

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи



Стопани Константин Александрович

Фотоядерные реакции на изотопах палладия

Специальность 01.04.16 — физика атомного ядра и
элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2012

Работа выполнена в отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Ишханов Борис Саркисович**

Официальные оппоненты: **Романовский Евгений Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
заведующий отделом научно-технической
информации

Блохин Анатолий Иванович,
кандидат физико-математических наук,
ГНЦ РФ Физико-энергетический институт
имени А. И. Лейпунского,
начальник отдела теоретической физики

Ведущая организация: Институт ядерных исследований РАН,
г. Москва

Защита состоится « 23 » ноября 2012 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.77 на базе федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» по адресу:
119234, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5, НИИЯФ МГУ, «19 корпус», ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « » _____ 2012 г.

Ученый секретарь совета Д 501.001.77, доктор
физико-математических наук, профессор

Страхова С. И.



Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Диссертация посвящена экспериментальному изучению фотоядерных реакций на стабильных изотопах палладия. Исследование реакций, протекающих под действием γ -квантов, является важным источником информации о строении и свойствах атомных ядер. Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования в этой области ведутся с середины прошлого века, до сих пор задача удовлетворительного описания ядерных процессов, вызываемых γ -квантами и, прежде всего, процессов образования и распада гигантских резонансов является актуальной [1]. Однако, интерес к экспериментальным исследованиям фотоядерных реакций связан не только с фундаментальными проблемами ядерной физики и той ролью, которую играют электромагнитные процессы и взаимодействия γ -квантов с ядрами в изучении атомных ядер. Следует отметить также большое значение данных, получаемых при изучении фотоядерных реакций за рамками собственно ядерной физики. Так, большое внимание в настоящее время уделяется роли фотоядерных реакций в астрофизическом нуклеосинтезе [2]. Ряд стабильных нейтронно-дефицитных ядер, таких как ^{98}Ru , ^{138}La , ^{180}Ta и др. не могут быть образованы в s - и r -процессах т.к. число нейтронов в них мало по сравнению с соседними изотопами. Один из наиболее вероятных путей образования данных ядер — это фотоядерные реакции (γ, n) , (γ, p) и (γ, α) , составляющие основу p -процесса, протекающего во время взрыва сверхновой. Среди других астрофизических приложений, так или иначе требующих более детального описания фотоядерных процессов, можно отметить существенную для физики нейтронных звезд задачу измерения распределения нейтронов в тяжелых ядрах и детальное исследование фотоядерных реакций на легчайших ядрах (D , Be) [3]. Поскольку астрофизические процессы протекают в условиях интенсивных потоков γ -квантов и нейтронов, представляет особый интерес изучение фотоядерных реакций, приводящих к образованию ядер, удаленных от долины β -стабильности, мало исследованных к настоящему времени.

Говоря о прикладном значении фотоядерных данных, необходимо отметить тот факт, что необходимость систематических и обширных данных о взаимодействии γ -квантов с ядрами в значительной мере обусловлена развитием технологии промышленного производства компактных ускорителей электронов, таких как микротроны с энергиями до нескольких десятков МэВ [4], которые с течением времени находят широкое применение в различных практических областях. Многие из методов, в которых применяются промышленные ускорители электронов, основаны на взаимодействии γ -квантов с яд-

рами. Так, наличие точной информации о сечениях фотоядерных реакций делает возможным широкое использование гамма-активационного анализа для неразрушающего определения химического и изотопного состава. Данный метод является одним из наиболее количественно точных методов анализа (наряду с нейтронно-активационным анализом [5]). Для получения максимальной точности в гамма-активационном анализе требуется аккуратный учет характеристик фотоядерных реакций, влияющих на величину активности, наведенной в результате облучения потоком γ -квантов. Дальнейшее повышение надежности данного метода возможно за счет увеличения числа реакций, наблюдаемых на различных изотопах, входящих в состав исследуемых образцов, что возможно при повышении энергии γ -квантов и наличии информации о каналах реакций с вылетом нескольких нуклонов, что требует наличия экспериментальных данных и об этих реакциях.

Другим перспективным направлением практического применения фотоядерных процессов является трансмутация радиоактивных отходов ядерной энергетики с использованием высокоинтенсивных пучков тормозных фотонов. Возможность успешной реализации данной методики на практике также обуславливается доступностью детальных данных о сечениях и выходах фотоядерных реакций в области нестабильных ядер.

Эти задачи, наряду с некоторыми другими, требуют наличия обширных и надежных данных о фотоядерных процессах. Несмотря на наличие большого числа экспериментальных работ и баз данных по ядерным реакциям (таких как EXFOR [6]), часто информация даже о простейших реакциях, таких как реакции с вылетом одного нуклона на стабильных ядрах, является далеко не полной, причем значительная часть экспериментальных данных имеет систематические ошибки, в том числе трудноустраняемые [7, 8]. Таким образом, задача экспериментального исследования фотоядерных реакций в настоящее время сохраняет свою актуальность.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию фотоядерных реакций на изотопах палладия. Природный палладий состоит из шести стабильных изотопов, что, по всей видимости, обусловило сравнительно малое число экспериментальных работ на этих ядрах. В наиболее ранних работах [9] и [10] были получены суммарные фотопротонные и фотонейтронные сечения в диапазоне энергий от 8 до 30 МэВ без полного разделения вклада различных каналов. Реакции (γ, n) в диапазоне энергий от нейтронного порога до 17 МэВ исследовались в [11] и [12]. Ряд работ посвящен исследованию образования изомерного состояния в реакции $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{m}}\text{Pd}$ в диапазоне энергий от 15 до 55 МэВ [13, 14, 15, 16]. Таким образом, имеющиеся экспериментальные данные о фотоядерных реакциях на стабильных

изотопах палладия носят фрагментарный характер, практически не исследовались реакции с вылетом нескольких нуклонов, а энергия облучения в проведенных экспериментах как правило не превышала 30 МэВ.

Целью данной работы является разработка метода экспериментального изучения фотоядерных реакций и применение данного метода для определения выходов различных фотоядерных реакций на мишени из природного палладия.

Основные новые результаты, полученные в диссертации:

1. Создана система, включающая в себя экспериментальную установку и программное обеспечение, позволяющая проводить эксперименты по методике наведенной активности и показано, что с помощью автоматической системы данного типа возможно проводить одновременное измерение выходов большого числа фотоядерных реакций, протекающих в немоноизотопной мишени во время облучения.
2. Впервые показано, что задача определения выходов фотоядерных реакций, продукты которых входят в цепочки последовательных распадов, может быть сведена к задаче определения параметров линейной статистической модели и предложен метод расчета элементов матрицы линейной модели. Показано, что полученная с помощью предложенного метода оценка выходов является эффективной.
3. С использованием созданной системы были проведены эксперименты по облучению мишени из природного палладия тормозным излучением с верхними энергиями спектра 29.1 и 55.5 МэВ и с помощью предложенного метода обработки получены выходы фотоядерных реакций, в том числе реакций с вылетом от 2 до 5 нуклонов, не описанные в литературе ранее.
4. Впервые экспериментально определены изомерные отношения выходов фотоядерных реакций на изотопах ^{102}Pd и ^{104}Pd . Определены изомерные отношения в фотонейтронной реакции на изотопе ^{110}Pd в области энергий выше гигантского дипольного резонанса и впервые показано, что расхождение с результатами теоретических расчетов изомерных отношений связано с существованием дополнительных уровней с высоким спином в спектре возбужденных состояний ^{109}Pd .
5. Впервые показано, что метод, основанный на использовании современных ускорителей электронов с высокой интенсивностью и энергией пучка, созданные программы моделирования и планирования эксперимента и автоматическая система набора и анализа спектров и мониторин-

га эксперимента позволяют проводить измерение выходов фотоядерных реакций с вылетом нескольких нуклонов и образованием изотопов, удаленных от полосы бета-стабильности.

