

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Фурсова Надежда Юрьевна

**Фотоядерные реакции на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и
молибдена**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета и в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скobelьцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Кузнецов Александр Александрович**
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Джилавян Леонид Завенович**,
доктор физико-математических наук;
Институт ядерных исследований Российской академии
наук, Лаборатория фотоядерных реакций, ведущий
научный сотрудник

Северюхин Алексей Павлович,
доктор физико-математических наук;
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория теоретической физики имени
Н.Н. Боголюбова, ведущий научный сотрудник

Савельев-Трофимов Андрей Борисович,
доктор физико-математических наук, профессор;
Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра
физики частиц и экстремальных состояний материи,
профессор

Защита состоится «13» марта 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МГУ.013.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

Автореферат разослан «___» февраля 2026 года.

E-mail: galan_lidiya@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3738>.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.2,
кандидат физико-математических наук

Л.И. Галанина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Исследование фотоядерных реакций, в частности гигантского дипольного резонанса (ГДР) [1], служит инструментом для изучения структуры атомных ядер и механизмов их взаимодействия с излучением. Эксперименты позволили выявить ключевые особенности ГДР, такие как деформационное, конфигурационное и изоспиновое расщепления, непосредственно связанные со свойствами изотопов. Однако конфигурационное и изоспиновое расщепления лучше изучены только на относительно лёгких ядрах, поскольку для исследований на средних и тяжёлых ядрах не хватает экспериментальных данных.

Подавляющая часть существующих экспериментальных данных по сечениям фотоядерных реакций была получена с использованием пучков квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов или тормозного γ -излучения. В исследованиях, выполненных с помощью объективных физических критериев, было установлено, что экспериментальные сечения парциальных фотонейтронных реакций, представленные в различных работах для одних и тех же ядер, не соответствуют этим критериям и могут различаться между собой до нескольких раз. Выбор различных реакций для нормировки может приводить к расхождениям в средних сечениях, измеряемых гамма-активационным методом. Для фотопротонных и многонуклонных реакций на средних и тяжёлых ядрах экспериментальные данные практически отсутствуют, а теоретические модели в основном не учитывают изоспиновое расщепление ГДР, занижая выходы реакций с вылетом протона. Вследствие этого актуальной задачей является получение новых экспериментальных данных.

В настоящее время для стабильных изотопов эрбия ($^{162,166,168}\text{Er}$) и естественной смеси известны сечения некоторых фотоядерных реакций с вылетом нейтронов в области энергий до ~ 30 МэВ, в то время как фотопротонные каналы остаются неисследованными. Для диспрозия получены сечения фотонейтронных реакций в области низкой энергий, а также при 65 и 75 МэВ, измерены радиохимические выходы фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов при энергии тормозного излучения 55 МэВ. В работах на изотопах палладия и молибдена в основном были измерены относительные выходы фотонуклонных реакций, сечения, взвешенные по тормозному спектру, и изомерные отношения. Следует отметить, что для некоторых изотопов данные, полученные на разных установках, но при одинаковой верхней энергии тормозного излучения различаются.

Кроме изучения ГДР и его особенностей, результаты настоящей работы актуальны для ядерной астрономии и медицины. В современной ядерной медицине радиоизотопы используются для диагностических процедур, радиоизотопной

терапии, стерилизации медицинских изделий, а также научных исследований. Традиционные реакторный и циклотронный методы наработки ограничены малым числом исследовательских реакторов с подходящими характеристиками, высокой стоимостью установок и мишней, невозможностью (в ряде случаев) получения целевого нуклида без побочных изотопов того же элемента, сложностью методов выделения целевого нуклида. В качестве альтернативного метода получения как широко применяемых, так и перспективных медицинских изотопов, исследуется фотоядерная методика наработки на ускорителях электронов [2,3]. К её преимуществам относятся возможность использования компактных ускорителей электронов на базе медицинских учреждений, отсутствие для части перспективных изотопов иных способов наработки, а также для ряда случаев простая химия разделения целевого и побочных радионуклидов. Для оценки возможности наработки изотопов фотоядерным методом необходимо знать выходы реакций, приводящих к образованию не только целевого, но и побочных нуклидов.

Среди изучаемых в данной работе изотопов перспективными для медицины являются ^{161}Tb и ^{166}Ho . ^{161}Tb по своим ядерным и химическим свойствам очень похож на широко используемый терапевтический нуклид ^{177}Lu , но благодаря излучению конверсионных и оже-электронов от него ожидается более высокий терапевтический эффект [4]. ^{166}Ho перспективен для лучевой терапии: комплекс $^{166}\text{Ho}-\text{DOTMP}$ используется для разрушения миеломных клеток в костном мозге [5], $^{166}\text{Ho}-\text{EDTMP}$ - для паллиативного облегчения боли при костных метастазах [6], микросфера с ^{166}Ho - для радиоэмболизации при лечении рака печени [7]. Для фотопротонных реакций на стабильных изотопах эрбия и диспрозия, приводящих к получению медицинских нуклидов ^{161}Tb и ^{166}Ho , в базах ядерных данных (EXFOR) практически отсутствуют экспериментальные данные, поэтому актуальным является проведение экспериментального исследования этих реакций.

В астрофизике остаётся нерешённой проблема происхождения обойдённых ядер (р-ядер) — группы из 35 нейтронодефицитных изотопов от ^{74}Se до ^{196}Hg , образование которых не может быть объяснено в рамках процессов медленного (s-) и быстрого (r-) захвата нейtronов. Одним из ключевых сценариев образования таких ядер считается р-процесс, включающий последовательность реакций (p, γ) и (γ, n) , а также фотоядерные каналы (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и (γ, α) с последующим β -распадом [8]. Распространённость р-ядер значительно ниже, чем у соседних изотопов, а их теоретически рассчитанное содержание может расходиться с экспериментальным на несколько порядков. Например, модельные оценки для лёгких изотопов молибдена и рутения оказываются заниженными почти в 100 раз, в то время как для некоторых изотопов платины и осмия наблюдается завышение примерно в 10 раз. Основными причинами расхождений служат неопределённости в сечениях ключевых фотоядерных реакций и в начальном составе звёздного вещества, а также

недостаточный учёт в теоретических моделях структурных особенностей ядер, изоспинового расщепления ГДР, вклада квадрупольного поглощения и обертона ГДР. В связи с этим актуальным является получение новой экспериментальной информации о сечениях фотоядерных реакций, приводящих к образованию и распаду р-ядер.

Актуальность исследований фотонуклонных реакций подтверждается планированием (ELI-NP) и запуском (SLEGS, HI γ S, NewSubaru) новых источников монохроматического γ -излучения на базе ведущих научных центров. В России в Национальном центре физики и математики (г. Саров) ведётся работа по созданию источника, принцип действия которого основан на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах (ИКИ НЦФМ) [9]. В отличие от результатов, полученных ранее на источниках квазимонохроматического излучения прошлого поколения, использование монохроматического γ -излучения позволит избежать модельной зависимости результатов исследований. Первые эксперименты на пучке ИКИ НЦФМ планируется проводить γ -активационным методом, поэтому для их подготовки необходимы отработка экспериментальных техник, предварительная оценка сечений фотоядерных реакций, оптимизация мишеней с учётом углового разброса и интенсивности пучка γ -квантов.

