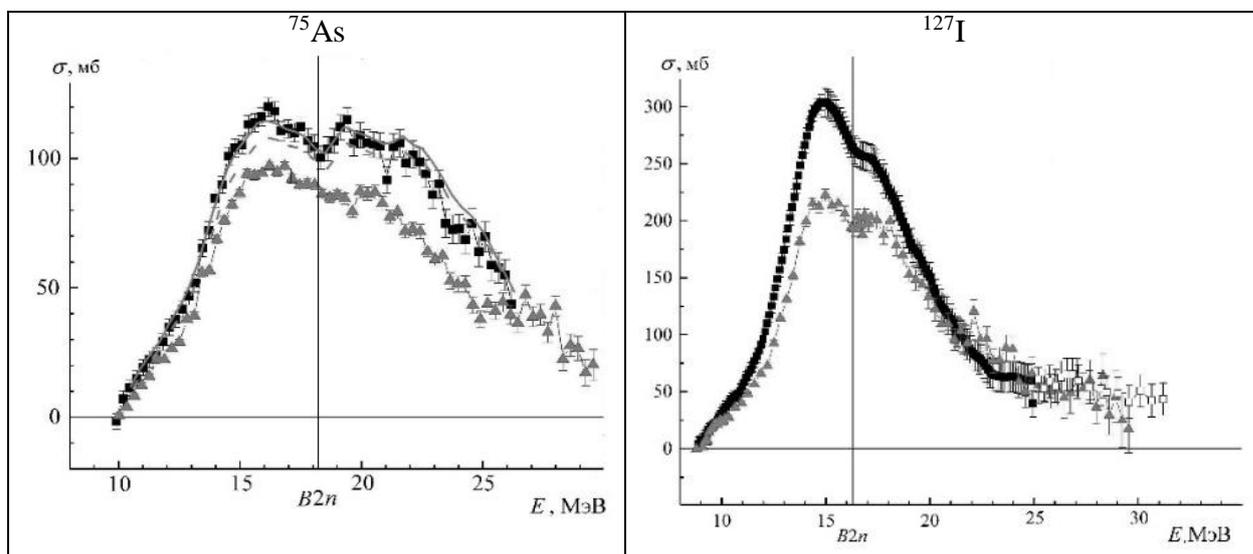


Рис. 5. Сравнение [4,13] сечений выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn)$, полученных в ЛиверMORE для ядра ^{75}As ([63], треугольники) и Сакле ([64], квадраты) и для ядра ^{127}I ([65], треугольники) и Сакле ([66], квадраты).

В Таблице 1 представлены соответствующие всем 6 ядрам отношения интегральных сечений $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{л}}^{\text{инт}}$ для всех обсуждаемых реакций.

Таблица 1.

Сравнение отношений оцененных и экспериментальных интегральных сечений $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{л}}^{\text{инт}}$ реакций для ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta и $^{206,207,208}\text{Pb}$, полученных в Ливерморе.

Реакция	$\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{л}}^{\text{инт}}$					
	^{75}As [4] / [63]	^{127}I [13] / [65]	^{181}Ta [12] / [67]	^{206}Pb [16] / [55]	^{207}Pb [16] / [55]	^{208}Pb [15] / [55]
(γ, xn)	.27	.20	1.24	.13	1.21	1.28
(γ, sn)	1.30	1.25	1.30	1.15	1.24	1.37
$(\gamma, 1n)$	1.34	1.33	1.46	1.19	1.30	1.42
$(\gamma, 2n)$	1.14	0.98	1.05	1.02	1.02	0.83

Расхождения интегральных сечений $\sigma(\gamma, xn)$ для ядра ^{75}As [4] в 27%, ядра ^{127}I [13] – 20%, ^{181}Ta [12] – 24%, ^{206}Pb [16] – 13%, ^{207}Pb [16] – 21%, ^{208}Pb [15,22] – 28% свидетельствуют о присутствии в данных Ливермора систематических погрешностей особого рода, поскольку для них отношения $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{л}}^{\text{инт}}$ весьма характерным образом на десятки процентов отличаются от 1:

– в $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$ $\sigma(\gamma, 1n)$ имеет некоторый вклад (к нему добавляются $2\sigma(\gamma, 2n)$); между $\sigma(\gamma, xn)$ имеются существенные расхождения;

– в $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$ вклад $\sigma(\gamma, 1n)$ оказывается большим: к нему добавляется лишь $1\sigma(\gamma, 2n)$; при этом обсуждаемые расхождения оказываются заметно большими, чем между $\sigma(\gamma, xn)$;

– в $\sigma(\gamma, 1n)$ ее собственный вклад равен 100%, а обсуждаемые расхождения возрастают еще больше;

– для $\sigma(\gamma, 2n)$, в котором вклад сечения $\sigma(\gamma, 1n)$ равен 0%, расхождения практически отсутствуют.

Чем больше доля $\sigma(\gamma, 1n)$ в сечениях сложных реакций, тем больше эти сечения отличаются от оцененных, а в случае отсутствия вклада $\sigma(\gamma, 1n)$ $\sigma^{\text{экс}}(\gamma, 2n) \approx \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$. Характерные расхождения $\sigma(\gamma, xn)$, $\sigma(\gamma, sn)$ и $\sigma(\gamma, 1n)$, полученных в Ливерморе, с оцененными сечениями обусловлены недостоверным занижением именно сечения $\sigma(\gamma, 1n)$: значительное количество нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$ в этих экспериментах, по-видимому, по техническим причинам, было потеряно. В случае данных Сакле отношения интегральных сечения $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{с}}^{\text{инт}}$ для разных реакций на всех 6 обсуждаемых ядрах, несколько отличаются от 1, но их различия не проявляют какой-либо характерной систематики [4,12,13,15,16].

Ранее для ядер ^{181}Ta [68], ^{197}Au [69] и ^{209}Bi [70] были выполнены сравнения оцененных данных с результатами, полученными активационным методом, в котором разделение парциальных реакций осуществляется достоверно не по энергиям нейтронов, а по характеристикам конечных ядер. Установлено, что $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$, полученные таким методом, согласуются с оцененными сечениями. В настоящей работе проведено сравнение оцененных сечений реакций с данными, полученными в альтернативных экспериментах на пучке фотонов от обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на релятивистских электронах с использованием детектора, эффективность которого слабо зависит от энергии нейтронов и позволяет прямо определять их множественность [71]. Сравнение оцененных сечений реакций для ядер ^{159}Tb [17], ^{196}Au [18] и ^{209}Bi [19] с предварительными результатами экспериментов на установке NewSUBARU в Японии [72], свидетельствует, что оцененные данные согласуются с экспериментальными данными этого типа, являются достоверными и могут быть рекомендованы для использования в исследованиях и приложениях.

Важное свойство экспериментально-теоретического метода: в процедуре оценки (7) используется лишь экспериментальное сечение $\sigma^{\text{экс}}(\gamma, xn)$. По нему могут быть оценены сечения всех парциальных реакций, которые возможны энергетически (универсальность физических критериев достоверности). В случаях ядер $^{206,207}\text{Pb}$ [16] и ^{129}Xe [20] и некоторых других оценены сечения $\sigma(\gamma, 3n)$, не полученные в экспериментах.

Кратко рассмотрены некоторые физические следствия расхождений недостоверных экспериментальных и достоверных оцененных сечений. Количественные оценки физических эффектов, в которых используются экспериментальные данные, нуждаются в пересмотре (уточнении).

Заключение представляет основные результаты работы.

С помощью физических критериев достоверности проанализированы экспериментальные сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и в отдельных случаях $(\gamma, 3n)$ для ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{193}Rh , ^{127}I , ^{165}Ho , ^{181}Ta , $^{206,207}\text{Pb}$, установлено, что в широких областях энергий фотонов они не удовлетворяют этим критериям, поскольку содержат значительные систематические погрешности разных типов.

С помощью экспериментально-теоретического метода оценки получены [1–23] новые достоверные сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ и (γ, sn) , удовлетворяющие физическим критериям.