Практическая значимость данной работы в первую очередь связана с развитием метода анализа цепочек распадов, позволяющего использовать метод наведенной активности для измерения выходов фотоядерных реакций при высоких энергиях облучения и в случае сложного состава облучаемой мишени. Программы реализующие этот метод, а также система набора и анализа спектров наведенной активности и программы планирования и мониторинга эксперимента, реализованные в виде web-сервисов позволяют повысить эффективность применения метода наведенной активности для изучения фотоядерных реакций. Измеренные значения выходов были сопоставлены с данными, опубликованными в других работах и с результатами выполненных теоретических расчетов. При этом выявлены расхождения в выходах фотопротонных реакций, объясняющиеся необходимостью учета изоспинового расщепления, и в изомерных отношениях при высоких энергиях облучения, связанные с неполнотой данных о структуре высоколежащих возбужденных состояний.

Достоверность полученных значений выходов фотоядерных реакций и изомерных отношений обусловлена использованием стандартной методики наведенной активности, применяющейся в ходе экспериментальных исследований фотоядерных реакций. Использованный для обработки измеренных спектров разработанный в рамках данной работы метод анализа цепочек распадов применялся для контроля достоверности результатов совместно с традиционным методом обработки, основанном на применении нелинейного метода наименьших квадратов для определения выходов. При определении выходов фотоядерных реакций изменение тока ускорителя в процессе облучения учитывалось с помощью ионизационной камеры и цилиндра Фарадея. Для расчета эффективности детектора и коррекции эффектов каскадного сложения пиков применялась Монте-Карло модель германиевого детектора на GEANT4.

Апробация работы.

Материалы диссертации доложены автором на следующих специализированных конференциях и совещаниях по ядерной физике:

1. LVII International Conference on Nuclear Physics “NUCLEUS-2007, Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering, and Nuclear Technologies”. К.А. Stopani, “Automated system of nuclear states activation and decay processes calculation in photonuclear experiments”

2. 58 Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. ЯДРО 2008 Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики. Автоматизация обработки данных гамма-активационных экспериментов., С.С. Бельшев, А.А. Кузнецов, А.С. Курилик, К.А. Стопани.
3. LX international conference on nuclear physics “Nucleus 2010. Methods of nuclear physics for femto- and nanotechnologies.”, “Photonuclear reactions yields on palladium isotopes”, S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, K.A. Stopani, S.Yu. Troschiev.
4. 62 Международная конференция. Ядро 2012 фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий., “Photonuclear reactions on palladium isotopes”, S.S. Belyshev, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, K.A. Stopani.

Личный вклад автора заключается в разработке метода определения выходов реакций на основе анализа цепочек распадов и в создании программ, реализующих этот метод. Автором были созданы программы расчета порогов фотоядерных реакций и построения цепочек распадов, программы моделирования и мониторинга фотоядерных экспериментов. В систему набора спектров наведенной активности автором была добавлена программа автоматического анализа спектров, позволяющая проводить удаленную обработку экспериментальных данных. Автором были проведены два эксперимента по облучению мишени пучком тормозного излучения с верхней энергией спектра 29.1 и 55.5 МэВ и измерены γ -спектры наведенной активности. С использованием созданной методики автором были обработаны полученные данные и определены выходы фотоядерных реакций и изомерные отношения. Также автором были проведены расчеты на TALYS, использованные при анализе полученных выходов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных работах, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации 124 страницы текста с 60 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 101 наименование.

Содержание работы

Во введении (глава 1) дается краткая характеристика процессов взаимодействия γ -квантов различных энергий с атомными ядрами и обосновывается актуальность исследований в этой области, связанная с необходимостью получения систематической и обширной информации о фотоядерных реакциях на различных изотопах, как для исследований в области структуры и свойств ядер, так и для целого ряда практических задач. Приводится краткий обзор работ, опубликованных по теме экспериментального изучения фотоядерных реакций на изотопах палладия и показывается, что в области энергий гигантского дипольного резонанса (ГДР) и выше доступные данные о разделенных каналах реакций ограничиваются описанием отдельных реакций (γ, n) и (γ, p) на изотопах ^{110}Pd и ^{108}Pd , а энергия, при которой проводились исследования не превышала 30 МэВ. Основные трудности при экспериментальном исследовании фотоядерных реакций на природном палладии связаны с наличием шести стабильных изотопов в естественной смеси, что приводит к необходимости использовать изотопно очищенные мишени, либо применять методы, позволяющие разделять вклады реакций на различных начальных изотопах.

Следующая часть введения посвящена обзору основных экспериментальных методов исследования фотоядерных реакций и выбору метода измерений в данной работе. Описываются источники γ -квантов с энергией от единиц до нескольких десятков МэВ, которые требуются для экспериментов такого типа. К ним относятся источники γ -квантов на основе тормозного излучения, метод аннигиляции позитронов на лету, метод меченых фотонов и источники на основе обратного комптоновского рассеяния. Из рассмотренных методов наибольшей интенсивностью пучка γ -квантов обладает тормозное излучение, рождаемое ускоренными до нескольких десятков МэВ электронами в мишенях из тяжелых материалов. Главным недостатком тормозного излучения является непрерывный характер спектра γ -квантов, что приводит к необходимости сложной обработки данных для определения сечений реакций. Другие рассмотренные методы получения пучков фотонов, напротив, позволяют получать γ -кванты с большей степенью монохроматичности, но их интенсивность на несколько порядков ниже интенсивности тормозного излучения. Фотоядерные реакции с вылетом нескольких нуклонов, рассматриваемые в данной работе, характеризуются низкими сечениями, поэтому для обеспечения высокой интенсивности пучка налетающих γ -квантов применялись пучки тормозного излучения, полученные с помощью разрезных микротронов НИИЯФ МГУ.

Далее в работе описаны методы регистрации реакций под действием γ -квантов. При экспериментальном изучении фотоядерных реакций основными методами регистрации реакций являются метод полного фотопоглощения, метод прямой регистрации продуктов реакций и метод наведенной активности. Для разделения вкладов реакций с вылетом различного числа нуклонов и для одновременного наблюдения большого количества реакций на шести стабильных изотопах палладия наиболее удобным является метод наведенной активности.