Основной **целью** работы является получение новых экспериментальных данных о выходах и сечениях фотоядерных реакций различной множественности на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведение экспериментов по облучению мишеней естественного изотопного состава из эрбия, диспрозия, палладия и молибдена.
2. Измерение и анализ спектров активности, наведённой в облучённых образцах.
3. Определение экспериментальных выходов и сечений на эквивалентный квант для фотоядерных реакций на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Расчёт изомерных отношений для изотопов палладия, родия, молибдена и ниобия.
4. Сравнение полученных экспериментальных сечений с результатами расчётов, выполненных на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций (КМФР) [10, 11] и программного кода TALYS [12] с параметрами по умолчанию, а также данными других экспериментальных работ.
5. Анализ и установление закономерностей в поведении сечений на эквивалентный квант для фотоядерных реакций в зависимости от роста числа нейтронов в пределах одного изотопного ряда и при переходе к другим изотопам.
6. Анализ сечений фотоядерных реакций, приводящих к образованию и распаду обойдённых ядер ^{92}Mo и ^{102}Pd .

7. Расчёт радиохимических выходов фотоядерных реакций, приводящих к получению перспективных медицинских изотопов ^{161}Tb и ^{166}Ho , оценка оптимальных энергий для наработки данных радионуклидов.

Объектом исследования в настоящей работе были реакции на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена, происходящие под действием тормозного γ -излучения. **Предметом исследования** являлись выходы и сечения на эквивалентный квант для фотопротонных и фотонейтронных реакций на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена.

Научная новизна

Данные о сечениях и выходах фотопротонных реакций на средних и тяжёлых ядрах практически отсутствуют в международной базе данных о ядерных реакциях EXFOR, наиболее полной современной коллекции данных по реакциям под действием электронов, фотонов, нейtronов, заряженных частиц и тяжёлых ионов. В диссертационной работе впервые измерены сечения на эквивалентный квант и абсолютные выходы фотопротонных реакций на изотопах эрбия и диспрозия. Впервые получены сечения на эквивалентный квант для фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов эрбия, диспрозия и молибдена при максимальной энергии тормозного излучения 55 МэВ. Применение гамма-активационной методики позволило в одном эксперименте с мишенью естественного изотопного состава измерить сечения на эквивалентный квант для ряда стабильных изотопов, что сделало возможным исследование зависимости сечений от массового числа ядра-мишени. В ходе работы показано уменьшение сечений на эквивалентный квант для реакций с вылетом одного протона с ростом массового числа в пределах одного изотопного ряда и общее уменьшение с ростом отношения N/Z. Кроме того, впервые определены оптимальные условия для фотоядерной наработки перспективных медицинских изотопов ^{161}Tb и ^{166}Ho .

Научная и практическая значимость

Результаты исследований выходов фотонуклонных реакций на средних и тяжёлых ядрах необходимы для изучения механизмов фотоядерных реакций в области энергий за ГДР, а также для корректирования предсказаний моделей для описания подобных реакций. С практической точки зрения такие данные важны для развития медицины и астрофизики. Выходы фотопротонных реакций на изотопах эрбия и диспрозия, приводящих к образованию ^{161}Tb и ^{166}Ho , необходимы для оценки возможностей наработки этих медицинских изотопов на ускорителях электронов фотоядерным методом. Результаты изучения фотопротонных и фотонейтронных реакций на обойдённых ядрах ^{92}Mo и ^{102}Pd представляют интерес для астрофизики, так как фотоядерные реакции являются одним из основных сценариев образования и распада таких изотопов в процессе нуклеосинтеза. Данные о выходах фотонуклонных реакций на средних и тяжёлых ядрах, полученные в

настоящей работе, используются для разработки первых гамма-активационных экспериментов на источнике обратного комптоновского рассеяния ИКИ НЦФМ.

Методология и методы исследования

1. Гамма-активационный метод с γ -спектрометрией продуктов реакций на детекторе из сверхчистого германия [13–18], позволяющий в одном эксперименте получать данные по реакциям на нескольких стабильных изотопах мишени естественного состава.
2. Применение достаточно тонких тормозных вольфрамовых конверторов, позволяющее использовать в качестве основы для расчёта тормозных спектров сечения образования тормозных γ -квантов Зельцера-Бергера [19].
3. Методика последовательного измерения и записи спектров, позволяющая получать зависимости интенсивности распадов от времени и рассчитывать с помощью этих зависимостей периоды полураспада изотопов.
4. Методика расчёта эффективности детектора из сверхчистого германия, учитывая его геометрию, расположение мишени и эффект самопоглощения γ -квантов в самой мишени с помощью пакета GEANT4 [20].
5. Способ расчёта выходов и сечений на эквивалентный квант для фотоядерных реакций на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена на основе КМФР и с помощью программного кода TALYS.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ экспериментальных данных для фотопротонных реакций, полученных в гамма-активационных экспериментах на тормозном пучке импульсного разрезного микротрона НИИЯФ МГУ с максимальной энергией 55 МэВ, позволил выявить тенденции уменьшения сечений на эквивалентный квант для реакции (γ , 1p) с ростом массового числа внутри одного изотопного ряда, а также общего уменьшения с ростом отношения N/Z.
2. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчётами, выполненными на основе КМФР и с помощью программного кода TALYS, указывает на необходимость учёта изоспинового расщепления ГДР для корректного описания фотопротонных реакций.
3. Расхождение экспериментальных и теоретических сечений на эквивалентный квант для реакций $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91}\text{Mo}$ и $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91}\text{Nb}$ является одним из возможных источников существенного занижения теоретических оценок распространённости обойдённого ядра ^{92}Mo .
4. Экспериментальные радиохимические выходы фотопротонных реакций на изотопах эрбия и диспрозия указывают на возможность фотоядерной наработки перспективных медицинских изотопов ^{161}Tb и ^{166}Ho . Расчёты на основе КМФР

позволили определить оптимальные энергии пучка ускорителя электронов для наработки ^{161}Tb : 21-22 МэВ при использовании моноизотопной мишени из ^{162}Dy , 29-30 МэВ при использовании мишени из изотопа ^{163}Dy .

Степень достоверности

Достоверность научных результатов и выводов обеспечена использованием апробированных и общепринятых методик экспериментальных и теоретических исследований фотоядерных реакций. Экспериментальная часть диссертационной работы проведена с применением широко используемой в данной области гамма-активационной методики. Теоретические расчёты были основаны на использовании хорошо зарекомендовавших себя подходов для описания фотоядерных реакций, таких как КМФР и программный код TALYS, а также на применении оценённых ядерных данных (библиотека JENDL). Достоверность подтверждается согласием результатов расчётов выходов реакций по данным для нескольких фотопиков одного и того же изотопа, со справочными данными из авторитетных международных источников (баз данных NNDC, МАГАТЭ), а также согласием экспериментальных результатов с данными других работ и результатами теоретических расчётов (в тех случаях, когда такие сравнения возможны).

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации были представлены лично автором или в соавторстве с ним в 20 докладах на международных и всероссийских конференциях, научных школах и семинарах, среди которых:

- Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова – 2024, 2025;
- Всероссийская школа НЦФМ по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике – 2024, 2025;
- Международная конференция «ЯДРО» – 2018, 2020, 2022-2025;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» – 2025;
- «Ломоносовские чтения» – 2018, 2019, 2025;
- Научный семинар ОЭПВАЯ и кафедры общей ядерной физики – 2024;
- 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024) – 2024;
- XXIV Харитоновские чтения «Проблемы ускорительной физики и физики высоких энергий» - 2023;
- Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» – 2017-2019.

