

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д1-2005-34

На правах рукописи
УДК 539.172.128.17

ПРОНСКИХ
Виталий Станиславович

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОН-ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
НА ИЗОТОПАХ ^{129}I , ^{237}Np И ^{241}Am ПРИ $E_p=660$ МэВ**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2005

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований, Дубна

Научный руководитель (консультант): кандидат физико-математических наук Индржих Адам

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Юрий Ефимович Титаренко

доктор физико-математических наук, профессор Николай Сергеевич Амелин

Ведущая организация:

Государственный научный центр Российской Федерации «Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского», г. Обнинск.

Защита состоится «__» _____ 2005 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 при Объединенном институте ядерных исследований по адресу: 141980, г. Дубна, Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6, конференц-зал Лаборатории высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Лаборатории высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

М.Ф. Лихачев

Актуальность работы: Исследование механизмов протон-ядерных реакций при промежуточных и высоких энергиях приобрело в последние годы особую важность по целому ряду причин. Реакции при низких (<20 МэВ) энергиях были изучены за последнее десятилетие весьма подробно, и данные об этих реакциях опубликованы в виде библиотек оцененных ядерных данных. Большой объем информации, как экспериментальной, так и теоретической, в области до 200 МэВ был накоплен сравнительно недавно. В то же самое время данные о сечениях реакций в области свыше 200 МэВ неполны и фрагментарны. В этой области происходят изменения в механизме взаимодействия, начинают преобладать реакции расщепления и деления и, соответственно, изменяются экспериментальные методы их исследования. Число открытых каналов реакций становится слишком велико для создания библиотек оцененных данных, и более удобным становится расчет необходимых сечений при помощи теоретических моделей, которые в свою очередь могут быть включены в расчеты сложных промышленных систем. При этом экспериментальные исследования протон-ядерных реакций являются одним из основных путей создания и совершенствования таких моделей.

Некоторые из развивающихся в последнее время важных областей физических исследований, такие, как пучки радиоактивных ионов, астрофизика и источники испарительных нейтронов (ИИН) для фундаментальных и прикладных задач требуют создания адекватных моделей ядерных реакций. ИИН состоят из интенсивного источника протонов и мишени из тяжелых металлов. Образующиеся при расщеплении быстрые нейтроны затем замедляются при помощи тяжеловодных или легководных модераторов. Весьма важным применением ИИН являются ускорительно-бланкетные системы (УБС) (гибридные реакторы). В таких системах нейтроны расщепления используются для поддержания цепной реакции в подкритическом реакторе, тогда как долгоживущие компоненты отработанного ядерного топлива могут одновременно превращаться в короткоживущие и стабильные изотопы в результате ядерных реакций (трансмутироваться) в подкритическом бланкете. Такая система производит электроэнергию, часть которой расходуется на поддержание работы ускорителя.

Накопление больших количеств долгоживущих радиоактивных изотопов — один из наиболее существенных недостатков современной ядерной энергетики, которая тем не менее будет оставаться на ближайшие десятилетия необходимым средством выработки электроэнергии. Оценки радиационной опасности обрабо-

танного ядерного топлива показывают, что после выделения актиноидов уран-плутониевого ряда и продуктов деления, таких, как ^{99}Tc , ^{126}Sn , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{129}I , ^{79}Se , главным источником воздействия на население остаются ^{241}Am и ^{237}Np . При этом среди актиноидов наибольший вклад в радиоактивность дает ^{241}Am , тогда как по массе в отработанном топливе преобладает ^{237}Np . Кроме того, ^{237}Np обладает повышенной, по сравнению с другими актиноидами, подвижностью в биосфере, что приводит к большой вероятности попадания его в организм человека по пищевым цепочкам. Оценки показывают, что после трансмутации всех трансурановых элементов их суммарная радиоактивность сравняется с естественной радиоактивностью урановой руды примерно через 10^3 лет, а не через $5 \cdot 10^6$ лет, как без такой обработки. Среди осколков деления одним из наиболее опасных с биологической точки зрения является ^{129}I .

Наиболее перспективным подходом к уничтожению компонентов отработанного ядерного топлива в настоящее время является создание подкритичной УБС (ядерного реактора-трансмутатора), в связи с чем потребность в ядерных данных для них в последние годы резко возросла. Моделирование таких систем требует изучения физических характеристик взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами актинидов и продуктов их деления, что должно привести к развитию самих теоретических представлений об этих взаимодействиях и их компьютерных моделей. При этом экспериментальные сечения образования ядер-остатков в исследуемых мишенях в реакциях с протонами высоких энергий являются тем дифференциальным физическим параметром, сравнение которого с расчетами оптимально для развития теоретических подходов.

Цель работы: Целью данной диссертационной работы явилось экспериментальное исследование методами ядерной спектроскопии ядер-продуктов, образующихся при взаимодействии протонов с энергией 660 МэВ с изотопами ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am и анализ сечений их образования с использованием современных теоретических моделей. Для решения этой задачи были усовершенствованы, разработаны и освоены необходимые спектроскопические методики, создан пакет программ.

Научная новизна: При выполнении работы получены следующие новые результаты:

1. Усовершенствована методика идентификации и определения сечений образования короткоживущих β -нестабильных продуктов ядерных реакций мето-

дом активационного анализа с использованием γ -спектрометров на основе детекторов из высокочистого германия (HPGe), учитывающая подходы прецизионной ядерной спектроскопии и создан пакет программ.

2. Разработана методика расчета оптимальных параметров эксперимента по изучению индивидуальных ядер-продуктов, образующихся с малыми сечениями и находящихся в сложных цепочках распада.
3. Выполнены эксперименты по определению сечений образования ядер-продуктов в реакциях протонов с энергией 660 МэВ на изотопе ^{129}I . Всего для данной мишени были установлены сечения образования 74 остаточных ядер. При промежуточных энергиях такие данные получены впервые.
4. Выполнены эксперименты по определению сечений образования ядер-продуктов в реакциях протонов с энергией 660 МэВ на изотопе ^{237}Np . Всего для данной мишени были установлены сечения образования 53 остаточных ядер. При промежуточных энергиях такие данные получены впервые.
5. Выполнены эксперименты по определению сечений образования ядер-продуктов в реакциях протонов с энергией 660 МэВ на изотопе ^{241}Am . Всего для данной мишени были установлены сечения образования 80 остаточных ядер. При промежуточных и высоких энергиях такие данные получены впервые.
6. Проведен анализ полученных экспериментальных сечений с использованием одиннадцати существующих моделей: LANET (Bertini+RAL, ISABEL+RAL, INCL+RAL, INCL+ABLA), CASCADE, SEM95 (для ^{129}I), SEM2k (для ^{129}I), SEM2k+GEM2, LAQGSM+GEM2, SEM2k+GEMINI, LAQGSM+GEMINI на основе качественных и количественных критериев, показавший недостаточную для практических применений точность моделирования изученных реакций.

Практическая ценность : Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы следующим образом :

1. Методика определения сечений образования короткоживущих продуктов ядерных реакций может использоваться в активационном анализе и радиационной медицине, используется для определения скоростей реакций в активационных детекторах и трансмутационных образцах.

2. Методика расчета оптимальных параметров эксперимента может использоваться при планировании, проведении и обработке результатов экспериментов по исследованию ядер-продуктов, образующихся с малыми сечениями и находящихся в сложных цепочках распада.
3. Сечения протон-ядерных реакций в мишенях ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am и результаты их теоретического анализа необходимы как для изучения механизмов этих реакций, так и в прикладных исследованиях, для разработки средств моделирования подкритических электроядерных систем.
4. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для формирования библиотек ядерных данных (EXFOR, NSR).

Апробация работы: В основу диссертации вошли работы [1-8], которые докладывались на семинарах по физике низких и промежуточных энергий ЛЯП ОИ-ЯИ, научных конференциях Объединения молодых ученых и специалистов ОИ-ЯИ /Дубна (1999, 2002)/, международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра /Обнинск (1997), Москва (1998), Санкт-Петербург (2000), Саров (2001), Москва (2003)/, конференции радиохимического общества США /Сан-Диего (2001)/, совещании по ядерным реакциям и ядерным реакторам в Международном Центре Теоретической Физики, Италия /Триест (2002)/, международных совещаниях Nuclear Data for the Transmutation of Nuclear Waste, Германия /Дармштадт (2003)/, Shielding Aspect of Accelerators, Targets and Irradiated Facilities SATIF-7, Португалия /Сакавем (2004)/ международных конференциях Nuclear Data for Science and Technology, Япония /Цукуба (2002)/, США /Санта Фе (2004)/.