В последней части введения формулируются цели и научная новизна представленной работы, обосновывается ее практическая значимость, приводится список публикаций и докладов на конференциях, составивших апробацию работы, и описывается личный вклад автора работы.

Вторая глава посвящена описанию методики экспериментального измерения выходов фотоядерных реакций, применяемой в настоящей работе. В разделе 2.1 описаны ускорители электронов, использованные для получения пучка тормозных γ -квантов. Эксперименты по облучению палладиевой мишени при двух верхних энергиях γ -квантов были проведены в НИИЯФ МГУ. В первом облучении на энергии 29.1 МэВ использовался разрезной микротрон на основе постоянного магнита с максимальной энергией пучка электронов 70 МэВ, допускающей изменение в широких пределах. При облучении на энергии 55.5 МэВ использовался разрезной микротрон с фиксированной энергией пучка. В табл. 2 диссертации приводятся основные характеристики ускорителей.

После облучения для измерения γ -спектров наведенной активности мишени использовался германиевый детектор и многоканальный анализатор Canberra. Детектор позволяет измерять спектры γ -квантов с энергетическим разрешением до 1.0 кэВ (на энергии 122 кэВ) и с относительной эффективностью 30% (по NaI). В ходе измерения спектров детектор и облученная мишень помещены в низкофоновою защитную камеру. Как показали проведенные измерения, использование низкофоновою защиты позволяет снизить радиационный фон почти на два порядка. Приведены спектры фонового излучения с использованием защитной камеры и вне ее.

Раздел 2.3 посвящен описанию созданных в рамках данной работы программ планирования эксперимента, набора и обработки данных. Показано, что автоматизация необходима на различных этапах эксперимента: как при планировании, так и непосредственно в процессе его проведения и обработки измеренных спектров. Особенностью применяемой методики является возможность одновременного измерения нескольких десятков реакций. В результате проведения эксперимента измеряется несколько тысяч γ -спектров

наведенной активности. Таким образом, без использования автоматического анализа данных практическая сложность метода была бы неприемлемо высокой.

При планировании эксперимента по методике наведенной активности необходимо знать, протекание каких реакций возможно в облучаемой мишени и продукты каких реакций могут быть идентифицированы в измеренных спектрах. Требуемые для этого расчеты на основе энергий связи ядер и таблиц распадов являются простыми, но весьма объемными. Для решения данной задачи была написана программа, осуществляющая

1. расчет порогов фотоядерных реакций, протекающих в образце с заданным составом при заданной верхней энергии тормозных γ -квантов;
2. определение нестабильных продуктов этих реакций, по распадам которых при использовании метода наведенной активности может быть получен выход реакции;
3. предварительный расчет выходов этих реакций с использованием модели [1];
4. построение графических схем цепочек распадов, образуемых нестабильными изотопами и изомерными состояниями в облученной мишени, для их последующего учета при обработке результатов эксперимента, а также расчет вероятностей переходов между отдельными элементами цепочек распадов;
5. моделирование процессов накопления и распада изотопов в мишени в процессе облучения и последующего измерения спектров с учетом изомерных состояний и распадов других ядер цепочки и построение графиков активности нестабильных продуктов фотоядерных реакций в зависимости от времени при заданных параметрах облучения.

Описываемая программа использует в качестве основы для расчетов данные из ENSDF [17] и комбинированную модель ГДР [1]. Описывается формат данных, используемый программой и алгоритмы вычисления вероятностей β -распадов с образованием изомерных состояний. Также описан алгоритм расчета отсутствующих в ENSDF вероятностей γ -переходов из интенсивностей спектральных γ -линий. Работа с программой планирования эксперимента ведется удаленно с помощью web-интерфейса.

Важным компонентом примененной экспериментальной методики исследования фотоядерных реакций методом наведенной активности является распределенная система автоматического набора спектров, используемая для

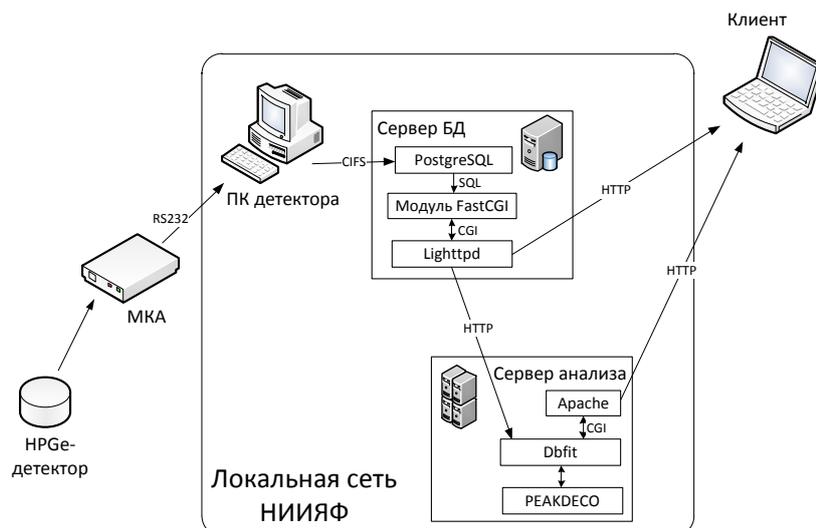


Рис. 1: Схема взаимодействия компонентов системы накопления и анализа γ -спектров.

непрерывного измерения γ -спектров после облучения мишени. Основным элементом данной системы является реляционная база данных, выполняющая функцию хранения, сортировки и поиска γ -спектров. Программа управления детектором автоматически запускает и останавливает набор спектров и помещает измеренные спектры в базу данных. База данных обеспечивает возможность хранения и обработки большого количества спектров, а web-интерфейс на основе FastCGI позволяет получать доступ к измеренным спектрам и проводить их суммирование в произвольных временных интервалах. Использование автоматической системы набора спектров позволило проводить непрерывные измерения большого количества спектров в течение длительного времени — до нескольких месяцев.

Одной из функций базы данных является автоматический анализ γ -спектров. Программа анализа позволяет проводить автоматический поиск максимумов в спектрах и определение их параметров и построение кривых распада с автоматическим определением периодов полураспада. Аналогично другим созданным в рамках данной работы программа анализа имеет web-интерфейс, позволяющий проводить обработку результатов с любого компьютера. Описывается архитектура, позволившая вынести работу программы анализа на отдельный web-сервер в сети НИИЯФ. Приводится детальное описание разработанного метода выделения фоновой подложки, а также использованного алгоритма поиска максимумов и алгоритма их аппроксимации функцией Гаусса со ступенчатой фоновой подложкой.