Публикации

Основные результаты, включенные в диссертацию, представлены в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное и активное участие во всех этапах диссертационной работы: планировании и проведении экспериментов по облучению мишеней естественного изотопного состава из эрбия, диспрозия, палладия и молибдена на ускорителе РМ-55, обработке спектров остаточной активности и определении экспериментальных выходов и сечений фотоядерных реакций, выполнении теоретических расчётов на основе КМФР и программного кода TALYS, интерпретации полученных результатов. Автор принимал активное участие в подготовке научных статей по результатам исследований, являлся докладчиком на всероссийских и международных школах, конференциях и научных семинарах.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертационной работы обоснована актуальность, новизна, научная и практическая значимость исследуемой темы, сформулированы цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту, описаны степень достоверности, апробация результатов работы, а также её краткое содержание.

Первая глава посвящена методам проведения эксперимента и обработки полученных экспериментальных данных. В параграфе 1.1 приведено описание проводимых в диссертационной работе гамма-активационных экспериментов. Схема эксперимента приведена на рисунке 1.

Облучение мишеней проводилось на двух установках: импульсном разрезном микротроне РМ-55 НИИЯФ МГУ [21] с максимальной энергией электронов 55 МэВ и микротроне МТ-25 ОИЯИ при энергиях от 10 до 23 МэВ. Во всех экспериментах тормозное излучение генерировалось на вольфрамовых конверторах. Для контроля параметров облучения и калибровки тока ускорителя в зависимости от материала исследуемой мишени использовались мониторы из меди и кобальта. После этапа облучения каждая исследуемая мишень перемещалась в специальное низкофоновое помещение, вынесенное за пределы ускорительного зала, для стадии измерения наведённой активности. Идентификация изотопов проводилась с использованием метода γ -спектроскопии [22] по энергиям γ -линий и периодам полураспада радионуклидов. Примеры расшифрованных спектров остаточной активности для облучённого при энергии 55 МэВ образца из естественной смеси

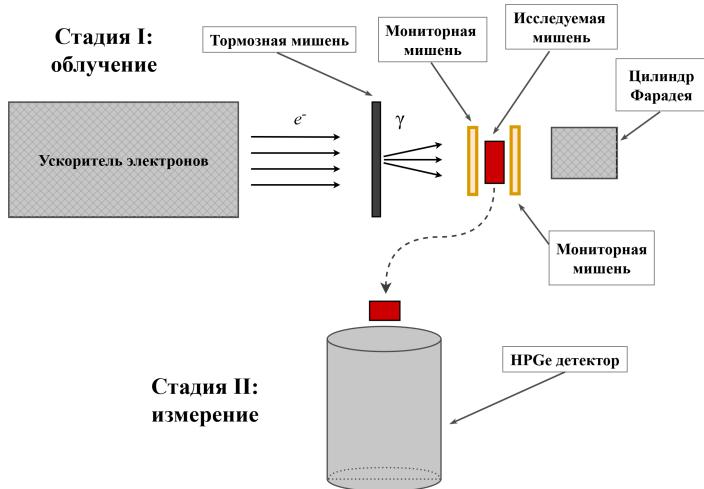


Рисунок 1. Схема гамма-активационного эксперимента

изотопов молибдена через 4 минуты и 7.7 часа после облучения представлены на рисунке 2.

В параграфе 1.2 описаны методы расчёта данных о фотоядерных реакциях. При работе с непрерывным энергетическим спектром одной из основных величин считается выход фотоядерной реакции, являющийся сверткой сечения фотонуклонной реакции $\sigma(E)$ с плотностью распределения числа тормозных фотонов по энергии на один электрон пучка ускорителя $W(E, E^m)$:

$$Y(E^m) = \alpha \eta \int_{E_{thr}}^{E^m} W(E, E^m) \cdot \sigma(E) dE, \quad (1)$$

где α - количество исследуемых ядер, отнесенное к 1 см^2 мишени, η - процентное содержание исследуемого изотопа в природной смеси.

При работе с мишенями естественного изотопного состава необходимо учитывать все возможные реакции, приводящие к образованию конечного ядра:

$$Y(E^m) = \alpha \sum_i \eta_i \int_{E_{thr_i}}^{E^m} W(E, E^m) \cdot \sigma_i(E) dE, \quad (2)$$

где индекс i соответствует номеру реакции, дающей вклад в образование исследуемого изотопа.

Формулы (1) и (2) позволяют проводить теоретические оценки выходов при известных сечениях реакций. В настоящей работе сечение фотоядерных реакций

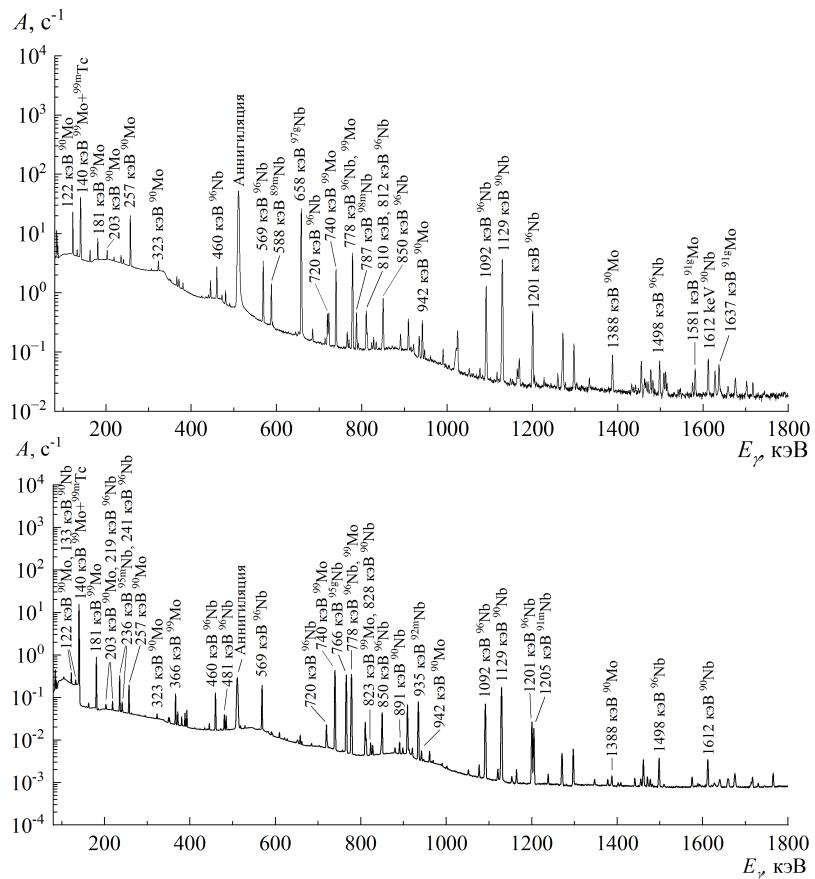


Рисунок 2. Спектры остаточной активности облучённого образца из естественной смеси изотопов молибдена через 4 минуты и 7.7 часа после окончания облучения.

Продолжительность измерений составляла 6.3 часа и 50 дней [13]

$\sigma(E)$ были рассчитаны с помощью КМФР и программного кода TALYS, что позволило на основе формул (1) и (2) получить теоретические значения выходов.