Структура диссертации: Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, благодарностей и списка литературы. Общий объем текста, включая 35 рисунков, 17 таблиц и список литературы, состоящий из 99 наименований, составляет 131 страницу. Основные результаты опубликованы в 8 работах с соавторами общим объемом 67 страниц. В данных работах автору принадлежит определяющий вклад.

Содержание работы: Во Введении обсуждается актуальность проблемы изучения протон-ядерных реакций при промежуточных и высоких энергиях, дано качественное описание процессов взаимодействия протонов промежуточных энергий с ядрами и краткий обзор применявшихся теоретических моделей, сформулирована цель диссертации и приведено ее краткое содержание.

Первая глава посвящена проблемам и методам анализа γ -спектров, измеренных на спектрометрах с полупроводниковым детектором (ППД). При исследовании как ядерной структуры, так и сечений образования ядер-продуктов реакций расщепления, деления или фрагментации методом наведенной активности возникает ряд задач, часть из которых была решена в данной работе. В их числе — разработка методов расчета оптимальных параметров эксперимента, точного определения периодов полураспада короткоживущих ядер на ППД спектрометрах, применение подходов прецизионной спектроскопии в активационных измерениях и автоматизация обработки спектроскопической информации.

Спектры γ -лучей измерялись в области энергий от 50 до 3500 кэВ с помощью спектрометров с HPGe-детекторами. При обработке учитывался радиоактивный фон и спектр мишени перед облучением. В отдельных калибровочных измерениях были установлены интенсивности пиков одиночного и двойного вылета, слабо зависящие от геометрии измерений. Аналитическая кривая вида $I_{\gamma}^{esc}/I_{\gamma} = \sum_{i=1}^4 a_i (\ln(E_{\gamma}))^i$, проведенная через отношения интенсивностей линий вылета к соответствующим фотопикам, использовалась для корректировки площадей γ -линий в спектрах. Такого же вида функция 8-й степени применялась для описания зависимости эффективности регистрации γ -квантов HPGe-детектором от их энергии.

При идентификации ядер учитывались как их $T_{1/2}$ и энергии γ -переходов, так и их относительные интенсивности, что оказалось особенно важным при анализе сложных линий. При этом в работе использовался критерий $K = (I_{\gamma}^{lit} \cdot I_{\gamma,max}^{exp}) / (I_{\gamma}^{exp} \cdot I_{\gamma,max}^{lit})$, где I_{γ}^{lit} и $I_{\gamma,max}^{lit}$ — литературные интенсивности анализируемого перехода и перехода, выбранного эталонным, а I_{γ}^{exp} и $I_{\gamma,max}^{exp}$ — их экспериментальные интенсивности. В случае правильной идентификации и отсутствия наложений линий этот критерий в пределах двух погрешностей равен 1, а при отсутствии в спектре какой-либо линии изотопа, для верхнего предела ее обнаружения $K < 1$.

Поскольку исследовавшиеся спектры весьма сложны и вероятность наложения γ -линий различных изотопов велика, то в случае обнаружения примеси другой активности такие линии раскладывались на компоненты с использованием метода наименьших квадратов. При этом рассматривались разные варианты генетической связи обнаруженных изотопов. Для детального анализа спектров¹, вычитания пиков

¹Предварительная обработка γ -спектров выполнялась программой deimos32, ИЯИ, Ржев.

вылета, фоновых и примесных линий, их идентификации, разложения на компоненты и расчета сечений был создан и применен пакет программ, опубликованный в работе [1].

Одним из важнейших параметров, влияющих на достоверность идентификации радиоактивных ядер, является их период полураспада $T_{1/2}$. Использование в спектрометрах новых типов электронных блоков предполагает усовершенствование методик измерений $T_{1/2}$, внимательную оценку свойств каждой собранной конфигурации. В общем случае, при измерении короткоживущих источников в течение времени, соизмеримого с их $T_{1/2}$, «мертвое время» спектрометра меняется практически пропорционально активности источника, а выражение для площади γ -пики в спектре имеет вид:

$$S_i \frac{\Delta t_i^r}{\Delta t_i^l} = N_0 \{ (e^{-\lambda t_i} - e^{-\lambda(t_i + \Delta t_i^r)}) + C_1 (e^{-2\lambda t_i} - e^{-2\lambda(t_i + \Delta t_i^r)}) + C_2 (e^{-3\lambda t_i} - e^{-3\lambda(t_i + \Delta t_i^r)}) \}, \quad (1)$$

где второй и третий член отражают зависимость «мертвого времени» и наложений импульсов от величины этой активности. В этой формуле N_0 — число ядер в начале измерения, t_i — время начала измерений, Δt_i^r и Δt_i^l — реальное и «живое» время измерений.

При анализе результатов ряда измерений β^- -распада ^{140}La , образующегося в реакции $^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$, выполненных на γ -спектрометре, состоявшем из HPGe-детектора ORTEC с относительной эффективностью 28%, усилителя CANBERRA 2026 и многоканального анализатора SPECTRUM MASTER 919 с автоматическим определением «мертвого времени», оборудованного выводом на PC, выяснилось, что определенное стандартным способом (с использованием только первого члена выражения (1)) значение $T_{1/2}$ на 12σ отличается от рекомендованного в Nuclear Data Sheets, а максимальное «мертвое время» установки составляло 8%.

Были проведены дополнительные эксперименты по измерению образцов ^{139}La , облученных в потоке тепловых нейтронов микротрона МТ-25, причем диапазон «мертвых времен» варьировался от 1 до 50%. При анализе данных этих экспериментов было показано [2], что уже при 50% «мертвом времени» его недоучет установкой приводит к занижению площадей γ -линий на величину до 10%, а корректная величина $T_{1/2}$ достигается только при использовании всех трех членов выражения (1).

Проведенные эксперименты позволили объяснить наблюдавшиеся отличия от литературных значений периодов полураспада ^{140}La , определенных в многократных активационных измерениях при больших нагрузках и связать их с систематическими погрешностями, возникающими при неучете второго и третьего членов выражения (1), а также определить значение периода полураспада $T_{1/2}(^{140}\text{La}) = 1.6808$ (18) дней [2].

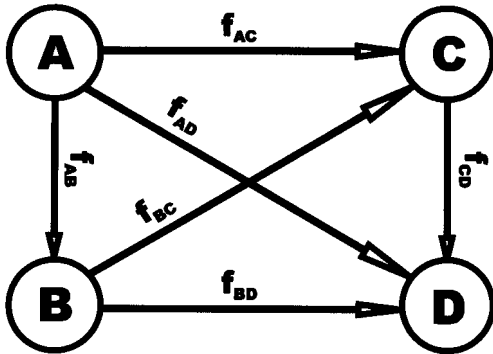


Рисунок 1: Общий вид схемы распада четырех ядер (или их возбужденных состояний).

образования ядер по активности дочерних ядер в сложной цепочке и рассчитать оптимальные t_1 , t_2 и t_3 для накопления каких-либо искомых ядер. Для практического применения можно ограничиться цепочкой из четырех ядер (см. Рисунок 1), что связано с конечной статистикой в γ -спектрах.

Число генетически связанных ядер $N_A(t)$, $N_B(t)$, $N_C(t)$ и $N_D(t)$ в мишени во время облучения, задержки или измерения определяется системами дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} dN_A(t)/dt = Q_A - \lambda_A N_A(t) \\ dN_B(t)/dt = Q_B - \lambda_B N_B(t) + f_{AB} \lambda_A N_A(t) \\ dN_C(t)/dt = Q_C - \lambda_C N_C(t) + f_{AC} \lambda_A N_A(t) + f_{BC} \lambda_B N_B(t) \\ dN_D(t)/dt = Q_D - \lambda_D N_D(t) + f_{AD} \lambda_A N_A(t) + f_{BD} \lambda_B N_B(t) + f_{CD} \lambda_C N_C(t), \end{cases}$$

где Q — скорость образования ядер данного типа (при задержке и измерении $Q = 0$). Такие системы были решены для каждого из интервалов t_1 , t_2 и t_3 (см.

В экспериментах со спаллогенными продуктами нередко возникает ситуация, когда образующиеся ядра находятся в сложных цепочках распада и несколько мишеней одного изотопа облучаются и измеряются несколько раз, причем время облучения t_1 , задержки перед измерением t_2 и измерения t_3 варьируются в широком диапазоне.