Раздел 2.4 посвящен описанию метода определения выходов фотоядерных реакций на основе анализа цепочек распадов. Описывается методика на-

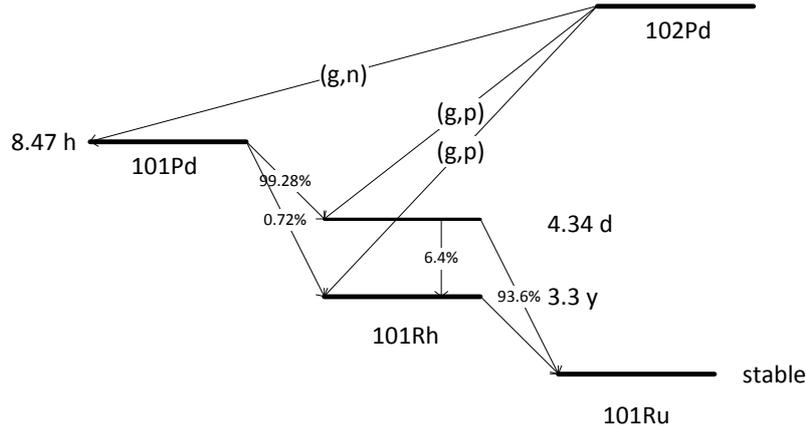


Рис. 2: Пример цепочки распадов.

хождения выходов реакций, продукты которых вместе с другими изотопами входят в сложные цепочки распадов [18]. Эта ситуация является достаточно распространенной при анализе измерений, выполненных по методу приведенной активности, если возможно одновременное протекание большого количества реакций.

В примере, приведенном на рис. 2, измеряемая активность изотопа ^{101}Rh зависит от выходов всех реакций, в которых образуются ядра, предшествующие ему в цепочке. Подобные цепочки распадов встречаются, в частности, при изучении реакций с вылетом большого числа нуклонов. При этом в цепочку входят не только бета- и альфа-радиоактивные ядра, но и изомерные состояния, распад которых может отличаться от распада ядра в основном состоянии.

Накопление и распад ядер, образующих цепочку, подобную вышеприведенной, описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dn_i}{dt} = \underbrace{y_i I_e(t) + \sum_j k_i^j \lambda_j n_j}_{\text{накопление}} - \underbrace{\lambda_i n_i}_{\text{распад}}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

где n_i — количество ядер данного типа (или в данном изомерном состоянии), y_i — выход реакции образования i -го ядра, λ_i — постоянные распада, k_i^j — вероятность распада j -го ядра в i -е, $I_e(t)$ — ток ускорителя (если $t > T_{\text{обл}}$ (время облучения), $I_e(t) = 0$). Обычно выходы реакций y_i в этом случае определяются в результате ручного решения данной системы и последующего применения нелинейного метода МНК или метода наибольшего правдоподобия, что требует применения алгоритмов минимизации, часто являющихся нестабильными. Также, при использовании нелинейной модели данные методы не

позволяют непосредственно рассчитать дисперсию полученного значения выхода, и вынуждены прибегать к разнообразным способам оценивания.

Показывается, что решение вышеприведенной системы уравнений является линейным относительно выходов y_i . Таким образом, количество ядер, соответствующих i -му элементу цепочки равняется

$$n_i(t) = \sum_{j < i} y_j a_i^j(t) + c_i(t), \quad (2)$$

где суммирование ведется по переупорядоченным индексам j элементов цепочки, предшествующих i . При измерении спектра определяется не количество ядер, а число распадов, являющееся результатом интегрирования данного выражения: $\mu_i(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \lambda_i n_i(t) dt$, и содержащее, таким образом, интегралы от функций $a_i^j(t)$ и $c_i(t)$, образующие для серии измеренных спектров, соответственно, матрицу постоянных коэффициентов A и вектор C . Описывается два способа расчета их значений: точный, на основе рекурсивного решения исходной систему дифференциальных уравнений, и приближенный, основанный на ее численном решении.

Измеренное в результате набора серии из M спектров число распадов i -го ядра (или изомерного состояния) в различные промежутки времени образует вектор измерений \mathbf{x} , являющийся случайным и распределенный по закону Пуассона с соответствующим вектором параметров $\mu = A\mathbf{y}$, где \mathbf{y} — неизвестный вектор, составленный из значений выходов.

Таким образом, из уравнения (2) следует, что числу распадов данного состояния за периоды измерения серии спектров соответствует линейная модель измерений, в которой математическое ожидание вектора числа распадов \mathbf{x} равно

$$\mathbf{E}\mathbf{x} = A\mathbf{y} + \varepsilon, \quad (3)$$

где \mathbf{y} — вектор неизвестных выходов y_i , а ε — вектор случайных ошибок с нулевым математическим ожиданием и дисперсией равной $A\mathbf{y}$. Показывается, что эффективную, удовлетворяющую нижней границе неравенства Крамера-Рао, оценку выходов \mathbf{y} можно получить с использованием обобщенного метода наименьших квадратов.

Поскольку в условиях эксперимента ковариационная матрица Ω измерений числа распадов \mathbf{x} является неизвестной, рассматриваются различные способы получения асимптотически эффективных оценок выходов \mathbf{y}^* и приводятся результаты компьютерного моделирования точности описанных способов.

В разделе 2.5 описывается использованная при проведении облучений палладиевая мишень толщиной около 0.4 мм, описывается методика определения массы и толщины мишени.

Третья глава посвящена описанию проведенных экспериментов и обработке результатов. В первом разделе данной главы (раздел 3.1) описывается эксперимент при энергии электронов 29.1 МэВ. При энергии 29.1 МэВ, облучение тормозными фотонами проводилось на разрезном микротроне с энергией 70 МэВ, на выходной трубе которого с помощью специального держателя была закреплена свинцовая тормозная мишень с алюминиевым поглотителем, предназначенным для поглощения электронов из пучка тормозного излучения. Оптимизированная по выходу высокоэнергетичных γ -квантов толщина свинцовой мишени составляла 3 мм, толщина поглотителя — 32 мм. В процессе облучения интенсивность пучка контролировалась с помощью ионизационной камеры. Следует отметить, что запись интенсивности пучка в процессе облучения является крайне важной для обеспечения достоверности результатов эксперимента по методике наведенной активности, но часто данные об изменении тока ускорителя в процессе облучения не записываются или не используются в обработке. Для обеспечения доступа к измеренным значениям тока пучка в облучениях была написана программа с web-интерфейсом, позволяющая получать зависимость тока пучка от времени в графическом виде и в виде файла данных.

Продолжительность облучения при энергии 29.1 МэВ составляла около 3 часов. После облучения мишень была перенесена в камеру детектора, где в течение 45 дней с помощью БД было измерено 1609 спектров наведенной активности. Пример измеренных спектров показан на рис. 3.

Обработка измеренных спектров проводилась с помощью описанной выше программы автоматического анализа спектров. Спектры наведенной активности сортировались по времени начала и по длительности измерения и последовательные спектры объединялись в группы для построения кривых распада изотопов с различными периодами полураспада. В спектрах проводился поиск пиков, соответствующих γ -линиям распадов продуктов реакций и определялись их площади. Эффективность регистрации γ -квантов детектором при различных значениях энергии, необходимая для определения наблюдаемой интенсивности γ -линий была рассчитана с помощью пакета моделирования GEANT4 и модели детектора в защитной камере, параметры которой были предварительно установлены путем измерения спектров стандартных γ -источников.