Экспериментальные выходы образования изотопов определялись по остаточной активности продуктов реакции на основе площади соответствующих фотопиков в γ -спектрах. При расчётах учитывались ток ускорителя во время облучения, мёртвое время детектора и схема радиоактивных распадов продукта реакции. В случае, когда конечное ядро образовывалось только в результате фотоядерных реакций, выход рассчитывался по формуле:

$$Y_1 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{I_{avr} \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t_1})}, \quad (3)$$

где число радиоактивных ядер на момент окончания облучения:

$$N_{10} = \frac{S_1}{k_1 \cdot (e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}, \quad (4)$$

λ_1 - постоянная распада изотопа; I_{avr} - средний ток ускорителя во время облучения; S_1 - площадь фотопика в спектре остаточной активности; k_1 - коэффициент, зависящий от ε_{γ_1} - эффективности регистрации детектором γ -квантов и I_{γ_1} - квантового выхода γ -квантов с определенной энергией E_{γ} ; t_1 - время облучения; t_2 и t_3 - времена начала и окончания измерения спектров.

В случае образования ядра не только в результате фотоядерной реакции, но и при распаде на него другого ядра, выход рассчитывался по двухканальной формуле:

$$Y_2 = \frac{\lambda_2 N_{20}}{I_{avr}(1 - e^{-\lambda_2 t_1})} - \chi Y_1 \cdot \frac{\lambda_2(1 - e^{-\lambda_1 t_1}) - \lambda_1(1 - e^{-\lambda_2 t_1})}{(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_2 t_1})}, \quad (5)$$

где число ядер дочернего ядра на момент окончания облучения:

$$N_{20} = \frac{S_2}{k_2(e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)})} + \frac{\chi N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\lambda_1 - \lambda_2 \frac{e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)}}{e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)}} \right), \quad (6)$$

χ - вероятность распада материнского ядра на дочернее.

Для возможности сравнения с результатами экспериментов, выполненных в другой геометрии, а также анализа тенденций изменения фотоядерных реакций с ростом массового числа в диссертационной работе были получены сечения на эквивалентный квант. Теоретические расчёты на основе КМФР, программного кода TALYS и оценённых ядерных данных из библиотеки JENDL были выполнены с использованием формулы:

$$\sigma_q^{prod} = \frac{\sum_i \eta_i \int_{E_{thr}}^{E^m} \sigma_i(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \cdot W(E, E^m) dE}. \quad (7)$$

Экспериментальные значения сечений на эквивалентный квант были получены на основе измеренных в работе выходов фотоядерных реакций:

$$\sigma_q^{prod} = \frac{Y(E^m)}{\alpha \frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \cdot W(E, E^m) dE}. \quad (8)$$

Спектр тормозных γ -квантов $W(E, E^m)$ рассчитывался на основе моделирования эксперимента с помощью программы GEANT4 [20].

Во **второй главе** описаны основные модели, используемые для теоретических расчётов данных о фотоядерных реакциях различной множественности. В

параграфе 2.1 представлена основная информация, связанная с процессом распада ГДР. Показано, что основными параметрами для моделирования фотоядерных реакций через распад ГДР являются: энергия максимума резонанса, сечение в максимуме, ширина на полувысоте и интегральное сечение.

Параграф 2.2 посвящён комбинированной модели фотонуклонных реакций, разработанной в НИИЯФ МГУ для описания фотоядерных реакций. Отличительной особенностью КМФР является учёт изоспинового расщепления ГДР, приводящего к значительному увеличению расчётных сечений фотопротонных реакций на ядрах с $N \neq Z$. Кроме того, в КМФР учитываются влияние квадрупольного резонанса, обертона ГДР и квазидейtronного механизма фотопоглощения.

В параграфе 2.3 приводится описание применения программного кода TALYS 2.0 [12] для расчёта сечений различных фотоядерных реакций. В исследуемой в диссертации области энергий полное сечение фотопоглощения включает в себя сечение ГДР и вклад квазидейtronного механизма фотопоглощения. Сечение ГДР в программном коде TALYS 2.0 задаётся с помощью одной из 10 фотонных силовых функций, отвечающих феноменологическим и микроскопическим моделям. В настоящей работе использовались параметры по умолчанию: фотонная силовая функция SMLO (PSF-9) [23] и формула Гильберта-Камерона для плотности ядерных уровней [24], сочетающая в себе модель постоянной температуры и модель ферми-газа.

Третья глава посвящена результатам исследования фотоядерных реакций на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. В параграфах 3.1-3.4 описаны параметры проведения экспериментов, приведены измеренные выходы и сечения на эквивалентный квант для различных фотоядерных реакций, проведено сравнение полученных данных с результатами расчётов, выполненных на основе КМФР и с использованием программного кода TALYS 2.0. Анализ сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на изотопах эрбия и диспрозия показал, что для описания образования большинства лёгких ядер необходимо учитывать многонуклонные реакции (таблица 1). Для фотопротонных реакций показано лучшее согласие экспериментальных данных с расчётом на основе КМФР, что указывает на необходимость учёта изоспинового расщепления ГДР, квадрупольного резонанса и обертона ГДР.

В параграфах 3.3 и 3.4 также представлены экспериментальные изомерные отношения для ядер ^{109}Pd , ^{102}Rh , ^{101}Rh , ^{99}Rh , ^{91}Mo и ^{95}Nb . Проведено сравнение изомерных отношений, полученных в различных работах, с результатами, вычисленными на основе программного кода TALYS 2.0 с использованием в качестве тормозного спектра сечений образования тормозных γ -квантов, рассчитанных на основе таблиц Зельцера-Бергера [19]. Измеренные в настоящей работе значения хорошо согласуются с данными других экспериментальных работ при

Таблица 1. Сравнение полученных в настоящей работе сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на стабильных изотопах эрбия и диспрозия σ_q^{prod} с данными, рассчитанными с помощью КМФР σ_q^{prod} КМФР и по программе TALYS 2.0 с параметрами по умолчанию σ_q^{prod} TALYS

Реакция образования изотопа	E_{thr} , МэВ	σ_q^{prod} эксп., мб	σ_q^{prod} КМФР, мб	σ_q^{prod} TALYS, мб
$^{nat}\text{Er}(\gamma, \text{in})^{161}\text{Er} = 0.00139\cdot^{162}\text{Er}(\gamma, 1n) + 0.01601\cdot^{164}\text{Er}(\gamma, 3n) + 0.33503\cdot^{166}\text{Er}(\gamma, 5n) + 0.22869\cdot^{167}\text{Er}(\gamma, 6n)$	9.20 24.96 40.08 46.52	0.308 ± 0.026	0.459 0.283 0.074 0.100 0.002	0.539 0.266 0.122 0.145 0.006
$^{nat}\text{Er}(\gamma, \text{in})^{163}\text{Er} = 0.01601\cdot^{164}\text{Er}(\gamma, 1n) + 0.33503\cdot^{166}\text{Er}(\gamma, 3n) + 0.22869\cdot^{167}(\gamma, 4n) + 0.26978\cdot^{168}\text{Er}(\gamma, 5n)$	8.85 23.97 30.41 38.18	4.93 ± 0.96	5.765 3.304 1.870 0.455 0.136	6.913 3.068 2.918 0.722 0.205
$^{nat}\text{Dy}(\gamma, \text{in})^{155}\text{Dy} = 0.00056\cdot^{156}\text{Dy}(\gamma, 1n) + 0.00095\cdot^{158}\text{Dy}(\gamma, 3n) + 0.02329\cdot^{160}\text{Dy}(\gamma, 5n)$	9.44 25.47 40.87	0.051 ± 0.002	0.104 0.098 0.004 0.002	0.112 0.091 0.007 0.01
$^{nat}\text{Dy}(\gamma, \text{in})^{157}\text{Dy} = 0.00095\cdot^{158}\text{Dy}(\gamma, 1n) + 0.02329\cdot^{160}\text{Dy}(\gamma, 3n) + 0.18889\cdot^{161}\text{Dy}(\gamma, 4n) + 0.25475\cdot^{162}\text{Dy}(\gamma, 5n)$	9.05 24.46 30.92 39.11	0.400 ± 0.014	0.779 0.171 0.121 0.360 0.127	1.164 0.162 0.196 0.611 0.180
$^{nat}\text{Dy}(\gamma, \text{in})^{159}\text{Dy} = 0.02329\cdot^{160}\text{Dy}(\gamma, 1n) + 0.18889\cdot^{161}\text{Dy}(\gamma, 2n) + 0.25475\cdot^{162}\text{Dy}(\gamma, 3n) + 0.24896\cdot^{163}\text{Dy}(\gamma, 4n) + 0.2826\cdot^{164}\text{Dy}(\gamma, 5n)$	8.58 15.03 23.23 29.50 37.16	7.09 ± 0.49	15.94 4.12 9.36 1.64 0.55 0.27	19.21 3.89 11.57 2.50 0.94 0.32

энергии тормозного излучения 55 МэВ. Анализ изомерных отношений указывает на необходимость учёта многонуклонных реакций и порогового фактора, а именно энергии каскадных переходов, необходимых для заселения высокоспинового состояния.