При этом в работе решались две задачи — определить сечения

Рисунок 2), а их решение оказалось удобным искать в виде рекуррентных соотношений. Таким образом, для нахождения независимых сечений образования ядер, методом наименьших квадратов решалась система линейных уравнений :

$$\begin{cases} S_{\gamma \Delta t_j^i}^i K_{x_A} = A_A^i \sigma_A, \\ S_{\gamma \Delta t_j^i}^i K_{x_B} = A_B^i \sigma_A + B_B^i \sigma_B, \\ S_{\gamma \Delta t_j^i}^i K_{x_C} = A_C^i \sigma_A + B_C^i \sigma_B + C_C^i \sigma_C, \\ S_{\gamma \Delta t_j^i}^i K_{x_D} = A_D^i \sigma_A + B_D^i \sigma_B + C_D^i \sigma_C + D_D^i \sigma_D, \end{cases}$$

где S_{γ}^i — площадь линии с E_{γ} в i -м измерении, K_{x_j} — функция эффективности γ -детектора, интенсивности γ -квантов, числа ядер мишени и числа протонов, A_j , B_j , C_j и D_j — некоторые рекуррентные выражения. Аналогичные формулы были получены и для кумулятивных сечений. Вид всех рекуррентных коэффициентов приведен в работе [3].

Поскольку основным критерием успешности эксперимента является измерение эффекта (площади пика) с наименьшей относительной ошибкой, то площадь N пика, соответствующего распаду j -ядер (например, типа B), пропорциональна числу ядер этого типа $\mathfrak{R}_j(t_3)$, распавшихся за время измерения, $N = k\mathfrak{R}_j(t_3)$, где выражения \mathfrak{R}_j для разных ядер цепочки также получены в работе [3]. При этом остальные ядра (A , C , D) создают мешающий фон $\mathfrak{R}_f(t_3) = \mathfrak{R}_A(t_3) + \mathfrak{R}_C(t_3) + \mathfrak{R}_D(t_3)$,

и тогда число зарегистрированных фоновых событий $\Phi = k\mathfrak{R}_f(t_3)$, а полное число событий $T = N + \Phi$. В предположении циклического режима измерений для числа циклов измерений запишем : $c = \Delta t_T / (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3)$. Учитывая, что распады ядер типа j и f статистически независимы и погрешности числа зарегистрированных событий складываются следующим образом : $\Delta_N^2 = \Delta_T^2 + \Delta_{\Phi}^2$, а относительная погрешность измерения равна $\Delta N/N$, был получен следующий критерий качества

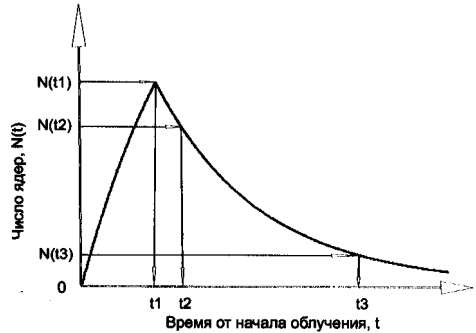


Рисунок 2: Диаграмма накопления ядер в цепочке распада.

Таблица 1: Характеристики мишеней ^{237}Np , ^{241}Am , ^{129}I и пучка протонов.

Тип ядра-мишени	$^{237}\text{Np}_{93}$		$^{241}\text{Am}_{95}$		$^{129}\text{I}_{53}$	
Период полураспада, л	2.144(7)10 ⁶		432.2(7)		15.7(4)10 ⁶	
Вес мишени, г	0.742	0.742	0.177	0.183	0.500	0.500
Толщина мишени, мм	0.193	0.193	0.043	0.044	0.395	0.395
Исходная активность, мКи	0.523	0.523	601	621	0.063	0.063
Интенсивность пучка, 10 ¹⁴ р/мин	2.64	2.66	2.72	2.58	2.68	2.68
Время облучения, мин	5	30	5	30	5	30

эксперимента :

$$K_3 = \frac{\mathfrak{R}_j(t_3)}{\sqrt{\mathfrak{R}_j(t_3) + 2\mathfrak{R}_f(t_3)}} \sqrt{ck}.$$

Поскольку нередко при планировании эксперимента k и t_T фиксируются заранее, то в созданной в ходе работы программе *optimum* заложена возможность варьировать каждый из параметров t_1 , t_2 и t_3 с определенным шагом, находя максимум функции K_3 . Проведенные для ядер изобары с $A = 152$ расчеты были опубликованы в работе [3]. Предложенный подход возможно использовать для выбора оптимальных условий измерения продуктов реакций расщепления, особенно образующихся с малыми сечениями, если задача состоит в исследовании одного какого-либо ядра-продукта, что даст наилучшие результаты, например, при использовании метода гелиевой струи для транспортировки продуктов реакций к детекторам.

Во **второй главе** описываются эксперименты по определению сечений протон-ядерных реакций на изотопах ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am при энергии протонов 660 МэВ. Эксперименты были проведены на выведенном пучке протонов фазотрона при токе пучка 1.2 мкА. Мишени состояли из NpO_2 , AmO_2 и NaI (15% ^{127}I + 85% ^{129}I). Облучаемые мишени-образцы были герметично упакованы в алюминиевые капсулы весом 79 грамм, конструкция которых показана на **Рисунке 3**. Характеристики мишеней и пучка приведены в **Таблице 1**. Всего облучалось по 2 мишени каждого типа. Размеры и положение пучка в процессе облучения контролировалось двухкоординатной пропорциональной камерой. Для мониторинга пучка использовалась реакция $^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$, а в качестве мониторов применялись Al фольги тех же размеров, что и сами мишени, и весом 99 мг.

Для снижения высокого собственного фона мишеней при измерениях использовался фильтр, состоящий из 10 мм Рb, 2 мм Cd и 1 мм Си пластин. Наведенные в мишенях активности были измерены с помощью трех полупроводниковых детекторов γ -квантов: 1) мишень ^{129}I на HPGe детекторе с эффективностью 50% и энергетическим разрешением 2.15 кэВ на линии 1332 кэВ (^{60}Co), 2) мишень ^{241}Am — на HPGe детекторе с эффективностью 20% и разрешением 1.8 кэВ, 3) мишень ^{237}Np — Ge(Li) детектором с эффективностью 4.8% и разрешением 2.6 кэВ. Регистрация спектров γ -излучения проводилась с помощью анализаторов MASTER 921 (^{241}Am и ^{129}I) и MASTER 919 (^{237}Np), которые автоматически определяют «мертвое время» спектрометра.

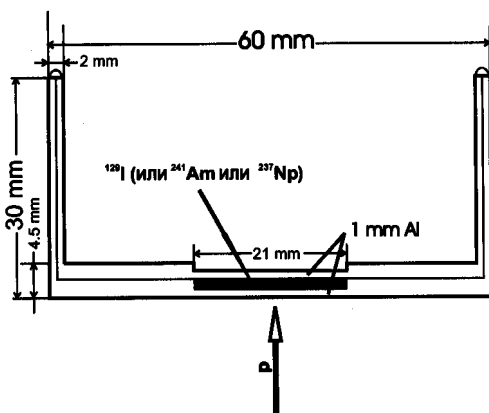


Рисунок 3: Конструкция радиоактивных мишеней, изготовленных в ФЭИ, Обнинск.

Измерения первых мишеней были начаты через 10 минут после окончания облучения, было сделано по 17 измерений, время измерений изменялось от 5 минут до 3 часов, расстояние от мишени до соответствующего детектора составляло 225 см для ^{129}I , 150 см для ^{241}Am и 100 см для ^{237}Np . Измерения вторых мишеней ^{129}I (30-минутные экспозиции) были начаты спустя 20 часов после облучения (17 часов для ^{241}Am и ^{237}Np), всего было выполнено 13 измерений в течение 33 дней (11 в течение 30 дней для ^{241}Am и ^{237}Np), время набора спектров изменялось от 5 до 66 часов (до 50 часов для ^{241}Am и ^{237}Np).

С использованием специально разработанного пакета программ [1] устанавливались энергии и интенсивности γ -переходов образовавшихся остаточных ядер, а также пределы регистрации пика на данном фоне, необходимые при идентификации самих ядер-продуктов. Затем с использованием данного пакета в спектрах устанавливались фоновые линии, пики одиночного и двойного вылета, при обнаружении наложений γ -линий их интенсивности корректировались. По откорректированным таким образом γ -линиям определялись периоды полураспада соответствующих изотопов. Остаточные ядра затем идентифицировались по энергиям их

γ -линий, их периодам полураспада, а если обнаруживалось несколько γ -линий, принадлежащих одному ядру, то и по отношению их интенсивностей, которое сравнивалось с табличным.