Далее подробно описывается процедура обработки измеренных спектров. На примере показанной на рис. 2 цепочки, включающей пять распадов

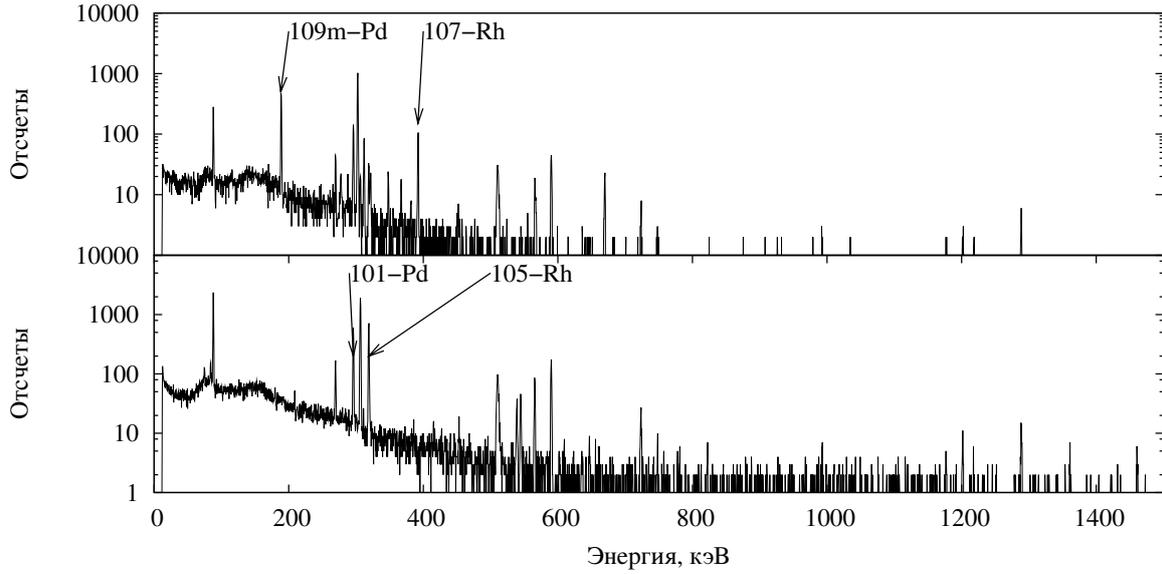


Рис. 3: Спектры γ -квантов, измеренные сразу после облучения и через 24 ч после облучения на энергии 29.1 МэВ. Длительность измерения первого спектра — 60 с, второго — 1800 с.

ядер с массовым числом 101 — ^{101}Pd , $^{101\text{m}}\text{Rh}$ и ^{101}Rh — разобран процесс анализа цепочек распадов. В явном виде приводятся полученные зависимости активностей элементов цепочки от времени, выходов реакций и вероятностей распадов. На примере интенсивностей γ -линий β -распада изотопа ^{101}Pd показана необходимость явного учета эффекта суммирования каскадов γ -переходов: без нее искажения интенсивности γ -линий достигают 50% и выше (табл. 1).

Таблица 1: Значения числа ядер ^{101}Pd в мишени в момент окончания облучения на энергии 29.1 МэВ N_{10} , полученные методом МНК из пиков ^{101}Pd и результат коррекции суммирования каскадов γ -квантов.

Энергия пика, кэВ	N_{10}	$N_{10}^{\text{испр.}}$
269	$9.7(2) \cdot 10^6$	$1.10(1) \cdot 10^7$
296	$1.38(5) \cdot 10^7$	$1.22(1) \cdot 10^7$
565	$2.09(5) \cdot 10^7$	$1.19(1) \cdot 10^7$
590	$1.53(3) \cdot 10^7$	$1.18(1) \cdot 10^7$

Для учета эффекта суммирования каскадов γ -переходов написана программа, использующая данные о вероятностях γ -переходов, рассчитанные на основе ENSDF описанной выше программой построения цепочек распадов, и вероятности полного и частичного поглощения фотонов, рассчитанные с помощью модели детектора в GEANT4.

В конце раздела перечисляются основные максимумы в спектрах γ -квантов, соответствующие распадам ядер цепочки, экспериментально измеренные кривые распада, результат определения выходов реакций, а также аппроксимационные кривые распада, полученные в ходе определения выходов.

Определение выходов реакций $^{102}\text{Pd} (\gamma, 2n)^{100}\text{Pd}$, $^{106}\text{Pd} (\gamma, p)^{105}\text{Rh}$, $^{108}\text{Pd} (\gamma, p)^{107}\text{Rh}$ и $^{110}\text{Pd} (\gamma, n)^{109}\text{Pd}$ не требует анализа цепочек распадов и осуществляется обычным способом с помощью аппроксимации кривых распада экспоненциальной функцией

$$A(t, \Delta t) = C \int_0^{T_{\text{обл}}} I_e(t) y e^{\lambda \tau} d\tau \left(e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(t+\Delta t)} \right), \quad (4)$$

где $T_{\text{обл}}$ — время облучения, $I_e(t)$ — значения тока ускорителя, y — относительный выход реакции, C — постоянный коэффициент, включающий в себя число ядер в мишени, интенсивность γ -линии и эффективность детектора, λ — постоянная распада нестабильного продукта реакции, t — время начала измерения спектра, Δt — длительность измерения спектра. Для каждой из этих реакций приводятся определенные в результате эксперимента по наиболее интенсивным пикам кривые распада, а также определенные в результате обработки значения выходов реакций.

В разделе 3.2 описывается облучение, проведенное при энергии электронов 55.5 МэВ. Для облучения использовался разрезной микротрон с фиксированной энергией пучка. В качестве тормозной мишени использовалась вольфрамовая пластинка толщиной 2.2 мм, укрепленная на заземленной подставке. Перед тормозной мишенью была установлена ионизационная камера, подключенная к АЦП для измерения тока пучка электронов. Время облучения составило 40 мин.

После облучения в течение 45 дней проводилось непрерывное измерение γ -спектров наведенной активности, в ходе которого было получено 2062 спектра. Примеры измеренных спектров показаны на рис. 4.

Число различных реакций, пороги которых допускают протекание при энергии облучения 55.5 МэВ, существенно выше, чем при энергии облучения 29.1 МэВ. Продукты этих реакций входят в цепочки распадов, анализ которых составляет главную сложность обработки результатов облучения при энергии 55.5 МэВ.