Параграф 3.5 посвящён общим закономерностям, полученным для фотонуклонных реакций на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Экспериментально измеренные сечения фотоядерных реакций на мишениях естественного изотопного состава представляют собой сумму вкладов от всех стабильных изотопов элемента. Для получения парциальных сечений на отдельных стабильных

изотопах был применён метод, основанный на совместном анализе экспериментальных сечений на эквивалентный квант и предсказаний КМФР. В рамках этого метода парциальные сечения выделялись из данных для естественной смеси на основе теоретически рассчитанных весовых коэффициентов для каждого изотопа.

Анализ полученных данных указывает на тенденцию уменьшения сечений на эквивалентный квант для реакции (γ , 1p) внутри одного изотопного ряда при увеличении массового числа ядра-мишени (рисунок 3). Основной причиной наблюдаемого спада является усиление конкуренции со стороны нейтронных каналов распада, таких как (γ , 2n), обусловленное снижением энергии связи нейтрона в нейтронизбыточных ядрах. Кроме того, наблюдается ослабление влияния изоспинового расщепления ГДР для более тяжёлых по Z ядер.

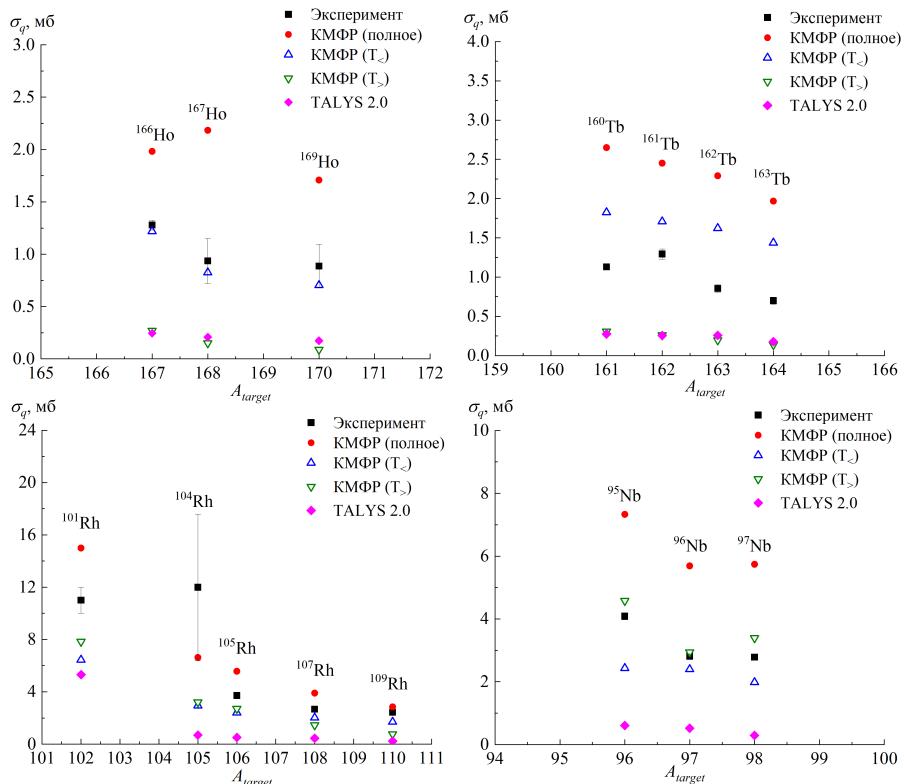


Рисунок 3. Зависимости сечений на эквивалентный квант для реакции (γ , 1p) на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена от массового числа ядра-мишени

Ранее в НИИЯФ МГУ на импульсном разрезном микротроне PM-55, используемом в настоящей диссертационной работе, были измерены данные для фотоядерных реакций на мишенях естественного изотопного состава из селена [25], иттербия, гафния и ртути [15]. Используя результаты, полученные в настоящей работе и в вышеуказанных экспериментах, были построены зависимости сечений на эквивалентный квант от отношения N/Z (рисунок 4).

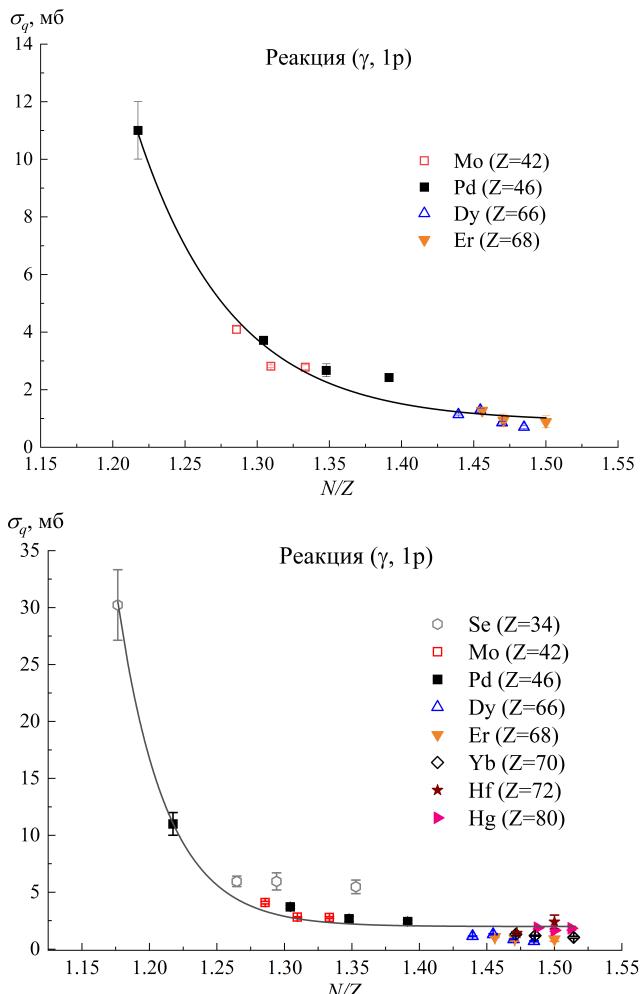
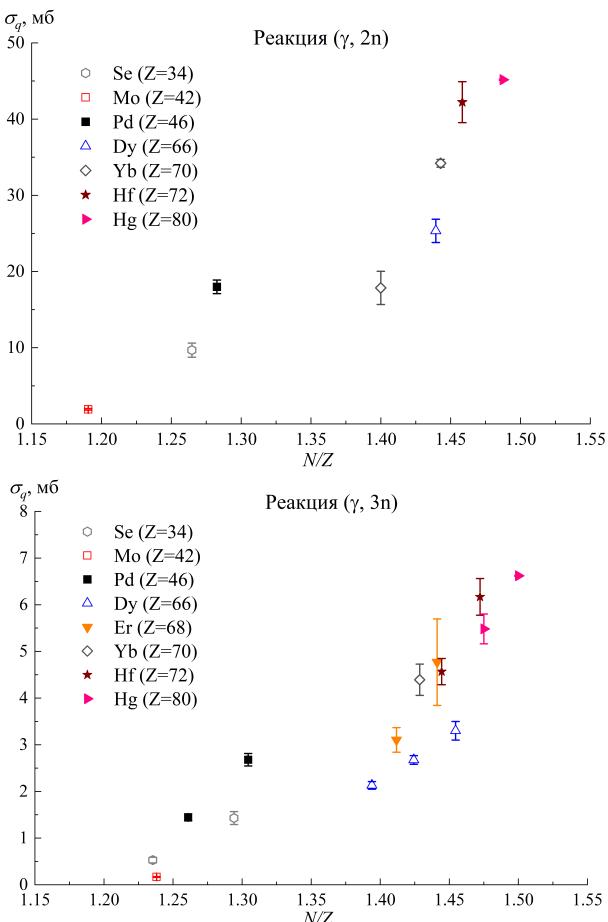