Всего было идентифицировано [4,5] свыше 2800 γ -линий в спектрах мишени ^{129}I , свыше 1000 — в спектрах мишени ^{241}Am , и свыше 500 — в спектрах ^{237}Np , определены сечения образования 74 ядра-продукта для мишени ^{129}I , 80 для ^{241}Am и 53 — для ^{237}Np . Окончательные экспериментальные результаты по всем трем мишеням приведены в Таблицах 2-4. В этих таблицах в колонке «Тип распада» буквой «С» обозначено кумулятивное сечение, «I» — независимое, «IT» — изомерный переход, β^+ , β^- — бета-распад, ϵ — электронный захват.

Таблица 2: Экспериментальные данные для мишени $^{129}\text{I}+^{127}\text{I}$.

Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб	Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб
^{44m}Sc	2.44 д	I(IT, ϵ)	0.20(4)	^{104}Ag	69.2 м	I(ϵ , β^+)	8.3(8)
^{46}Sc	83.83 д	C(β^-)	0.36(4)	^{105}Ag	41.29 д	C(ϵ)	14.3(17)
^{48}V	15.97 д	C(β^+ , ϵ)	0.58(6)	^{106}Ag	8.46 д	I(ϵ)	7.5(7)
^{52}Mn	5.29 д	C(ϵ , β^+)	0.37(5)	^{108}In	58 м	I(β^+ , ϵ)	7.1(7)
^{56}Co	78.8 д	C(ϵ , β^+)	0.11(4)	^{109}In	4.20 ч	I(ϵ , β^+)	12.1(12)
^{58}Co	70.92 д	C(ϵ , β^+)	0.47(15)	^{109}Sn	18.0 м	C(ϵ , β^+)	3.02(30)
^{59}Fe	44.5 д	C(β^-)	0.065(7)	^{110m}Ag	249.9 д	I(β^- ,IT)	1.50(18)
^{65}Zn	244.1 д	C(ϵ , β^+)	0.88(9)	^{110}In	4.9 ч	I(ϵ)	11.7(12)
^{72}As	26 ч	I(β^+ , ϵ)	0.93(9)	^{110m}In	69.1 м	C(ϵ)	6.4(8)
^{72}Se	8.4 д	C(ϵ)	0.59(15)	^{113}Sn	115.1 д	C(ϵ)	27.2(30)
^{74}As	17.78 д	I(ϵ , $\beta^+/-$)	0.85(9)	^{114m}In	49.51 д	I(IT, ϵ)	7.1(7)
^{76}Br	16.2 ч	C(β^+ , ϵ)	0.77(9)	^{114}Sb	3.49 м	C(ϵ , β^+)	2.92(35)
^{77}Br	2.38 д	C(ϵ , β^+)	0.64(15)	^{115m}In	4.49 д	I(IT, β^-)	15.6(35)
^{83}Rb	86.2 д	C(ϵ)	0.40(8)	^{115}Sb	32.1 м	C(ϵ , β^+)	20.0(30)
^{84}Rb	32.87 д	I(ϵ , $\beta^+/-$)	0.12(4)	^{116m}In	54.15 м	I(β^-)	2.72(42)
^{85}Sr	64.84 д	C(ϵ)	1.49(16)	^{116}Sb	15.8 м	I(β^+ , ϵ)	2.0(4)
^{86}Y	14.74 ч	C(β^+ , ϵ)	0.69(25)	^{116m}Sb	60.3 м	I(ϵ , β^+)	11.6(14)
^{87}Y	3.35 д	C(ϵ , β^+)	1.15(11)	^{116}Te	2.49 ч	C(ϵ , β^+)	9.9(10)
^{88}Y	106.6 д	I(ϵ , β^+)	0.36(10)	^{117}In	43.8 м	I(β^-)	1.6(3)
^{88}Zr	83.4 д	C(ϵ)	1.4(4)	^{117}Te	1.03 ч	C(ϵ , β^+)	15.4(15)
^{89}Zr	3.27 д	C(ϵ , β^+)	1.51(15)	^{118m}Sb	5.00 ч	I(ϵ , β^+)	11.1(12)

Таблица 2: Экспериментальные данные для мишени $^{129}\text{I}+^{127}\text{I}$ (продолжение).

Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб	Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб
^{90}Nb	14.60 ч	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	1.18(13)	^{118}Te	6.00 д	$\text{I}(\epsilon)$	13.9(14)
^{92m}Nb	10.15 д	$\text{I}(\epsilon, \beta^+)$	0.11(4)	^{118}I	13.7 м	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	3.3(4)
^{93m}Mo	6.85 ч	$\text{I}(\text{IT}, \epsilon)$	0.94(30)	^{119}Te	16.05 ч	$\text{C}(\epsilon, \beta^+)$	11.5(12)
^{93}Tc	2.75 ч	$\text{C}(\epsilon, \beta^+)$	2.14(24)	^{119m}Te	4.69 д	$\text{I}(\epsilon, \beta^+)$	16.1(15)
^{94}Tc	4.88 ч	$\text{I}(\epsilon, \beta^+)$	1.79(17)	^{120m}Sb	5.76 д	$\text{I}(\epsilon)$	6.3(6)
^{94m}Tc	52 м	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	0.44(8)	^{120}I	1.35 ч	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	10.2(12)
^{95}Nb	34.98 д	$\text{C}(\beta^-)$	0.36(5)	^{120m}I	53.0 м	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	2.9(3)
^{95}Tc	20.0 ч	$\text{C}(\epsilon)$	3.00(34)	^{121}Te	16.8 д	$\text{C}(\epsilon)$	17.9(18)
^{96}Tc	4.28 д	$\text{I}(\epsilon)$	2.50(25)	^{121m}Te	154.0 д	$\text{I}(\text{IT}, \epsilon)$	13.3(16)
^{99}Rh	16.0 д	$\text{I}(\epsilon, \beta^+)$	0.84(25)	^{122}Sb	2.70 д	$\text{C}(\epsilon, \beta^{+/-})$	7.7(9)
^{100}Rh	20.8 ч	$\text{I}(\epsilon, \beta^+)$	4.21(50)	^{123}I	13.2 ч	$\text{C}(\epsilon)$	25.0(24)
^{100}Pd	3.63 д	$\text{C}(\epsilon)$	2.85(33)	^{124}I	4.18 д	$\text{I}(\epsilon, \beta^+)$	26.3(30)
^{101m}Rh	4.34 д	$\text{I}(\epsilon, \beta^+)$	2.9(9)	^{126}Sb	12.4 д	$\text{I}(\beta^-)$	0.54(5)
^{101}Pd	8.47 ч	$\text{C}(\epsilon, \beta^+)$	6.3(8)	^{126}I	13.02 д	$\text{I}(\text{IT})$	35(5)
^{102}Rh	2.9 л	$\text{I}(\epsilon)$	2.98(30)	^{127}Xe	36.46 д	$\text{C}(\epsilon)$	3.8(4)
^{103}Ru	39.25 д	$\text{C}(\beta^-)$	0.43(5)	^{128}I	25.0 м	$\text{I}(\beta^-, \epsilon)$	31(5)

Таблица 3: Экспериментальные данные для мишени ^{237}Np .

Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мбарн	Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мбарн
^{48}Sc	1.82 д	$\text{I}(\beta^-)$	5.2(15)	^{122}Sb	2.7 д	$\text{C}(\beta^-)$	19(4)
^{48}V	15.97 д	$\text{C}(\beta^+)$	0.89(20)	^{124}Sb	60.2 д	$\text{C}(\beta^-)$	16.7(20)
^{56}Mn	2.58 ч	$\text{C}(\beta^-)$	25.4(45)	^{126}Sb	12.4 д	$\text{C}(\beta^-)$	13.9(20)
^{74}As	17.77 д	$\text{I}(\beta^-, \epsilon)$	3.6(5)	^{127}Sb	3.85 д	$\text{C}(\beta^-)$	14.7(20)
^{83}Rb	86.2 д	$\text{C}(\epsilon)$	6.1(8)	^{128}Sb	9.01 ч	$\text{C}(\beta^-)$	90(10)
^{84}Rb	32.77 д	$\text{C}(\beta^+, \beta^-)$	13.3(16)	^{132}Te	3.26 д	$\text{C}(\beta^-)$	13(3)
^{86}Rb	18.63 д	$\text{C}(\beta^-)$	17.7(20)	^{133m}Te	55.4 м	$\text{I}(\beta^+, \text{IT})$	18(4)
^{85}Sr	64.84 д	$\text{C}(\epsilon)$	9.6(20)	^{124}I	4.18 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	17.3(20)
^{91}Sr	9.63 ч	$\text{C}(\beta^-)$	29(3)	^{131}I	8.04 д	$\text{C}(\beta^-)$	20(4)
^{87}Y	3.35 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	6.7(8)	^{134}I	52.5 м	$\text{C}(\beta^-)$	12.9(15)

Таблица 3: Экспериментальные данные мишени ^{237}Np (продолжение).

Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб	Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб
^{88}Y	106.6 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	10.4(19)	^{136}Cs	13.16 д	$\text{C}(\beta^-)$	9.1(13)
^{89}Zr	3.27 д	$\text{C}(\epsilon)$	4.6(5)	^{138}Cs	33.41 м	$\text{C}(\beta^-)$	14.9(29)
^{95}Zr	64.02 д	$\text{C}(\beta^-)$	59(6)	^{131}Ba	11.5 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	71(13)
^{95}Nb	33.15 д	$\text{C}(\beta^-)$	22(4)	^{140}Ba	12.75 д	$\text{C}(\beta^-)$	23(4)
^{99}Mo	2.75 д	$\text{C}(\beta^-)$	73(13)	^{145}Eu	5.93 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	0.83(9)
^{95m}Tc	61 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	2.3(4)	^{146}Eu	4.59 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	4.2(6)
^{96}Tc	4.98 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	5.7(9)	^{147}Eu	24.1 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	1.9(6)
^{103}Ru	39.26 д	$\text{C}(\beta^-)$	63(7)	^{146}Gd	48.27 д	$\text{C}(\epsilon)$	1.39(16)
^{105}Ru	4.44 ч	$\text{C}(\beta^-)$	19.6(20)	^{152}Tb	17.5 ч	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	27(3)
^{106m}Rh	2.17 ч	$\text{I}(\beta^-)$	55(9)	^{171}Lu	8.24 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	2.4(10)
^{106m}Ag	8.28 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	6.2(8)	^{185}Os	93.6 д	$\text{C}(\epsilon)$	2.8(4)
^{110m}Ag	249.49 д	$\text{I}(\beta^-, \epsilon)$	18.0(20)	^{188}Pt	10.2 д	$\text{C}(\epsilon)$	0.46(8)
^{115}Cd	2.23 д	$\text{C}(\beta^-)$	65(12)	^{206}Po	8.8 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	3.8(7)
^{117m}Cd	3.46 ч	$\text{C}(\beta^-)$	17(4)	^{230}Pa	17.4 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	1.6(3)
^{125}Sn	9.64 д	$\text{C}(\beta^-)$	6.6(11)	^{234}Np	4.4 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	2.2(4)
^{118m}Sb	5 ч	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	10.4(13)	^{238}Np	2.12 д	$\text{I}(\beta^-)$	16(3)
^{120m}Sb	5.76 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	14.7(16)				

Таблица 4: Экспериментальные данные для мишени ^{241}Am .

Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб	Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб
^{48}Sc	1.82 д	$\text{I}(\beta^-)$	1.11(20)	^{108m}Rh	6 м	$\text{I}(\beta^-)$	11.6(15)
^{48}V	15.97 ч	$\text{C}(\beta^+)$	3.4(5)	^{112}Pd	21.01 ч	$\text{C}(\beta^-)$	21.0(28)
^{52}V	3.74 м	$\text{C}(\beta^-)$	2.3(6)	^{106m}Ag	8.28 д	$\text{I}(\beta^+/-)$	2.5(3)
^{52}Mn	5.59 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	1.74(28)	^{110m}Ag	249.49 д	$\text{I}(\beta^-, \epsilon)$	11.6(24)
^{54}Mn	312.3 д	$\text{I}(\epsilon)$	10.1(14)	^{112}Ag	3.130 ч	$\text{I}(\beta^-)$	20(4)
^{56}Mn	2.58 ч	$\text{C}(\beta^-)$	6.7(16)	^{115}Cd	2.23 д	$\text{C}(\beta^-)$	19.2(28)
^{72}Ga	14.1 ч	$\text{C}(\beta^-)$	1.5(7)	^{117m}Cd	3.46 ч	$\text{C}(\beta^-)$	6.9(7)
^{72}As	26 ч	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	4.2(5)	^{116m}In	54.41 м	$\text{I}(\beta^-)$	16.4(24)
^{76}As	1.08 д	$\text{I}(\beta^+)$	4.5(16)	^{117m}In	116.2 м	$\text{C}(\beta^-)$	21(3)

Таблица 4: Экспериментальные данные для мишени ^{241}Am (продолжение).

Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб	Изотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	σ_{exp} , мб
^{76}Br	16.2 ч	$\text{C}(\beta^+)$	0.6(18)	$^{118\text{m}}\text{In}$	4.45 м	$\text{I}(\beta^-)$	6.5(9)
^{82}Br	35.3 ч	$\text{I}(\beta^-)$	8.0(11)	$^{118\text{m}}\text{Sb}$	5 ч	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	7.6(14)
$^{84\text{m}}\text{Br}$	6 м	$\text{C}(\beta^-)$	2.7(6)	^{120}Sb	15.89 м	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	10.8(14)
^{84}Br	31.8 м	$\text{I}(\beta^-)$	9.2(14)	^{122}Sb	2.7 д	$\text{C}(\beta^-, \epsilon)$	14.0(19)
$^{82\text{m}}\text{Rb}$	6.47 ч	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	2.1(10)	^{124}Sb	60.2 д	$\text{C}(\beta^-)$	10.2(14)
$^{84\text{m}}\text{Rb}$	32.77 д	$\text{C}(\beta^{+/-})$	6.9(11)	^{126}Sb	12.46 д	$\text{C}(\beta^-)$	7.3(14)
^{86}Rb	18.63 д	$\text{C}(\beta^-)$	2.02(29)	^{127}Sb	3.85 д	$\text{C}(\beta^-)$	7.3(12)
^{89}Rb	15.15 м	$\text{C}(\beta^-)$	11.1(15)	^{128}Sb	9.01 ч	$\text{C}(\beta^-)$	3.3(10)
^{91}Sr	9.63 ч	$\text{C}(\beta^-)$	15.0(1.7)	$^{119\text{m}}\text{Te}$	4.7 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	3.7(5)
^{92}Sr	2.71 ч	$\text{C}(\beta^-)$	11.8 (17)	^{121}Te	16.78 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	5.3(10)
^{93}Sr	7.42 м	$\text{C}(\beta^-)$	10.4(22)	$^{131\text{m}}\text{Te}$	30 ч	$\text{I}(\beta^-)$	6.5(11)
$^{84\text{m}}\text{Y}$	39.5 м	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	3.1 (9)	^{132}Te	3.20 д	$\text{C}(\beta^-)$	6.7(12)
^{87}Y	3.35 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	4.4(7)	^{124}I	4.18 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	10.6(19)
^{88}Y	106.65 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	6.2(10)	^{126}I	13.11 д	$\text{I}(\beta^{+/-})$	6.8(18)
$^{91\text{m}}\text{Y}$	49.71 м	$\text{C}(\beta^-)$	14(4)	^{130}I	12.36 ч	$\text{I}(\beta^-)$	10.0(19)
^{95}Y	10.3 м	$\text{C}(\beta^-)$	17(4)	^{131}I	8.02 д	$\text{C}(\beta^-)$	14.1(23)
^{89}Zr	3.27 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	3.8(7)	^{132}I	2.30 ч	$\text{I}(\beta^-)$	8.3(12)
^{95}Zr	64.02 д	$\text{C}(\beta^-)$	36(5)	^{133}I	20.8 ч	$\text{C}(\beta^-)$	9.3(14)
^{97}Zr	16.91 ч	$\text{C}(\beta^-)$	20(4)	^{134}I	52.6 м	$\text{C}(\beta^-)$	4.3(7)
$^{92\text{m}}\text{Nb}$	10.15 д	$\text{I}(\beta^+, \epsilon)$	0.6(4)	^{132}Cs	5.48 д	$\text{I}(\beta^{+/-})$	6.2(17)
^{95}Nb	34.98 д	$\text{C}(\beta^-)$	17(2)	^{136}Cs	13.16 д	$\text{C}(\beta^-)$	6.6(12)
^{96}Nb	23.35 ч	$\text{I}(\beta^-)$	13.6(17)	^{140}Ba	12.75 д	$\text{C}(\beta^-)$	3.6(6)
^{97}Nb	72.1 м	$\text{C}(\beta^-)$	13.3(21)	^{140}La	1.68 д	$\text{I}(\beta^-)$	7.4(12)
$^{98\text{m}}\text{Nb}$	51.3 м	$\text{I}(\beta^-)$	13.9(19)	^{135}Ce	17.7 ч	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	17.0(25)
^{99}Mo	2.75 д	$\text{C}(\beta^-)$	44(6)	^{145}Eu	5.93 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	1.65(19)
^{96}Tc	4.98 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	2.71(28)	^{146}Eu	4.59 д	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	1.16(17)
^{104}Tc	18.3 м	$\text{C}(\beta^-)$	22(6)	^{154}Tb	21.5 ч	$\text{C}(\beta^+, \epsilon)$	13(6)
^{103}Ru	39.26 д	$\text{C}(\beta^-)$	63(10)	^{156}Tb	5.35 д	$\text{C}(\epsilon)$	1.7(5)
^{105}Ru	4.44 ч	$\text{C}(\beta^-)$	34(5)	^{198}Au	2.70 д	$\text{C}(\beta^-)$	1.33(20)
^{105}Rh	35.36 ч	$\text{C}(\beta^-)$	77(13)	^{206}Bi	6.24 д	$\text{C}(\epsilon)$	1.21(25)
$^{106\text{m}}\text{Rh}$	2.17 ч	$\text{I}(\beta^-)$	15.0(23)	^{240}Am	50.8 ч	$\text{I}(\epsilon)$	45(5)