Обработка спектров наведенной активности, измеренных после облучения на энергии 55.5 МэВ проводилась в целом аналогично обработке результатов облучения на энергии 29.1 МэВ. Подробно описана процедура восстановления выходов из анализа цепочки распадов ядер ^{101}Pd , $^{101\text{m}}\text{Rh}$ и ^{101}Rh ,

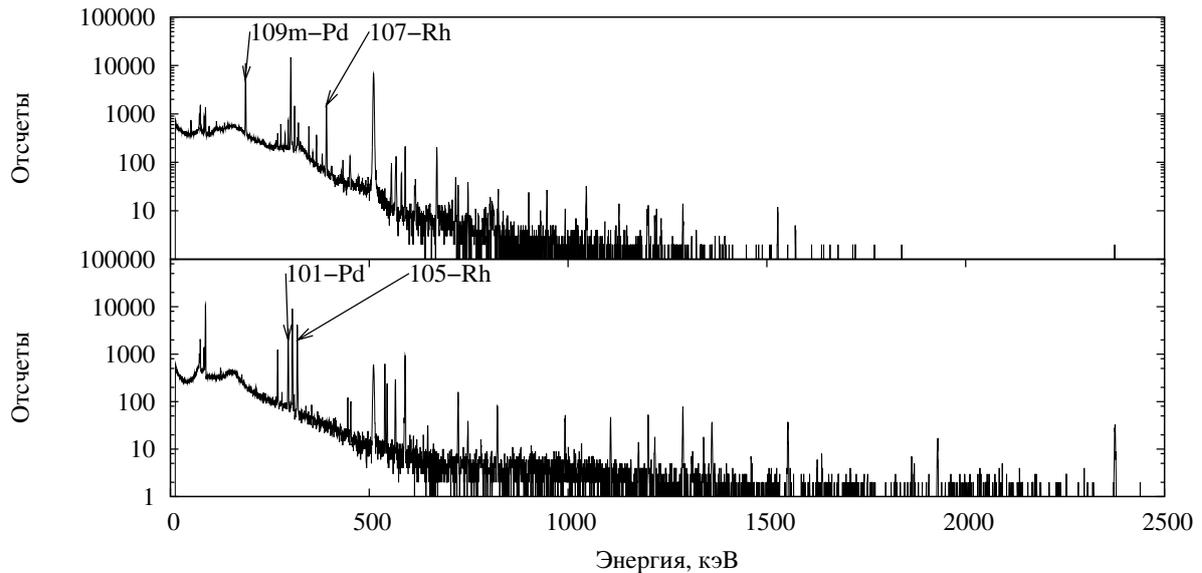


Рис. 4: Спектры γ -квантов, измеренные сразу после облучения на энергии 55.5 МэВ и через 24 ч после облучения. Длительность измерения первого спектра — 60 с, второго — 1800 с.

основанная на описанном в главе 2 методе решения линейной статистической задачи. Для расчета приборной матрицы A написана программа, определяющая значения коэффициентов a_j^i в формуле (2). Отметим, что с помощью данной методики также можно получать кривые распада, аппроксимирующие экспериментальные точки, аналогично стандартному методу аппроксимации кривых распада непрерывными кривыми.

Поскольку период полураспада ^{101}Rh равен 3.3 года, остаточная активность данного изотопа после первого облучения учитывалась путем проведения дополнительного измерения спектров перед облучением на энергии 55.5 МэВ.

Аналогичная методика была использована для определения выходов изотопов, входящих в пять других цепочек распадов ($A = 99, 100, 102, 105, 109$). Для определения выходов реакций, продукты которых не входят в цепочки распадов и не требуют сложной обработки, расчет выполнялся по формуле (4).

В четвертой главе приводятся в систематизированном виде полученные значения выходов реакций и обсуждение результатов.

Раздел 4.1 посвящен анализу имеющихся в литературе экспериментальных данных по фотоядерным реакциям на изотопах палладия, в котором приведены основные результаты упоминавшихся работ: сечения и изомерные отношения, которые могут быть сопоставлены с результатами настоящей работы.

Таблица 2: Экспериментальные выходы фотоядерных реакций на ядрах мишени. Значения выходов нормированы на выход реакции $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109}\text{Pd}$.

Энергия облучения 29.1 МэВ

Реакция	Относительный выход реакций		
	Эксперимент	TALYS [19]	Модель [1]
$^{102}\text{Pd}(\gamma, n)^{101}\text{Pd}$	1.018(4)	1.0	0.89
$^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109}\text{Pd}$	1.000(4)	1.0	1.0
$^{102}\text{Pd}(\gamma, p)^{101}\text{Rh}$	0.140(1)	0.12	0.11
$^{106}\text{Pd}(\gamma, p)^{105}\text{Rh}$	0.0537(3)	0.0026	0.051
$^{108}\text{Pd}(\gamma, p)^{107}\text{Rh}$	0.0427(3)	0.0011	0.034
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n)^{100}\text{Pd}$	0.171(8)	0.098	0.063

Полученные экспериментальные значения выходов сравнивались также с результатами модельных расчетов. Был выполнен расчет сечений фотоядерных реакций в диапазоне 0–70 МэВ с помощью пакета TALYS и с помощью комбинированной модели гигантского дипольного резонанса [1]. Для получения теоретических значений относительных выходов с помощью GEANT4 были рассчитаны спектры γ -квантов, рождаемых в тормозной мишени при облучениях на энергии $T = 29.1$ и 55.5 МэВ. Значения относительных выходов рассчитывались по формуле

$$Y_{\text{теор}}(T) = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{\text{теор}_i} \nu_i}{\sum_{i=1}^N \sigma_{\text{теор}_i}^{110} \nu_i}, \quad (5)$$

где N — число бинов при расчете спектра γ -квантов и сечений, $\sigma_{\text{теор}_i}$ — значения сечений реакций, ν_i — значение относительной интенсивности γ -квантов в i -м бине при энергии облучения T , $\sigma_{\text{теор}_i}^{110}$ — значения сечения реакции $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109}\text{Pd}$, на которую нормируются выходы. Полученные в результате эксперимента значения относительных выходов вместе с результатами теоретического расчета приводятся в табл. 2 и 3.

Сравнение выходов фотонейтронных и фотопротонных реакций с результатами теоретических расчетов показывает что рассчитанное по обоим теоретическим моделям значение выхода фотонейтронных реакций несколько ниже по сравнению как с результатами настоящей работы, так и с результатами экспериментов, выполненных другими группами. Показано хорошее согласие между экспериментальными и рассчитанными по модели [1] значениями выходов фотопротонных реакций, в то время как расчет в рамках статистической модели TALYS дает значения на 2 порядка меньше. Показано, что расхождение связано с необходимостью учета изоспинового расщепления

Таблица 3: Экспериментальные выходы фотоядерных реакций на ядрах мишени.
Энергия облучения 55.5 МэВ