Рисунок 4. Зависимости сечений на эквивалентный квант для реакции $(\gamma, 1p)$, полученных в экспериментах на микротроне PM-55, от отношения N/Z

Полученные зависимости являются убывающими и удовлетворительно описываются экспоненциальными функциями. Аналогично зависимости внутри изотопного ряда, спад сечения реакции ($\gamma, 1p$) с ростом N/Z объясняется усилением конкуренции со стороны нейтронных каналов, в первую очередь ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$). Экспериментальным подтверждением этому служат возрастающие зависимости сечений на эквивалентный квант для реакций ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$) от N/Z , полученные для ряда стабильных изотопов от селена до ртути на пучке микротрона РМ-55 и представленные на рисунке 5.



В четвертой главе показаны возможности применения данных, измеренных в диссертационной работе, для решения задач ядерной астрофизики и медицины. В параграфе 4.1 приведены полученные в настоящей диссертационной работе сечения на эквивалентный квант для основных реакций, приводящих к распаду ^{102}Pd и ^{92}Mo . В таблицах 2 и 3 представлено сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчётов, выполненных на основе КМФР и с использованием программного кода TALYS 2.0 и библиотеки JENDL. Из таблицы 2 следует, что для распада ^{102}Pd основными реакциями являются $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 1p)$ и $(\gamma, 2n)$. Расчёты, выполненные по программе TALYS 2.0 и на основе оценённых данных библиотеки JENDL, стандартно используемых для расчёта скоростей распада обойдённых ядер, практически в 2.5 раза занижают результаты для фотопротонной реакции $^{102}\text{Pd}(\gamma, 1p)$ и примерно в 1.5 раза завышают значения для фотонейтронной реакции $^{102}\text{Pd}(\gamma, 1n)$.

Таблица 2. Сечения на эквивалентный квант для реакций, приводящих к распаду обойдённого ядра ^{102}Pd

Реакция	E_{thr} , МэВ	$\sigma_q, \text{мб}$			
		Эксперимент	КМФР	TALYS	JENDL
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 1n)^{101}\text{Pd}$	10.57	64.77 ± 3.40	87.75	88.21	87.55
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 1p)^{101}\text{Rh}$	7.81	10.94 ± 0.99	14.71	4.63	4.00
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n)^{100}\text{Pd}$	18.85	9.03 ± 0.65	8.92	11.41	13.42
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 1n1p)^{100}\text{Rh}$	17.70	1.80 ± 0.25	3.61	2.33	1.92
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{99}\text{Rh}$	25.78	1.05 ± 0.06	1.33	1.30	1.60
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 3n)^{99}\text{Pd}$	29.96	0.58 ± 0.03	0.85	0.85	0.77
$^{102}\text{Pd}(\gamma, \text{abs})$		88.18 ± 3.61	117.17	108.75	108.93

Таблица 3. Сечения на эквивалентный квант для реакций, приводящих к распаду обойдённого ядра ^{92}Mo

Реакция	E_{thr} , МэВ	$\sigma_q, \text{мб}$			
		Эксперимент	КМФР	TALYS	JENDL
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91m+g}\text{Mo}$	12.67	48.74 ± 2.52	49.36	52.96	62.46
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{90}\text{Mo}$	22.78	1.84 ± 0.10	1.92	3.64	1.68
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m}\text{Nb}$	7.56	26.80 ± 5.84	¹	45.02	36.35
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m+g}\text{Nb}$	7.46	29.84 ± 6.51 ²	39.64	51.35	47.12
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n1p)^{90}\text{Nb}$	19.51	2.53 ± 0.15	2.45	4.99	2.56
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n1p)^{89}\text{Nb}$	29.61	0.73 ± 0.07	0.40	0.89	0.20
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{89}\text{Mo}$	36.01		0.08	0.06	0.01
$^{92}\text{Mo}(\gamma, \text{abs})$		83.68 ± 6.98	93.83	113.89	114.03

1 В КМФР невозможно разделить образование метастабильного и основного состояний.

2 Расчитано на основе изомерного отношения TALYS 2.0: $(\sigma_q^m + \sigma_q^q)/(\sigma_q^m) = 1.14$.

Анализ данных таблицы 3 показывает, что для распада ^{92}Mo основными являются реакции $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 1p)$. Для реакции $(\gamma, 1n)$ результат расчёта по программе TALYS 2.0 демонстрирует удовлетворительное согласие с экспериментом, в то время как сечение, оценённое на основе библиотеки JENDL, завышено приблизительно в 1.3 раза. Для фотопротонной реакции $(\gamma, 1p)$ оба теоретических метода приводят к существенному завышению экспериментальных данных.

На рисунке 6 показаны рассчитанные на основе статистической модели распространённости обойдённых ядер, образовавшихся в результате взрыва сверхновой II типа с массой равной 20-ти солнечным массам, нормированные на распространённость обойдённых ядер в солнечной системе [8]. Из рисунка 6 следует, что теоретическая распространённость ^{92}Mo занижена примерно на 2 порядка. Исходя из полученных экспериментальных данных, одной из причин такого поведения может быть переоценка теоретическими моделями сечений реакций $(\gamma, 1p)$ и $(\gamma, 1n)$.

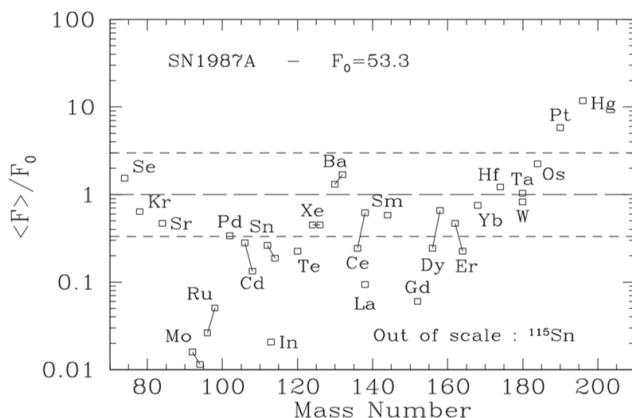


Рисунок 6. Рассчитанные на основе статистической модели распространённости обойдённых ядер, образовавшихся в результате взрыва сверхновой II типа с массой равной 20-ти солнечным массам (металличностью $Z = 0.3 Z_{\odot}$), нормированные на распространённость обойдённых ядер в солнечной системе [8]

В параграфе 4.2 приведены радиохимические выходы фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов эрбия и диспрозия, полученные в экспериментах на пучке импульсного разрезного микротрона с верхней границей тормозного спектра 55 МэВ. Для получения медицинских изотопов в количествах, достаточных для доклинических испытаний, метод наработки должен обеспечивать: активность целевого нуклида примерно 1 ГБк, отсутствие долгоживущих побочных изотопов и отношение выходов целевого и побочных нуклидов не менее трёх порядков. Показано, что наработка ^{166}Ho на естественной смеси изотопов эрбия

является нецелесообразной из-за высокой активности побочного изотопа ^{167}Ho , поэтому для получения ^{166}Ho нужно использовать обогащённую мишень из ^{167}Er .