В третьей главе проводится анализ экспериментальных данных на основе модельных расчетов. В анализ вошли расчеты с использованием следующих программных моделей, основанных на методе Монте-Карло: LANET (с каскадами Bertini, ISABEL, испарением по Dresner и делением по Atchison (RAL), а также каскадом Cugnon INCL и делением Schmidt ABLA и RAL), дубненской каскадно-испарительно-делительной моделью CASCADE (В.С. Барашенков), каскадно-экситонными моделями SEM95 и SEM2k (С.Г. Машник, ЛАНЛ), а также четырьмя комбинированными моделями, полученными объединением каскадных частей модели SEM2k и Лос-Аламосской версии модели кварк-глюонных струн LAQGSM (С.Г. Машник, К.К. Гудима, ЛАНЛ) с испарительно-делительными частями обобщенной испарительной модели S. Furihata GEM2 и моделью бинарного деления R. Charity GEMINI (LAQGSM+GEM2, SEM2k+GEM2, LAQGSM+GEMINI, SEM2k+GEMINI).

Расчеты по программам SEM95 и SEM2k, не моделирующим продукты деления, использовались только для анализа данных о мишени $^{129}\text{I}+^{127}\text{I}$. Для сравнения с измеренными кумулятивными сечениями теоретические сечения также пересчитывались в кумулятивные на основе известных цепочек распада. Расчеты по базовым моделям комплекса LANET, а также SEM95 были выполнены автором данной работы, тогда как расчеты по остальным моделям проведены их разработчиками (группа В.С. Барашенкова (ОИЯИ), группа С.Г. Машника, R.E. Prael (ЛАНЛ, США)).

Качественное поизотопное сравнение экспериментальных данных о мишени $^{129}\text{I}+^{127}\text{I}$ с расчетами по всем использованным моделям приведено на Рисунке 4. Для количественного сравнения экспериментальных и теоретических значений был использован критерий, предложенный R. Michel, и его стандартное отклонение:

$$\langle F \rangle = 10 \sqrt{\langle (\log \sigma^{exp} - \log \sigma^{theo})^2 \rangle} \quad \text{и} \quad S(\langle F \rangle) = 10 \sqrt{\left\langle \left(\log \left(\frac{\sigma_{exp}^i}{\sigma_{theo}^i} \right) - \log(\langle F \rangle) \right)^2 \right\rangle}.$$

Ввиду того что результат сравнения сильно зависит от массового числа продукта реакции, для сравнения было выбрано две массовых области ядер-остатков: 1) все ядра-продукты с $A = 44 - 128$ и 2) только ядра с $A \geq 95$ (см. Таблицу 5). Из 74 сечений, измеренных при выполнении данной работы, 42 были отобраны для сравнения [5,6,7,8] как отвечающие основным физическим принципам, реализованным в использованных моделях. В частности, если в эксперименте было определено только изомерное состояние какого-либо ядра или, напротив, только его основное

Таблица 5: Сравнение экспериментальных и модельных значений для изотопов, образовавшихся в мишени $^{127}\text{I} + ^{129}\text{I}$.

Модель	$A = 44 - 128$			$A \geq 95$		
	$N/N_{30\%}/N_{2.0}$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$	$N/N_{30\%}/N_{2.0}$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$
LANET Bertini	36/6/22	3.72	3.00	22/6/19	1.67	1.34
LANET ISABEL	34/5/18	5.18	4.45	22/5/16	1.72	1.37
LANET INCL+RAL	33/14/21	3.86	3.16	22/14/21	1.42	1.28
LANET INCL+ABLA	32/9/21	9.32	7.01	22/9/21	1.57	1.34
CASCADE	42/9/15	11.05	5.19	22/9/14	3.32	2.75
CEM95	40/10/20	5.40	3.52	22/9/18	1.78	1.44
CEM2k	33/13/26	2.89	2.74	22/11/20	1.48	1.27
LAQGSM+GEM2	33/13/22	3.16	2.68	22/13/21	1.50	1.34
CEM2k+GEM2	35/10/28	5.03	5.04	22/8/20	1.60	1.35
LAQGSM+GEMINI	42/19/29	4.28	3.58	22/17/21	1.31	1.21
CEM2k+GEMINI	42/12/27	2.74	2.15	22/9/20	1.46	1.25

состояние, притом что данное ядро имеет один или несколько достаточно долгоживущих изомеров, имеющих значительную разрядку в основное состояние, то такие сечения исключались из сравнения. Если же сечения образования ядер в основном и метастабильном состояниях были определены в эксперименте независимо, то с расчетным значением сравнивалась их сумма. Результаты качественного поизотопного сравнения для мишени ^{237}Np даны на **Рисунке 5**. Для количественного сравнения по критерию $\langle F \rangle$ согласно описанному выше подходу было выбрано 37 из 53 экспериментально измеренных сечений на ^{237}Np . Для сравнения сечения также были разделены на две группы: 1) принадлежащие к области деления $48 \leq A \leq 175$ и 2) все остаточные ядра [7,8]. Результаты сравнения показаны в **Таблице 6**. На **Рисунке 6** приведено качественное поизотопное сравнение экспериментальных и расчетных данных для мишени ^{241}Am . Для количественного сравнения по критерию $\langle F \rangle$ были выбраны 45 из 80 сечений, которые, как и при анализе ^{237}Np , были разделены на 2 группы: 1) область деления $48 \leq A \leq 175$ и 2) все остаточные ядра [7,8]. Результаты сравнения даны в **Таблице 7**.

Таблица 6: Сравнение экспериментальных и модельных значений для изотопов, образовавшихся в мишени ^{237}Np .

Модель	$A = 48 - 175$			$A = 48 - 234$		
	$N/N_{30\%}/N_{2.0}$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$	$N/N_{30\%}/N_{2.0}$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$
LAHET Bertini	32/4/16	3.29	2.30	37/6/20	3.18	2.26
LAHET ISABEL	32/5/16	3.34	2.37	37/5/19	3.18	2.26
LAHET INCL+RAL	32/7/16	3.51	2.49	37/8/19	3.35	2.39
LAHET INCL+ABLA	32/9/14	4.09	2.78	37/9/14	4.52	2.92
CASCADE	27/4/15	9.75	7.40	32/5/16	11.29	7.75
LAQGSM+GEM2	32/1/14	7.28	4.47	37/2/15	7.10	4.29
CEM2k+GEM2	32/5/16	5.80	3.70	37/6/18	5.43	3.47
LAQGSM+GEMINI	32/4/12	4.69	2.64	36/5/13	4.82	2.69
CEM2k+GEMINI	32/3/10	3.57	1.88	36/4/11	3.87	2.05

Таблица 7: Сравнение экспериментальных и модельных значений для изотопов, образовавшихся в мишени ^{241}Am .