С помощью детального анализа разностей между оцененными и экспериментальными сечениями реакций определены причины обсуждаемых систематических расхождений:

– погрешности метода разделения нейтронов по множественности на основании данных об их энергиях в случаях ядер ^{75}As , $^{76,78,80,83}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{165}Ho ;

– погрешности, обусловленные отсутствием в экспериментах учета вкладов реакции $(\gamma, 1n1p)$ в случаях ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$ и $^{63,65}\text{Cu}$;

– погрешности технического характера, обусловленные потерей в экспериментах Ливермора нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$ в случаях ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta , $^{206,207,208}\text{Pb}$.

Новые оцененные сечения реакций для ядер, исследованных в настоящей работе, вместе с полученными ранее аналогичными данными включены в фонд международной электронной базы данных по ядерным реакциям.

Приложение состоит из трех разделов и содержит следующие материалы:

- 1) Краткое описание КМФЯР [52,53].
- 2) Характеристики новых оцененных сечений реакций.
- 3) Описание программы расчета числовых значений отношений F_i (6) и оцененных сечений $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in)$ (7) парциальных реакций.

Основные результаты опубликованы в следующих статьях:

- научные издания, индексируемые в базах данных Web of Science и Scopus.

1. Варламов В.В., Давыдов А.И., Ишханов Б.С. Новые данные по сечениям фотонейтронных реакций на ядрах $^{76,78,80,82}\text{Se}$ // *Ядерная физика*. 2019. Т. 82. № 1. С. 16-26. DOI:10.1134/S0044002719010197 (SJR 2021–0.217, 1.1 п.л. / 70%).

2. Варламов В.В., Давыдов А.И., Макаров М.А. и др. Достоверность сечений парциальных фотонейтронных реакций для ядер $^{63,65}\text{Cu}$ и ^{80}Se // *Известия РАН. Серия физическая*. 2016. Т. 80. № 3. С. 351-359. DOI: 10.7868/S0367676516030339 (SJR 2021–0.238, 0.88 п.л. / 35%).

3. Varlamov V.V., Davydov A.I., Ishkhanov B.S. и др. The reliability of photoneutron cross sections for $^{90,91,92,94}\text{Zr}$. // *European Physical Journal A*. 2018. V. 54. P. 74 (10). DOI: 10.1140/epja/i2018-12508-4 (SJR 2021–0.958, 1.1 п.л. / 40%).

4. Varlamov V., Davydov A., Kaidarova V. и др. Photoneutron reaction cross-section data for ^{75}As : Experiments and evaluation // *Physical Review C*. 2019. V. 99. N2. P. 024608 (9). DOI: 10.1103/PhysRevC.99.024608 (SJR 2021–1.317, 0.99 п.л. / 50%).

5. Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н. и др. Физические критерии достоверности данных по фоторасщеплению ядра ^{89}Y // *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81. № 6. С. 738-743. DOI: 10.7868/S0367676517060242 (SJR 2021–0.238, 0.6 п.л. / 40%).

6. Варламов В.В., Давыдов А.И., Кайдарова В.Д. Оценка достоверных сечений фотонейтронных реакций на ядрах ^{103}Rh и ^{165}Ho . // *Ядерная физика*. 2019. Т. 82. № 3. С. 212-223. DOI: 10.1134/S0044002719030152 (SJR 2021–0.217, 1.1 п.л. / 60%).

7. Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н. Фотонейтронные реакции на ядре ^{51}V : систематические погрешности экспериментов и новые оцененные данные // *Ядерная физика*. 2021. Т. 84. № 4. С. 278-289. DOI: 10.31857/S0044002721030156 (SJR 2021–0.217, 1.2 п.л. / 50%).

8. Varlamov V.V., Davydov A.I., Ishkhanov B.S. Photoneutron cross sections for ^{59}Co : Systematic uncertainties of data from various experiments. // *European Physical Journal A*. 2017. V. 53. P. 180-187. DOI: 10.1140/epja/i2017-12373-7 (SJR 2021–0.958, 0.8 п.л. / 60%).

9. Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н. Достоверность результатов фотоядерных экспериментов на ядре ^{58}Ni // *Ядерная физика*. 2022. Т. 85. № 4. С. 237-248. DOI: 10.31857/S0044002722040122 (SJR 2021–0.217, 1.2 п.л. / 50%).

10. Varlamov V.V., Davydov A.I., Orlin V.N. The specific features of photoneutron reactions on ^{58}Ni // *European Physical Journal A*. 2022. V. 58. P. 123-133. DOI: 10.1140/epja/s10050-022-00775-x (SJR 2021–0.958 п.л. / 1.1 п.л. / 50%).

11. Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н. Новые оцененные сечения фотонейтронных реакций на ядре ^{60}Ni // *Ядерная физика*. 2022. Т. 85. № 4. С. 316-327. DOI: 10.1134/S1063778822040123 (SJR 2021–0.217, 1.2 п.л. / 50%).

12. Varlamov V., Davydov A., Ishkhanov B. и др. Photoneutron reaction cross sections for ^{75}As and ^{181}Ta : Systematic uncertainties and data reliability // *European Physical Journal Web of Conferences*. 2020. V. 239. P. 01035 (4). DOI: 10.1051/epjconf/202023901035 (SJR 2021–0.184, 0.5 п.л. / 40%).

13. Варламов В.В., Давыдов А.И. Физические критерии достоверности и особенности данных по фоторасщеплению ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta и ^{208}Pb // *Ядерная физика*. 2021. Т. 84. № 5. С. 370-381. DOI: 10.31857/S0044002721050159 (SJR 2021–0.217, 1.2 п.л. / 70%).

14. V.V. Varlamov, A.I. Davydov, V.N. Orlin. Photodisintegration of ^{127}I : Systematic Uncertainties of Experiments and Data Evaluated Using Physical Criteria // *American Journal of Physics and Applications*. 2020. V. 8. N. 5. P. 64-72 DOI: 10.11648/j.ajpa.20200805.11 (SJR 2021–0.668, 0.9 п.л. / 60%).

15. Varlamov V.V., Davydov A.I., Orlin V.N. New evaluated data on $^{206,207,208}\text{Pb}$ photodisintegration // *European Physical Journal A*. 2021. V. 57, 287-299. DOI: 10.1140/epja/s10050-021-00594-6 (SJR 2021–0.958, 1.3 п.л. / 70%).

16. Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н. Фоторасщепление ядер $^{206,207,208}\text{Pb}$: экспериментальные и оцененные сечения фотонейтронных реакций // *Известия РАН, серия физическая*. 2022. Т. 86. № 4. С. 563-570. DOI: 10.31857/S0367676522040251 (SJR 2021–0.238, 0.8 п.л. / 60%).

17. Varlamov V.V., Davydov A.I. Reliability of ^{159}Tb partial photoneutron reaction cross sections obtained in various experiments // *Physics of Atomic Nuclei*. 2022. V. 85. №6. P. 540-550. DOI: 10.1134/S106377882301060X (SJR 2021–0.217, 1.0 п.л./ 70%).

18. Варламов В.В., Давыдов А.И. Экспериментальные и оцененные данные по фоторасщеплению ядра ^{197}Au // *Ядерная физика*. 2022. Т. 85. № 1. С. 2-13. DOI: 10.31857/S0044002722010147 (SJR 2021–0.217, 1.4 п.л. / 50%).

19. Belyshev S., Davydov A., Filipescu D. et al. New ^{209}Bi photodisintegration data and physical criteria of data reliability // *European Physical Journal Web of Conferences*. 2020. V. 239. P. 01031 (4). DOI: 10.1051/epjconf/202023901031 (SJR 2021–0.184, 0.5 п.л. / 15%).

20. Бельшеев С.С., Варламов В.В., Гунин С.А., Давыдов А.И. и др. Фотонейтронные реакции на ядрах ^{129}Xe и их электромагнитная диссоциация в коллайдерах // *Ядерная физика*. 2020. Т. 83. № 1. С. 2-9. DOI: 10.31857/S0044002719060047 (SJR 2021–0.217, 0.9 п.л. / 20%).

- издания, входящие в перечень ВАК.

21. Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н. Фотонейтронные реакции на ядре ^{51}V : систематические погрешности экспериментов и новые оцененные данные // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2022. № 3. С. 2230501 (11). (Импакт-фактор РИНЦ 2018 - 0,062, 1.2 п.л. / 60%).

22. Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н. Систематические погрешности фотоядерных экспериментов для изотопов Рb и ядер As, I и Ta // *Ученые записки физического факультета*

Московского университета. 2022. № 3. С. 2230503 (8). (Импакт-фактор РИНЦ 2018 - 0,062, 0.9 п.л. / 50%).

23. Давыдов А.И., Варламов В.В., Бельшев С.С. и др. Данные о фоторасщеплении ядра ^{127}I : эксперименты и оценка // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2019. № 3. Р. 1930413 (3). (Импакт-фактор РИНЦ 2018 - 0,062, 0.4 п.л. / 50%).

Список литературы

24. Fuller E.G., Gerstenberg H. Photonuclear Data – Abstracts Sheets 1955–1982 // NBSIR 83-2742. U.S.A. National Bureau of Standards, 1986.

25. Dietrich S.S., Berman B.L. Atlas of photoneutron reaction cross sections obtained with in monoenergetic photons // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1988. V. 38. P. 199-338.

26. Berman B.L., Fultz S.C. Measurements of the giant dipole resonance with monoenergetic photons // *Reviews of Modern Physics*. 1975. V. 47. P. 713-761.

27. Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E. Atlas of Giant Dipole Resonances. Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections. INDC(NDS)–394, IAEA NDS, Vienna, Austria, 1999.

28. Международная электронная база данных по ядерным реакциям. Секция ядерных данных МАГАТЭ, <http://www-nds.iaea.org/exfor>.

29. Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами // Издательство Московского университета. Москва, 1979.

30. Varlamov V.V., Ishkhanov B.S. Study of consistency between (γ, xn) , $[(\gamma, n) + (\gamma, np)]$ and $(\gamma, 2n)$ reaction cross sections using data systematics // INDC(CCP)–433, IAEA NDS, Vienna, 2002.

31. Varlamov V.V., Peskov N.N., Rudenko D.S., et al. Consistent evaluation of photoneutron reaction cross sections using data obtained in experiments with quasimonoenergetic annihilation photon beams at Livermore (USA) and Saclay (France) // INDC(CCP)–440, IAEA NDS, Vienna, 2004, p. 37.

32. Wolyneć E., Martinez A.R.V., Gouffon P., et al. Comment on photoneutron cross sections // *Physical Review C*. 1984. V. 29. N 3. P. 1137-1139.

33. Wolyneć E., Martins M.N. Discrepancies Between Saclay and Livermore Photoneutron Cross Sections // *Revista Brasileira Fisica*. 1987. V. 17. P. 56-65.

34. Berman B.L., Pywell R.E., Dietrich S.S., et al. Absolute photoneutron cross sections for Zr, I, Pr, Au, and Pb // *Physical Review C*. 1987. V. 36. N 4. P. 1286-1292.

35. Варламов В.В., Песков Н.Н., Руденко Д.С. и др. Согласованная оценка сечений фотонейтронных реакций по данным, полученным в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов в Ливерморе (США) и Сакле (Франция) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы*. 2003. № 1–2. С. 48-89.

36. Песков Н.Н. Оценка сечений фотонейтронных реакций, полученных на пучках аннигиляционных и тормозных фотонов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, НИИЯФ МГУ, Москва, 2006.

37. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. и др. Оцененные сечения реакций $\sigma(\gamma, nX)$ и $\sigma(\gamma, 2nX)$ на изотопах олова $^{112,114,116,117,118,119,120,122,124}\text{Sn}$ // *Известия РАН. Серия физическая*. 2010. Т. 74. № 6. С. 875-883.

38. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. и др. Новые данные по сечениям реакций $^{197}\text{Au}(\gamma, nX)$ и $^{197}\text{Au}(\gamma, 2nX)$ // *Известия РАН. Серия физическая*. 2010. Т. 74. № 6. С. 884-891.

39. Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Varlamov V.V. Total and partial photoneutron reactions cross sections – new analysis and evaluation // *European Physica Journal Web of Conferences*. 2012. V. 38. P. 12003 (7). DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20123812003>.

40. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. Новый подход к анализу и оценке сечений парциальных фотонейтронных реакций // *Ядерная физика*. 2013. Т. 75. № 11. С. 1414-1424. DOI: 10.1134/S1063778813110148.

41. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. и др. Новые данные о парциальных фотонейтронных реакциях (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ // *Ядерная физика*. 2013. Т. 76. № 11. С. 1484-1495. DOI: 10.7868/S0044002713110159.

42. Варламов В.В., Орлин В.Н., Песков Н.Н. и др. Сечения парциальных фотонейтронных реакций на ядре ^{115}In и разделение нейтронов по множественности. // *Известия РАН. Серия физическая*. 2013. Т. 77. № 4. С. 433-442. DOI: 10.7868/S0367676513040297.

43. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. и др. Фотоядерные реакции в астрофизике // *Ядерная физика*. 2014. Т. 77. №12. С. 1491-1504. DOI: 10.7868/S0044002714110099.
44. Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., et al. A new approach for analysis and evaluation of partial photoneutron reaction cross sections. // *European Physical Journal A*. V. 50. N 7. P. 114 (7). DOI: 10.1140/epja/i2014-14114-x.
45. Варламов В.В., Макаров М.А., Песков Н.Н. и др. Фоторасщепление изотопов $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$: сходство и различия // *Ядерная физика*. 2015. Т. 78. № 9. С. 797-807. DOI: 10.7868/S0044002715090160.
46. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. и др. Данные по фотонейтронным реакциям из разных экспериментов для ядер ^{133}Cs , ^{138}Ba и ^{209}Bi // *Ядерная физика*. 2016. Т. 79. № 4. С. 315-327. DOI: 10.7868/S004400271604022X.
47. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. Оцененные сечения фотонейтронных реакций на изотопе ^{116}Sn и спектры образующихся в них нейтронов // *Ядерная физика*. 2017. Т. 80. №6. С. 632-644. DOI: 10.7868/S0044002717060241.
48. Варламов В.В., Орлин В.Н., Песков Н.Н. Оцененные с использованием физических критериев достоверности данных сечения фотонейтронных реакций для ядер ^{141}Pr и ^{186}W // 2017. *Известия РАН. Серия физическая*. Т. 81. № 6. С.744-752. DOI: 10.7868/S0367676517060254.
49. Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Peskov N.N., et al. Photoneutron reactions in the range of Giant Dipole Resonance // *Physics of Particles and Nuclei*. 2017. V. 48. N 1. P. 76-83. DOI: 10.1134/S1063779617010117.
50. Варламов В.В., Ишханов Б.С. Современный статус фотоядерных данных // *Ядерная физика*. 2017. Т. 80. № 5. С. 554-564. DOI: 10.7868/S0044002717050269.
51. Varlamov V., Ishkhanov B., Orlin V. Reliability of $(\gamma,1n)$, $(\gamma,2n)$, and $(\gamma,3n)$ cross-section data on ^{159}Tb // *Physical Review C*. 2017. V. 95. N5. P. 054607 (5). DOI: 10.1103/PhysRevC.95.054607.
52. Ишханов Б.С., Орлин В.Н. Полумикроскопическое описание дипольного гигантского резонанса. // *Физика элементарных частицы и атомного ядра*. 2007. Т. 38. №2. С. 460-484.
53. Ishkhanov B.S., Orlin V.N. Preequilibrium model of photonucleon reactions, that is based on Fermi gas densities // *Physics of Atomic Nuclei*. 2008. V. 71. N 3. P. 493-508. DOI: 10.1134/S1063778808030101.