Для производства ^{161}Tb побочным продуктом является ^{160}Tb . Оптимальные энергии для наработки медицинского изотопа ^{161}Tb на моноизотопных мишенях ^{162}Dy и ^{163}Dy ($4 \text{ г}/\text{см}^2$) оценивались с помощью расчёта в КМФР активностей и радиохимических выходов ^{160}Tb и ^{161}Tb при энергиях пучка электронов от порога фотопротонных реакций до 55 МэВ. Анализ образования целевого и побочного изотопов (рисунок 7) показал, что для фотоядерной наработки ^{161}Tb следует использовать мишень из моноизотопа ^{162}Dy при максимальной энергии тормозного излучения 21–22 МэВ и мишень из ^{163}Dy при энергиях 29–30 МэВ.

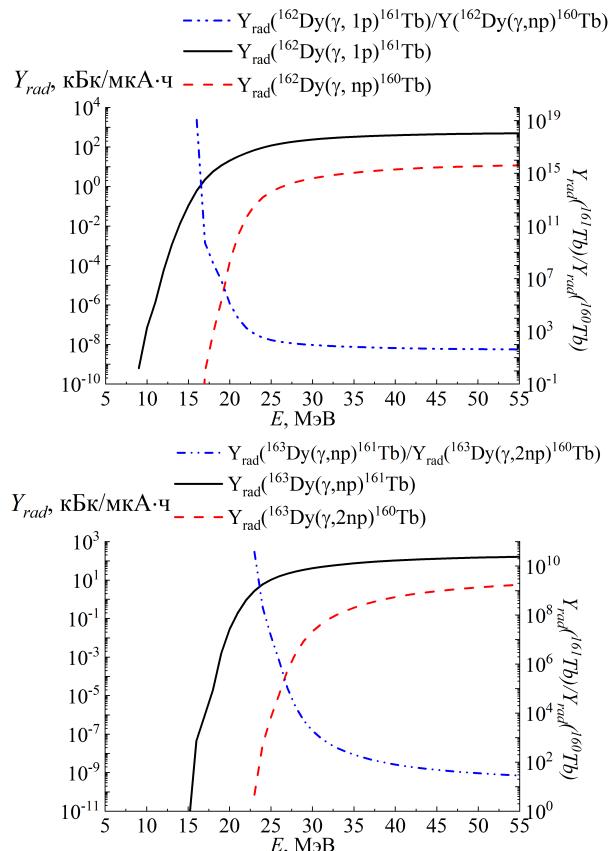


Рисунок 7. Радиохимические выходы фотоядерных реакций на моноизотопах ^{162}Dy и ^{163}Dy ($4 \text{ г}/\text{см}^2$), приводящих к образованию ^{160}Tb и ^{161}Tb , и их отношения при энергиях пучка электронов от порога реакций до 55 МэВ [14]

Заключение

1. Активационным методом на пучках тормозного гамма-излучения измерены выходы и сечения фотоядерных реакций (γ , inkp) различной множественности на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Сечения на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах эрбия и диспрозия получены впервые.
2. Использование гамма-активационной методики позволило в экспериментах на естественных изотопных мишениях определить данные для фотоядерных реакций сразу на нескольких стабильных изотопах. На основе полученных экспериментальных значений были выявлены тенденции уменьшения сечений на эквивалентный квант для реакции (γ , 1p) с ростом массового числа внутри одного изотопного ряда, а также общего уменьшения с ростом отношения N/Z в области атомных масс от 74 до 201.
3. Выполнены теоретические расчёты данных для фотопротонных и фотонейтронных реакций на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS. Сравнение экспериментальных и теоретических сечений на эквивалентный квант позволило проанализировать вклады различных механизмов фотоядерных реакций в зависимости от выбранного изотопа. Лучшее согласие данных для фотопротонных реакций с расчётами на основе КМФР указывает на необходимость учёта изоспинового расщепления ГДР для их корректного описания. Показано, что вклад изоспинового расщепления ГДР в сечения на эквивалентный квант для фотопротонных реакций уменьшается с ростом числа протонов в ядре.
4. Проведённое в работе сравнение экспериментально измеренных изомерных отношений для палладия, родия, молибдена и ниобия, с вычислениями, выполненными с помощью программного кода TALYS 2.0, указывает на необходимость учёта порогового фактора и многонуклонных реакций.
5. Продемонстрирована применимость измеренных сечений на эквивалентный квант для оценки скоростей образования и распада обойдённых ядер ^{92}Mo и ^{102}Pd в процессе нуклеосинтеза. Использование гамма-активационной методики позволило получить данные для основных фотоядерных реакций, приводящих к образованию и распаду ядер ^{92}Mo и ^{102}Pd . Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант с теоретическими расчётами показало, что программный код TALYS 2.0 и библиотека ядерных данных JENDL, используемые для расчёта скоростей распада обойдённых ядер, переоценивают выход фотоядерных реакций $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91}\text{Mo}$ и $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91}\text{Nb}$,

что является одной из причин низкой теоретической распространённости обойдённого ядра ^{92}Mo .

- На основе анализа радиохимических выходов фотопротонных реакций на изотопах эрбия и диспрозия, были определены оптимальные параметры для фотоядерной наработки перспективных медицинских изотопов ^{161}Tb и ^{166}Ho на ускорителях электронов. Продемонстрировано, что для фотоядерного производства изотопа ^{161}Tb можно использовать мономицелевую мишень из ^{162}Dy при энергиях электронного пучка 21-22 МэВ и мишень из изотопа ^{163}Dy на пучках с энергиями 29-30 МэВ.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в докторской совет МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

- Фурсова Н.Ю.**, Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Порядина О.В., Ханкин В.В. Экспериментальное исследование фотоядерных реакций на изотопах молибдена // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2025. – Т. 80, №6. – 2560202. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2560202. Импакт-фактор: 0.169 (РИНЦ), Q4. 1.04 п.л., вклад соискателя: 50%.
- Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А. Теоретические расчеты наработки ^{161}Tb на изотопах диспрозия // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2025. – Т. 80, №4. – 2540201. EDN: JIFGRW. Импакт-фактор: 0.169 (РИНЦ), Q4. 0.61 п.л., вклад соискателя: 50%.