Модель	$A = 48 - 175$			$A = 48 - 240$		
	$N/N_{30\%}/N_{2.0}$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$	$N/N_{30\%}/N_{2.0}$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$
LAHET Bertini	44/19/34	2.28	1.99	37/6/20	3.18	2.26
LAHET ISABEL	44/19/34	2.30	2.01	37/5/19	3.18	2.26
LAHET INCL+RAL	44/14/36	2.44	2.15	37/8/19	3.35	2.39
LAHET INCL+ABLA	44/16/35	2.96	2.69	37/9/14	4.52	2.92
CASCADE	40/7/15	6.57	4.15	32/5/16	11.29	7.75
LAQGSM+GEM2	44/21/33	3.38	3.14	37/2/15	7.10	4.29
CEM2k+GEM2	44/21/32	2.76	2.50	37/6/18	5.43	3.47
LAQGSM+GEMINI	44/8/22	3.69	2.53	36/5/13	4.82	2.69
CEM2k+GEMINI	44/7/17	3.18	2.02	36/4/11	3.87	2.05

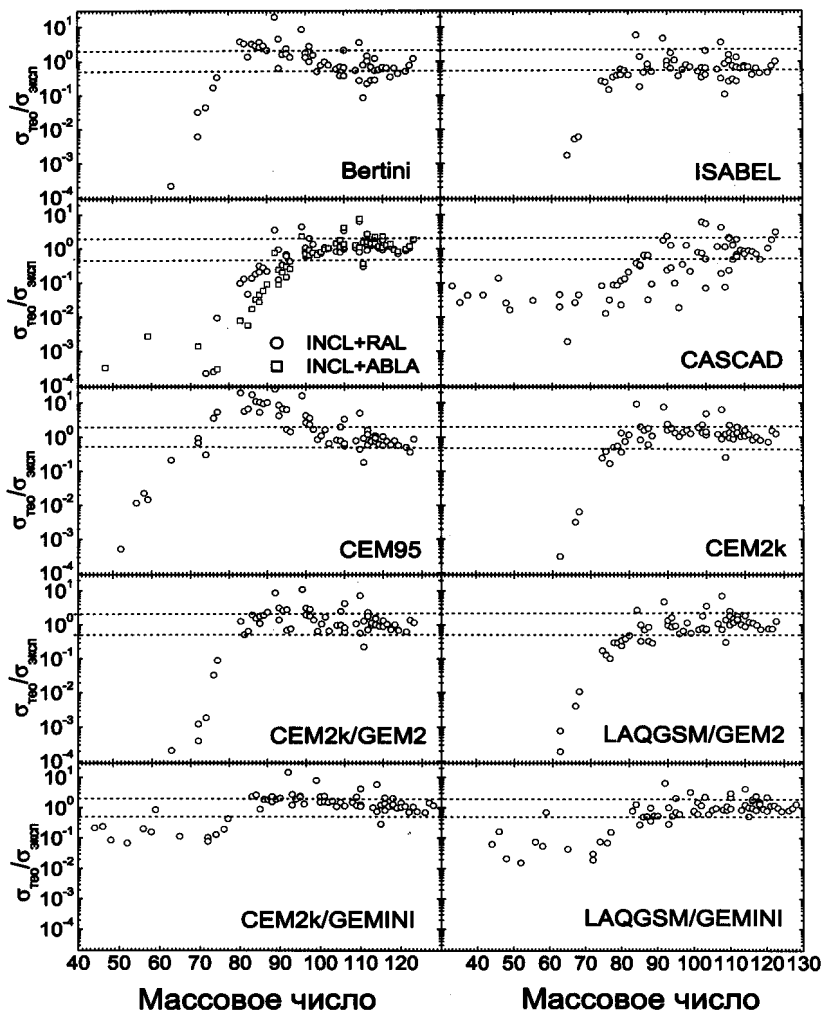


Рисунок 4: Качественное сравнение экспериментальных сечений образования ядер-продуктов в мишени 15% ^{127}I + 85% ^{129}I с расчетными.

p(660 MeV) -> ^{237}Np

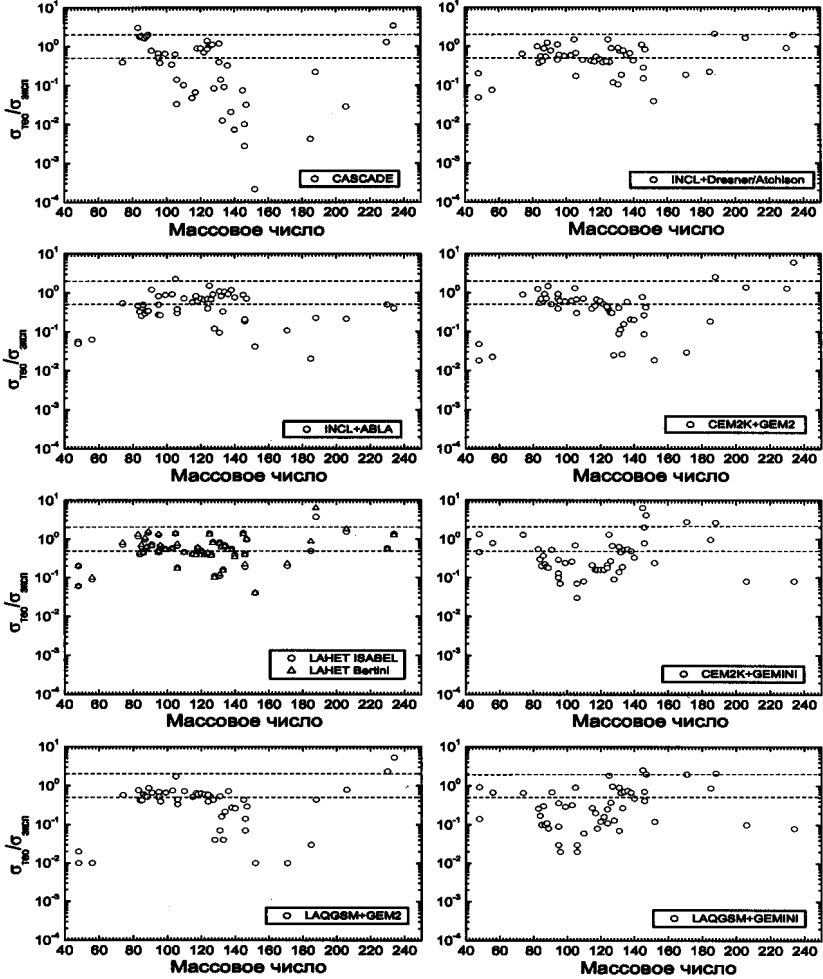


Рисунок 5: Качественное сравнение экспериментальных сечений образования ядер-продуктов в мишени ^{237}Np с расчетными.

$p(660 \text{ MeV}) \rightarrow {}^{241}\text{Am}$

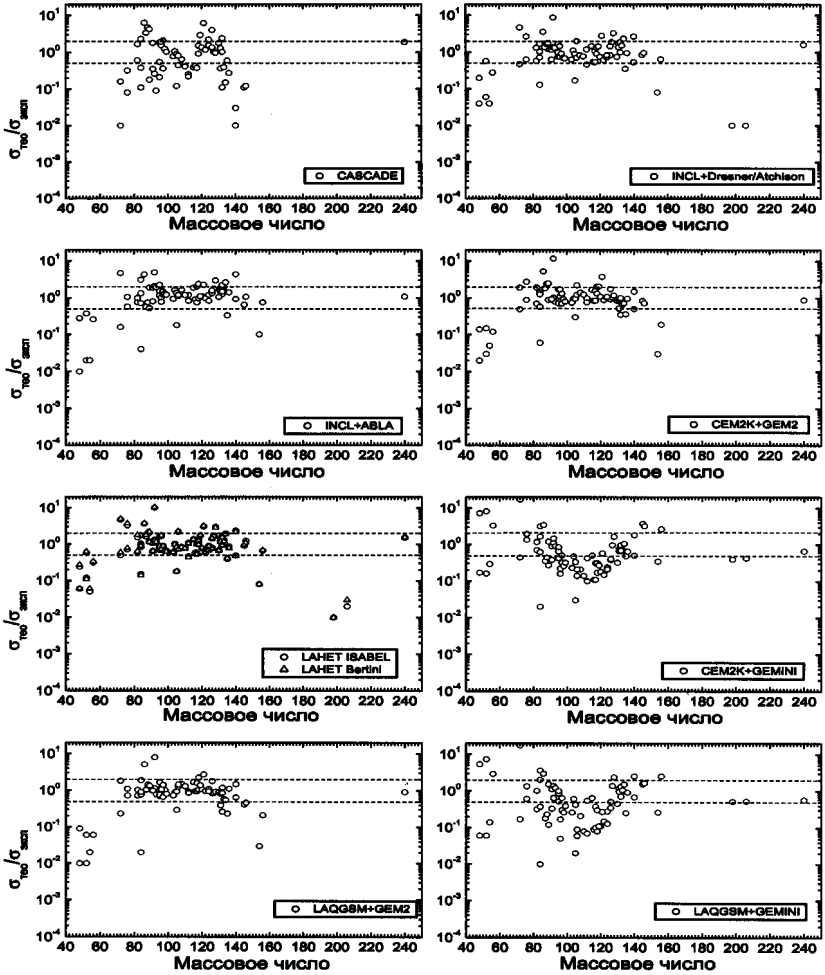


Рисунок 6: Качественное сравнение экспериментальных сечений образования ядер-продуктов в мишени ${}^{241}\text{Am}$ с расчетными.