Реакция	Относительный выход реакций		
	Эксперимент	TALYS [19]	Модель [1]
(γ, n)			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, n)^{101}\text{Pd} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 3n)^{101}\text{Pd}$	1.449(7)	1.1	1.1
$^{104}\text{Pd}(\gamma, n)^{103}\text{Pd} + 2.00 \text{ }^{105}\text{Pd}(\gamma, 2n)^{103}\text{Pd}$	2.44(4)	1.4	1.1
$^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109m}\text{Pd}$	0.1091(6)	0.04	
$^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109g.s.}\text{Pd}$	0.891(6)	0.96	1
(γ, p)			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, p)^{101m}\text{Rh} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{101m}\text{Rh}$	0.17(2)	0.12	
$^{102}\text{Pd}(\gamma, p)^{101g.s.}\text{Rh} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{101g.s.}\text{Rh}$	0.125(1)	0.10	0.20
$^{105}\text{Pd}(\gamma, p)^{104m}\text{Rh} + 1.22 \text{ }^{106}\text{Pd}(\gamma, np)^{104m}\text{Rh}$	0.0186(7)	0.0025	
$^{105}\text{Pd}(\gamma, p)^{104g.s.}\text{Rh} + 1.22 \text{ }^{106}\text{Pd}(\gamma, np)^{104g.s.}\text{Rh}$		0.0067	0.086
$^{106}\text{Pd}(\gamma, p)^{105m}\text{Rh} + 0.97 \text{ }^{108}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{105m}\text{Rh}$		0.00072	
$^{106}\text{Pd}(\gamma, p)^{105g.s.}\text{Rh} + 0.97 \text{ }^{108}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{105g.s.}\text{Rh}$	0.0630(3)	0.0014	0.061
$^{108}\text{Pd}(\gamma, p)^{107}\text{Rh} + 0.44 \text{ }^{110}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{107}\text{Rh}$	0.0455(2)	0.0025	0.049
$^{110}\text{Pd}(\gamma, p)^{109}\text{Rh}$	0.023(4)	0.0011	0.039
(γ, np)			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, np)^{100}\text{Rh} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)^{100}\text{Rh}$	0.0408(3)	0.052	0.052
$^{104}\text{Pd}(\gamma, np)^{102m}\text{Rh} + 2.00 \text{ }^{105}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{102m}\text{Rh}$	0.0058(5)	0.0087	
$^{104}\text{Pd}(\gamma, np)^{102g.s.}\text{Rh} + 2.00 \text{ }^{105}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{102g.s.}\text{Rh}$	0.0219(3)	0.036	0.027
$^{108}\text{Pd}(\gamma, np)^{106m}\text{Rh} + 0.44 \text{ }^{110}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)^{106m}\text{Rh}$	0.00216(4)	0.00091	
$^{108}\text{Pd}(\gamma, np)^{106g.s.}\text{Rh} + 0.44 \text{ }^{110}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)^{106g.s.}\text{Rh}$		0.0012	0.010
$^{110}\text{Pd}(\gamma, np)^{108m}\text{Rh}$	0.00112(4)		
$^{110}\text{Pd}(\gamma, np)^{108g.s.}\text{Rh}$		0.0012	0.0086
Остальные			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n)^{100}\text{Pd} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 4n)^{100}\text{Pd}$	0.1652(8)	0.14	0.098
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 3n)^{99}\text{Pd} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 5n)^{99}\text{Pd}$	0.0059(1)	0.0032	0.0048
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{99m}\text{Rh} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 4n1p)^{99m}\text{Rh}$	0.0087(2)	0.0056	
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{99g.s.}\text{Rh} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 4n1p)^{99g.s.}\text{Rh}$	0.0064(3)	0.0047	0.0076
$^{102}\text{Pd}(\gamma, na)^{97}\text{Ru} + 10.92 \text{ }^{104}\text{Pd}(\gamma, 5n1\alpha)^{97}\text{Ru}$	0.0049(8)	0.0018	1.3×10^{-6}
$^{105}\text{Pd}(\gamma, 2p)^{103}\text{Ru} + 1.22 \text{ }^{106}\text{Pd}(\gamma, 1n2p)^{103}\text{Ru}$	$7.66(9) \times 10^{-4}$	6.9×10^{-6}	2.8×10^{-5}
$^{108}\text{Pd}(\gamma, 1n2p)^{105}\text{Ru} + 0.44 \text{ }^{110}\text{Pd}(\gamma, 3n2p)^{105}\text{Ru}$	$1.5(1) \times 10^{-4}$	6.1×10^{-6}	1.6×10^{-6}

ГДР в модели TALYS. Сравнению результатов определения выходов реакций с вылетом нескольких нуклонов с теоретическим расчетом посвящен раздел 4.6. Закономерности, отмеченные ранее, отчетливо видны на общей картине, содержащей результаты эксперимента и моделирования при обоих значениях энергии облучения. Расчет выходов реакций с вылетом одного нуклона и реакции (γ, np) хорошо согласуется с экспериментом. Выходы реакций с вылетом более, чем одного нуклона одного типа оказываются в теоретическом расчете заниженными, что в особенности касается реакций с вылетом двух протонов: ($\gamma, 2p$) и ($\gamma, 1n2p$).

Таблица 4: Отношения выходов реакций с образованием изомерного состояния к основному состоянию $R = y_m/y_{g.s.}$. Спины и четности начальных ядер во всех случаях равны 0^+ .

Реакция	$J^P_{g.s.}$ (конеч. ядра)	Изомерное состояние (конеч. ядра)	29.1 МэВ		55.5 МэВ	
			R	R_{TALYS}	R	R_{TALYS}
$^{102}\text{Pd} (\gamma, p) ^{101}\text{Rh}$	$1/2^-$	157 кэВ, $J^P = 9/2^+$	0.49(1)	0.43 (1.1)	1.4(2)	0.44 (1.1)
$^{102}\text{Pd} (\gamma, 2n1p) ^{99}\text{Rh}$	$1/2^-$	64 кэВ, $J^P = 9/2^+$		0.46 (0.54)	1.4(1)	1.2 (1.2)
$^{104}\text{Pd} (\gamma, np) ^{102}\text{Rh}$	$(1^-, 2^-)$	141 кэВ, $J^P = 6^{(+)}$		0.056 (0.065)	0.26(2)	0.17 (0.15)
$^{110}\text{Pd} (\gamma, n) ^{109}\text{Pd}$	$5/2^+$	189 кэВ, $J^P = 11/2^-$	0.10(2)	0.05 (0.037)	0.099(5)	0.06 (0.039)

Для ряда реакций были получены экспериментальные значения изомерных отношений, а также их значения, вычисленные с помощью TALYS (табл. 4). Проведено сравнение полученных изомерных отношений в реакции $^{110}\text{Pd} (\gamma, n) ^{109}\text{Pd}$ со значениями, измеренными в других работах, показавшее хорошее согласие (рис. 5). Обсуждается причина различия экспериментальных изомерных отношений и значений, полученных в результате расчета на TALYS. Показано, что расхождение вызвано неполнотой информации о высоколежащих возбужденных состояниях в ядре ^{109}Pd .