Переводная версия:

- Fursova N.Yu.**, Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A. Theoretical Calculations of ^{161}Tb Production on Dysprosium Isotopes // Moscow University Physics Bulletin. – 2025. – Vol. 80, №4. – pp. 698–706. EDN: FBODFV. Импакт-фактор: 0.159 (SJR), Q4. 0.65 п.л., вклад соискателя: 50%.
- Poriadina O.V., Belyshev S.S., **Fursova N.Yu.**, Khankin V.V., Kuznetsov A.A. Photonuclear reactions on mercury isotopes // Nuclear Physics A. – 2025. – Vol. 1063. – 123206. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2025.123206. Импакт-фактор: 2.5 (JIF), Q2. 1.18 п.л., вклад соискателя: 30%.
 - Rasulova F.A., Aksenenko N.V., Alekseev S.I., Belyshev S.S., Chuprakov I., **Fursova N.Yu.**, Madumarov A.S., Khushvaktov J.H., Kuznetsov A.A. Photonuclear reactions on stable isotopes of molybdenum at bremsstrahlung endpoint energies of 10–23 MeV // Physical Review C. – 2025. – Vol. 111, Iss. 2. – 024604. EDN: YSETLY. Импакт-фактор: 3.4 (JIF), Q1. 1.07 п.л., вклад соискателя: 20%.

5. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Орлин В.Н., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В. Фоторасщепление изотопов палладия // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2020. – №6. – С. 3–27. EDN: UDPBIU. Импакт-фактор: 0.169 (РИНЦ), Q4. 1.65 п.л., вклад соискателя: 40%.

Переводная версия:

Belyshev S.S., Ishkhanov B.S., Kuznetsov A.A., Orlin V.N., Prosnjakov A.A., **Fursova N.Yu.**, Khankin V.V. Photodisintegration of Palladium Isotopes // Moscow University Physics Bulletin. – 2020. – Vol. 75, №6. – pp. 513–540. EDN: JCIWJQ. Импакт-фактор: 0.159 (SJR), Q4. 1.81 п.л., вклад соискателя: 40%.

6. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В. Исследование фотонейтронных реакций, приводящих к образованию и распаду изотопа ^{102}Pd // Ядерная физика. – 2020. – Т. 83, №6. – С. 474–481. EDN: MZIOL. Импакт-фактор: 0.357 (РИНЦ), Q4. 0.55 п.л., вклад соискателя: 40%.

Переводная версия:

Belyshev S.S., Ishkhanov B.S., Kuznetsov A.A., Prosnjakov A.A., **Fursova N.J.**, Khankin V.V. Investigation of Photoneutron Reactions Leading to the Production and Decay of the Isotope ^{102}Pd // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – Vol. 83, №6. – pp. 787–795. EDN: YFNCCG. Импакт-фактор: 0.196 (SJR), Q4. 0.60 п.л., вклад соискателя: 40%.

Список цитируемой литературы

1. Ишханов Б.С., Капитонов И.М. *Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами*. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1979.
2. Starovoitova V., Tchelidze L., Wells D. Production of medical radioisotopes with linear accelerators // *Appl. Radiat. Isot.* 2014. Vol. 85, pp. 39–44.
3. Kazakov A., Ekatova T., Babenya J. Photonuclear production of medical radiometals: a review of experimental studies // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2021. Vol. 328, pp. 493–505.
4. Müller C., Reber J., Haller S. et al. Direct in vitro and in vivo comparison of ^{161}Tb and ^{177}Lu using a tumour-targeting folate conjugate // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2014. Vol. 41, no. 3, pp. 476–485.
5. Rajendran J.G., Eary J., Bensinger W.M. et al. High-dose ^{166}Ho -DOTMP in myeloablative treatment of multiple myeloma: Pharmacokinetics, biodistribution, and absorbed dose estimation // *J. Nucl. Med.* 2002. Vol. 43, no. 10, pp. 1383–1390.

6. Bahrami Samani A., Bagheri R., Jalilian A. et al. Production, Quality Control and Pharmacokinetic Studies of ^{166}Ho -EDTMP for Therapeutic Applications // *Sci. Pharm.*. 2010. Vol. 78, no. 3, pp. 423–434.
7. Uusijärvi H., Bernhardt P., Rösch F. et al. Electron- and Positron-Emitting Radiolanthanides for Therapy: Aspects of Dosimetry and Production // *J. Nucl. Med.*. 2006. Vol. 47, no. 5, pp. 807–814.
8. Arnould M., Goriely S. The p-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics status // *Phys. Rep.* 2003. Vol. 384, no. 1-2, pp. 1–84.
9. Григоренко Л.В., Антоненко Н.В., Артюков И.А. и др. Проект научной программы ИНОК — комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ // *Физмат*. 2023. Т. 1, № 3-4, С. 123–264.
10. Ishkhanov B.S., Orlin V.N. Combined model of photonucleon reactions // *Phys. Atom. Nuclei*. 2011. Vol. 74, no. 1, pp. 19–39.
11. Ishkhanov B.S., Orlin V.N. Modified version of the combined model of photonucleon reactions // *Phys. Atom. Nuclei*. 2015. Vol. 78, no. 5, pp. 557–573.
12. Koning A., Hilaire S., Goriely S. TALYS: modeling of nuclear reactions // *Eur. Phys. J. A*. 2023. Vol. 59, 131.
13. Фурсова Н.Ю., Белишев С.С., Кузнецов А.А. и др. Экспериментальное исследование фотоядерных реакций на изотопах молибдена // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физ. астрон.* 2025. Т. 80, № 6, 2560202, С. 1–14.
14. Fursova N.Yu., Aliev R.A., Belyshev S.S. et al. Theoretical Calculations of ^{161}Tb Production on Dysprosium Isotopes // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2025. Vol. 80, no. 4, pp. 698–706.
15. Poriadina O.V., Belyshev S.S., Fursova N.Yu. et al. Photonuclear Reactions on Mercury Isotopes // *Nucl. Phys. A*. 2025. Vol. 1063, 123206.
16. Rasulova F.A., Aksenov N.V., Alekseev S.I. и др. Photonuclear reactions on stable isotopes of molybdenum at bremsstrahlung endpoint energies of 10–23 MeV // *Phys. Rev. C*. 2025. Т. 111, № 2, 024604, С. 16.
17. Belyshev S.S., Ishkhanov B.S., Kuznetsov A.A. et al. Photodisintegration of Palladium Isotopes // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2020. Vol. 75, no. 6, pp. 513–540.
18. Belyshev S.S., Ishkhanov B.S., Kuznetsov A.A. et al. Investigation of Photoneutron Reactions Leading to the Production and Decay of the Isotope ^{102}Pd // *Phys. Atom. Nuclei*. 2020. Vol. 83, no. 6, pp. 787–795.
19. Berger M.J., Seltzer S.M. Bremsstrahlung and Photoneutrons from Thick Tungsten and Tantalum Targets // *Phys. Rev. C*. 1970. Vol. 2, no. 2, pp. 621–631.
20. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. Geant4 — a simulation toolkit // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2003. Vol. 506, no. 3, pp. 250–303.
21. Ermakov A.N., Ishkhanov B.S., Kamanin A.N. et al. A Multipurpose Pulse Race-Track Microtron with an Energy of 55 MeV // *Instrum. Exp. Tech.* 2018. Vol. 61, no. 2,

- pp. 173–191.
- 22. Gilmore G.R. *Practical Gamma-ray Spectroscopy*. Wiley. 2008.
 - 23. Goriely S., Plujko V. Simple empirical $E1$ and $M1$ strength functions for practical applications // *Phys. Rev. C*. 2019. Vol. 99, no. 1, 014303.
 - 24. Gilbert A., Cameron A.G.W. A composite nuclear-level density formula with shell corrections // *Can. J. Phys.* 1965. Vol. 43, pp. 1446–1496.
 - 25. Rasulova F.A., Aliev R.A., Belyshev S.S. et al. Photonuclear Reactions on Natural Mixture of Selenium // *Phys. Atom. Nuclei*. 2023. Vol. 86, pp. 725–735.