В **Заключении** обсуждаются основные результаты, полученные в работе :

1. Усовершенствована методика определения сечений образования короткоживущих β -нестабильных продуктов ядерных реакций методом активационного анализа с использованием гамма-спектрометров на основе детекторов из высокочистого германия (HPGe), учитывающая подходы прецизионной ядерной спектроскопии, создан пакет программ.
2. Выполнено прецизионное измерение периода полураспада ядра ^{140}La с использованием полупроводниковых спектрометров с HPGe детектором в условиях изменения загрузки спектрометра в широком диапазоне с применением процедуры корректировки недоучета «мертвого времени» спектрометра. Получено значение на уровне точности, соответствующем рекомендованным значениям.
3. Предложен и проиллюстрирован на примере ряда изомеров изобары $A = 152$ способ расчета оптимальных параметров эксперимента по исследованию отдельных ядер-продуктов, образующихся с малыми сечениями в протон-ядерных и ядро-ядерных реакциях, применимый для изучения свойств короткоживущих β -нестабильных ядер, находящихся в сложных цепочках распада.
4. Выполнены эксперименты по определению методами ядерной спектроскопии сечений образования ядер-продуктов в реакциях протонов с энергией 660 МэВ с мишенями ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am . С использованием разработанной методики и пакета программ определены сечения образования 74 ядер-продуктов в мишени ^{129}I , 53 ядер-продуктов в мишени ^{237}Np и 80 — в мишени ^{241}Am . При промежуточных энергиях эти данные получены и проанализированы впервые.
5. Выполнен анализ сечений образования ядер-продуктов в мишенях ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am с использованием одиннадцати различных существующих теоретических моделей. Показано, что в целом по ^{129}I все модели дают неплохое согласие с экспериментальными данными для A свыше 95, причем несколько лучшее согласие показывают модели SEM2k+GEMINI и LAQGSM+GEMINI (ЛАНЛ США). Для мишеней ^{237}Np и ^{241}Am качество описания в целом хуже,

а лучшие результаты дают модели каскада Vertini и ISABEL, объединенные с моделью испарения/деления RAL и являющиеся базовыми для комплексов LANET и MCNPX (ЛАНЛ, США). Высокая точность измерения сечений позволила показать недостаточную для практических применений точность моделирования изучавшихся реакций.

Публикации по теме диссертации :

- [1] И. Адам, В.С. Пронских, А.Р. Балабекян, В.Г. Калинин, Я. Мразек, А.Н. Приемывшев, Я. Франа, «Система программ и дополнения к методу активационного анализа для определения сечений ядерных реакций», препринт ОИЯИ P10-2000-28, Измерительная техника, 2001, т.1, стр. 57-61.
- [2] J. Adam, A.G. Belov, R. Brandt, P. Chaloun, M. Honusek, V.G. Kalinnikov, M.I. Krivopustov, B.A. Kulakov, E.-J. Langrock, M. Ochs, V.S. Pronskikh, A.N. Sosnin, V.I. Stegailov, V.M. Tsoupko-Sitnikov, J.-S. Wan, “ ^{140}La half-life measurement with Ge-detector”, препринт ОИЯИ E6-99-205, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B187**, 419-426 (2002).
- [3] И. Адам, А. Балабекян, В.С. Пронских, В.Г. Калинин, Я. Мразек, «Определение сечения ядерных реакций в сложных цепочках распада атомных ядер», препринт ОИЯИ P15-2001-3; “Determination of the cross section for nuclear reactions in complex nuclear decay chains”, Applied Radiation and Isotopes **56**, 607-613 (2002).
- [4] J. Adam, A. Balabekyan, R. Brandt, V.P. Dzhelapov, S.A. Gustov, V.G. Kalinnikov, I.V. Mirokhin, J. Mrazek, R. Odoj, V.S. Pronskikh, O.V. Savchenko, A.N. Sosnin, A.A. Solnyshkin, V.I. Stegailov, V.M. Tsoupko-Sitnikov, “Investigation of the formation of residual nuclei from the radioactive ^{237}Np and ^{241}Am targets in the reaction with 660 MeV protons”, препринт ОИЯИ E15-2000-256, Ядерная Физика, 2002, т. 65, №5, стр. 797-809.
- [5] V.S. Pronskikh, J. Adam, A. Balabekyan, V.S. Barashenkov, V.P. Dzhelapov, S.A. Gustov, V.P. Filinova, V.G. Kalinnikov, M.I. Krivopustov, I.V. Mirokhin, A.A. Solnyshkin, V.I. Stegailov, V.M. Tsoupko-Sitnikov, J. Mrazek, R. Brandt, W. Westmeier, R. Odoj, S.G. Mashnik, A.J. Sierk, R.E. Prael, K.K. Gudima,

M.I. Baznat, "Study of proton induced reactions in a radioactive ^{129}I target at $E_p=660$ MeV", Proceedings of the International Workshop on Nuclear Data for the Transmutation of Nuclear Waste (TRAMU@GSI), GSI-Darmstadt, Germany, September 1-5, 2003, ISBN 3-00-012276-1, Eds: A. Kelic and K.-H. Schmidt; препринт Лос-Аламосской Национальной Лаборатории LA-UR-04-2139, стр. 1-6, E-print: nucl-ex/0403056, submitted to Physical Review C.

- [6] И. Адам, А. Балабекян, В.С. Барашенков, В.П. Дзелепов, С.А. Густов, В.П. Филинова, В.Г. Калинин, М.И. Кривопустов, И.В. Мирохин, В.С. Пронских, А.А. Солнышкин, В.И. Стегайлов, В.М. Цупко-Ситников, Я. Мразек, Р. Брандт, В. Вестмайер, Р. Одой, С.Г. Машник, Р.Е. Праел, К.К. Гудима, М.И. Базнат, «Исследование образования продуктов протон-ядерных реакций в мишени ^{129}I при энергии протонов 660 МэВ», Письма в ЭЧАЯ, 2004, т.1, №4 (121), стр. 53-64.
- [7] J. Adam, A. Balabekyan, R. Brandt, V.S. Barashenkov, V.P. Dzheleпов, V.P. Filinova, S.A. Gustov, V.G. Kalinnikov, M.I. Krivopustov, I.V. Mirokhin, J. Mrazek, R. Odoj, V.S. Pronskikh, O.V. Savchenko, A.N. Sosnin, A.A. Solnyshkin, V.I. Stegailov, V.M. Tsoupko-Sitnikov, "Investigation of the formation of residual nuclei in reactions induced by 660 MeV protons interacting with the radioactive ^{237}Np , ^{241}Am and ^{129}I targets", Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 2, p. 272-275, August 2002.
- [8] S.G. Mashnik, V.S. Pronskikh, J. Adam, A. Balabekyan, V.S. Barashenkov, V.P. Filinova, A.A. Solnyshkin, V.M. Tsoupko-Sitnikov, R. Brandt, R. Odoj, A.J. Sierk, R.E. Prael, K.K. Gudima, M.I. Baznat, "Analysis of the JINR p(660 MeV) + ^{129}I , ^{237}Np , and ^{241}Am measurements with eleven different models", препринт Лос-Аламосской Национальной Лаборатории США LA-UR-04-4929, стр. 1-12, E-print: nucl-th/0407097, Proceedings of the 7th Specialists' Meeting on Shielding Aspect of Accelerators, Targets and Irradiated Facilities, SATIF-7, Sacavem (Lisbon), Portugal, May 17-18, 2004.

Получено 23 марта 2005 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 25.03.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,44. Уч.-изд. л. 1,69. Тираж 100 экз. Заказ № 54835.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/