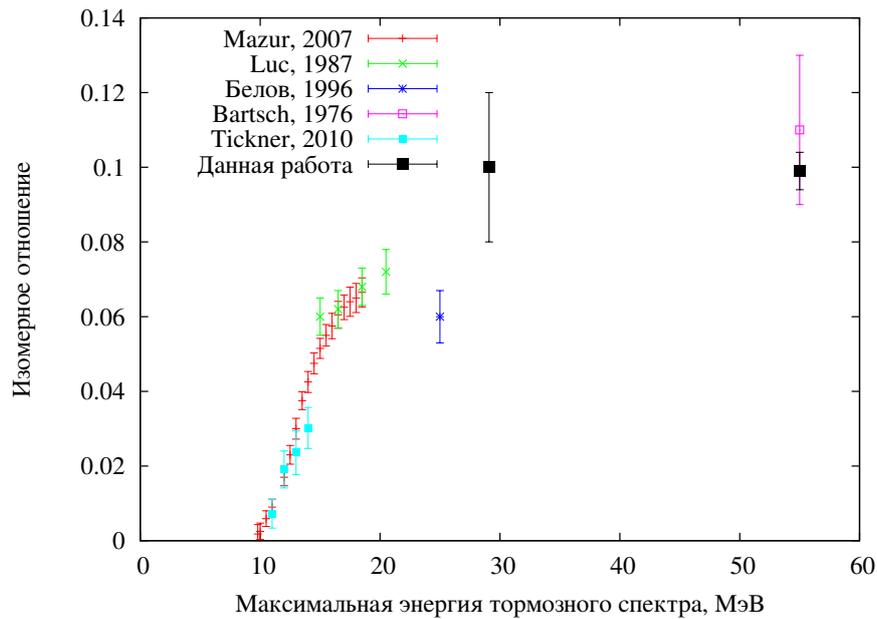


Рис. 5: Сравнение результатов измерения изомерного отношения в реакции $^{110}\text{Pd} (\gamma, n) ^{109}\text{Pd}$.

В **закл^ючении** приведены основные результаты и подведены итоги проделанной работы.

Материалы диссертации опубликованы в работах:

1. К.А. Стопани, С.С. Бельшев, Определение выходов фотоядерных реакций на основе анализа цепочек распадов, Вестник МГУ. Серия 3: физика и астрономия, 4 (2011), с. 42–47;
 2. К.А. Stopani, “Automated system of nuclear states activation and decay processes calculation in photonuclear experiments”, LVII International Conference on Nuclear Physics “NUCLEUS-2007”. Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering, and Nuclear Technologies. Book of abstracts, Ed. A. K. Vlasnikov, Voronezh, 2007, p. 266.
 3. С.С. Бельшев, А.А. Кузнецов, А.С. Курилик, К.А. Стопани, Автоматизация обработки данных гамма-активационных экспериментов, 58 Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. «ЯДРО 2008 Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики». Тезисы докладов. Ред. А. К. Власников, Москва, 2008, с. 282.
 4. S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, K.A. Stopani, S.Yu. Troschiev, Photonuclear reactions yields on palladium isotopes, LX international conference on nuclear physics “Nucleus 2010. Methods of nuclear physics for femto- and nanotechnologies.” Book of abstracts, Ed. A. K. Vlasnikov, St.-Petersburg, 2010, p. 155.
 5. S.S. Belyshev, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, K.A. Stopani, Photonuclear reactions on palladium isotopes, LVII meeting on nuclear spectroscopy and nuclear structure “NUCLEUS 2012. Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies.” Book of abstracts, Ed. A. K. Vlasnikov, Voronezh, 2012, p. 125.
- К. А. Стопани, Фотоядерные реакции на изотопах палладия, препринт НИИЯФ МГУ N 2012-5/883.
6. Алиев Р.А., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Джо Джо Тун, Макаренко И.В., Стопани К.А., Возбуждение изомерного уровня 135.5 кэВ в ядре ^{92}Nb методом фотоядерных реакций. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2006. N 6. С. 55-57.

Список литературы

- [1] Ишханов Б. С., Орлин В. Н. Полумикроскопическое описание дипольного гигантского резонанса // ЭЧАЯ. — 2007. — Т. 38, № 2. — С. 460–503.
- [2] Arnould M., Goriely S. The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status // Phys. Rep. — 2003. — Vol. 384. — P. 1–84.
- [3] Nedorezov V. G. Photonuclear reactions: Astrophysics implications // Proc. Of the Int. Conference on Nuclear and Radiation Physics, Almata. — 2005. — P. 153.
- [4] A 70 MeV racetrack microtron / V.I. Shvedunov, A.N. Ermakov, I.V. Gribov et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2005. — Vol. 550, no. 1-2. — P. 39 – 53.
- [5] Фронтасьева М. В. Нейтронный активационный анализ в науках о жизни // ЭЧАЯ. — 2011. — Т. 42, № 2. — С. 635–701.
- [6] IAEA-NDS-206 / Ed. by Otto Schwerer ; International Atomic Energy Agency. — Vienna, Austria, 2008. — June.
- [7] Ishkhanov B. S., Varlamov V. V. Photonuclear reactions: Modern status of the data // Ядерная физика. — 2004. — Vol. 67, no. 9. — P. 1691.
- [8] Варламов В. В., Ишханов Б. С. // ЭЧАЯ. — 2004. — № 4. — С. 858.
- [9] A study of the giant dipole resonance of vibrational nuclei in the $103 \leq A \leq 133$ mass region / A. Leprêtre, H. Beil, R. Bergère et al. // Nucl. Phys. A. — 1974. — Vol. 219, no. 1. — P. 39 – 60.
- [10] Deague T., Muirhead E., Spicer B. Structure in the giant resonance of ^{108}Pd and of ^{110}Pd // Nucl. Phys. A. — 1969. — Vol. 139.
- [11] Tickner J., Bencardino R., Roach G. // Nucl. Inst. and Meth. B. — 2010. — Vol. 268. — P. 99–105.
- [12] H. Utsonomiya et al. γ -ray strength function method and its application to ^{107}Pd // Phys. Rev. C. — 2010. — Vol. 82. — P. 064610.
- [13] Mazur V. M., Bigan Z. M., Symochko D. M. Excitation cross-section of the $11/2^-$ isomeric states of the ^{109}Pd and ^{111}Cd nuclei for (γ, n) reactions in the gamma-quantum energy range of 8–18 MeV // Ukr. J. Phys. — 2007. — Vol. 52. — P. 744.

- [14] Isomeric yield ratios in the productions of $\text{Sm}^{143m,g}$, $\text{Nd}^{141m,g}$, $\text{Zr}^{89m,g}$ and $\text{Pd}^{109m,g}$ by 14 MeV neutrons and 15–20,5 MeV bremsstrahlung / H. D. Luc, T. D. Thiep, T. T. An, P. An // *Bolg. J. of Phys.* — 1987. — Vol. 14, no. 2. — P. 152 – 161.
- [15] Возбуждение изомерных состояний $1h_{11/2}$ в реакциях (γ, n) / А. Г. Белов, Ю. П. Гангрский, А. П. Тончев, Н. П. Балабанов // *ЯФ.* — 1996. — Т. 59, № 4. — С. 585–591.
- [16] Critical consideration of the statistical model analysis of photonuclear isomeric cross-section ratios / H. Bartsch, K. Huber, U. Kneissl, H. Krieger // *Nucl. Phys. A.* — 1976. — Vol. 256, no. 2. — P. 243 – 252.
- [17] Evaluated nuclear structure data file (ensdf). — URL: <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
- [18] Стопани К. А., Бельшев С. С. Определение выходов ядерных реакций на основе анализа цепочек распадов // *Вестник МГУ, серия 3, физика и астрономия.* — 2011. — № 4. — С. 42.
- [19] Koning A., Hilaire S., Duijvestijn M. *Talys-1.0* / Ed. by O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge et al. — Nice, France : EDP Science, 2008. — P. 211 – 214.