54. Fultz S.C., Berman B.L., Caldwell J.T., et al. Photoneutron cross sections for ^{116}Sn , ^{117}Sn , ^{118}Sn , ^{119}Sn , ^{120}Sn , ^{124}Sn , and Indium // *Physical Review*. 1969. V. 186. N 4. 1255-1270.
55. Harvey R.R., Caldwell J.T., Bramblett R.L., et al. Photoneutron cross sections of ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , and ^{209}Bi // *Physical Review*. 1964. V. 136. N 1B. P. 126-131.
56. Lepretre A., Beil H., Bergere R., et al. A study of the giant dipole resonance of vibrational nuclei in the $103 < A < 133$ mass region // *Nuclear Physics A*. 1974. V. 219. P. 39-60.
57. Veysiere A., Beil H., Bergere R., et al. Photoneutron cross sections of ^{208}Pb and ^{197}Au // *Nucl. Phys. A*. 1970. V. 159. 561-576.
58. Fultz S.C., Bramblett R.L., Caldwell J.T. et al. Photoneutron cross sections for natural Cu, ^{63}Cu , and ^{65}Cu // *Physical Review*. 1964. V. 133. N 5B. P. B1149-B1154.
59. Berman B.L., Caldwell J.T., Harvey R.R. et al. Photoneutron cross sections for ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{94}Zr , and ^{89}Y // *Physical Review*. 1967. V. 162. N 4. P. 1098-1111.
60. Fultz S.C., Bramblett R.L., Caldwell J.T. et al. Photoneutron cross sections for ^{51}V and ^{59}Co // *Physical Review*. 1962. V. 128. P. 2345-2351.
61. Alvarez R.A., Berman B.L., Faul D.D., et al. Photoneutron cross sections for ^{55}Mn and ^{59}Co // *Physical Review C*. 1979. V.20. N 1. P. 128-138.
62. Fultz S.C., Alvarez R.A., Berman B.L. et al. Photoneutron cross sections of ^{58}Ni and ^{60}Ni // *Physical Review C*. 1974. V. 10. N 2. P. 608-619.
63. Berman B.L., Bramblett R.L., Caldwell J.T. et al. Photoneutron Cross Sections for ^{75}As , ^{107}Ag , and ^{133}Cs // *Physical Review*. 1969. V. 177. N 4. P. 1745-1754.
64. Carlos P., Beil H., Bergere R., et al. A study of the photoneutron contribution to the giant dipole resonance of nuclei in the $64 \leq A \leq 86$ mass region // *Nuclear Physics A*. 1976. V. 258. N 3. P. 365-387.
65. Bramblett R.L., Caldwell, J.T., Berman B.L., et al. Photoneutron cross sections of ^{141}Pr and ^{127}I from threshold to 33 MeV // *Physical Review*. 1966. V. 148. N 3. 1198-1205.
66. Bergere R., Beil H., Carlos P., Veysiere A. Sections efficaces photoneutroniques de I, Ce, Sm, Er et Lu // *Nuclear Physics A*. 1969. V. 133. P. 417-437.
67. Bramblett R.L., Caldwell J.T., Auchampaugh G.F., et al. Photoneutron cross sections of ^{181}Ta and ^{165}Ho // *Physical Review*. 1963. V. 129. N 6. P. 2723-2729.
68. Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Troschiev S.Yu. Photodisintegration of tantalum // *Physics of Atomic Nuclei*. 2012. V. 75. N3. P. 253-263. DOI: 10.1134/S1063778812020093.

69. Varlamov V., Ishkhanov B., Orlin V. Experimental and evaluated photoneutron cross sections for ^{197}Au // *Physical Review C*. 2017. V. 96. N 4. P. 044606 (7). DOI: 10.1103/PhysRevC.00.044606.
70. Belyshev S.S., Filipescu D.M., Gheoghe I., et al. Multinucleon photonuclear reactions on ^{209}Bi : Experiment and evaluation // *European Physical Journal A*. 2015. V. 51. N. 6. P. 67-76. DOI: 10.1140/epja/i2015-15067-2.
71. Utsunomiya H., Gheorghe I., Filipescu D. M., et al. Direct neutron-multiplicity sorting with a flat-efficiency detector // *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research A*. 2017. V. 871. P. 135-141.
72. Kawano T., Cho Y. S., Dimitriou P., et al. Photonuclear Data Library 2019 // *Nuclear Data Sheets*. 2020. V. 163. P. 109-162.