

На правах рукописи

МАКАРЕНКО Ирина Витальевна

МНОГОЧАСТИЧНОЕ ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР ТАЛЛИЯ
И ВИСМУТА

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер Научно-исследовательского института имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор И.М. Капитонов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Е.А. Романовский

кандидат физико-математических наук
Н.Д. Пронкина

Ведущая организация: Лаборатория ядерных реакций
им. Г.Н. Флерова Объединенного института
ядерных исследований

Защита состоится « 12 » декабря 2008 г. в 15:00 час. на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19-й корпус, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 01 » ноября 2008 г.

Ученый секретарь Совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 501.001.77
д.ф.-м.н. профессор

С.И. Страхова

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Область фоторасщепления атомных ядер простирается от нуклонного порога ($B_{n,p} \approx 5-10$ МэВ) до порога фоторождения мезонов на ядрах (135 МэВ). В этом энергетическом интервале шириной ≈ 100 МэВ в течение более чем 60-летних исследований основное внимание экспериментаторов и теоретиков было приковано к гигантскому дипольному резонансу, доминирующему в сечениях поглощения фотонов атомными ядрами в области $E_\gamma \approx 10-40$ МэВ. В настоящее время можно считать, что физика этого уникального ядерного явления понята достаточно хорошо [1-4]. Область за гигантским дипольным резонансом долгое время оставалась как бы в тени исследований этого резонанса. Основная причина состояла в методических трудностях. В области за гигантским дипольным резонансом возбужденные ядерные состояния распадаются, главным образом с испусканием нескольких (до 10) нуклонов (прежде всего, нейтронов). Поэтому методы прямого детектирования фотонуклонов, обычно используемые в области гигантского дипольного резонанса, который распадается с испусканием одного (реже, двух) нуклонов, оказываются, по существу, непригодными.

Вместе с тем, изучение фоторасщепления за гигантским дипольным резонансом и вплоть до мезонного порога, представляет несомненный интерес. В этой энергетической области ожидается (и имеются указания на это) изменение механизма взаимодействия фотонов с ядрами. В отличие от области гигантского дипольного резонанса, где фотоны взаимодействуют с ядром как с целым объектом, в области выше этого резонанса фотон из-за уменьшения длины волны и кинематических ограничений, связанных с сохранением импульса, взаимодействует с системами из малого числа нуклонов, формирующимися внутри ядра и, прежде всего, с квазидейтронами [5-7]. Таким образом, имеет место конкуренция двух механизмов фоторасщепления: традиционного – через возбуждение гигантского дипольного резонанса и нерезонансного, квазидейтронного. Возникает задача исследования конкуренции этих двух механизмов.

Изучение фоторасщепления ядер в области энергий выше гигантского дипольного резонанса, по существу, сводится к изучению множественных фотонуклонных реакций (МФНР). Множественными фотонуклонными реакциями (МФНР) мы называем фотоядерные реакции с вылетом из ядра нескольких нуклонов, т.е. реакции типа $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 2p)$, $(\gamma, 3n)$, (γ, pn) , $(\gamma, 4n)$ и т.д. Под множественностью понимается число нуклонов, покинувших ядро в

одном акте реакции. Эти реакции вызываются фотонами с энергиями, превышающими энергию максимума гигантского дипольного резонанса, и их сечения также имеют вид достаточно широких резонансных кривых, лежащих на «хвосте» этого резонанса. В случае средних и тяжелых ядер доминируют фотонейтронные реакции (реакции с вылетом протонов также имеют место, но сильно подавлены кулоновским барьером). Гигантский дипольный резонанс (ГДР) средне-тяжелых и тяжелых ядер формируется практически за счет реакции (γ, n) , которая определяет основные параметры ГДР – положение его максимума E_M , ширину Γ и величину сечения в максимуме σ_M . Следует подчеркнуть, что сечения МФНР быстро падают с увеличением множественности (числа вылетевших нуклонов). Тем не менее, наличие интенсивных пучков фотонов с энергиями до 50–70 МэВ и использование эффективных методов выделения определенного канала реакции позволяет исследовать МФНР с вылетом до 7–8 нуклонов.

Изучение МФНР, во-первых, позволит установить, как ядро поглощает высокоэнергетичный фотон – через возбуждение гигантского дипольного резонанса (его высокоэнергетичной части) или посредством расщепления внутри него квазидейтрона. Во-вторых, появляется возможность установить, как распадается ядро, поглотившее высокоэнергетичный фотон. Существует два основных механизма распада возбужденных состояний ядра – прямой и через составное ядро. Если иметь в виду фотоядерные реакции в области ГДР, то здесь мы имеем дело с конкуренцией так называемого полупрямого механизма, когда происходит вылет одного нуклона сразу после образования коллективного дипольного состояния, и статистического, крайним проявлением которого является вылет нуклонов из составного ядра, достигшего теплового равновесия. Полупрямая фотоядерная реакция происходит за время $\approx 10^{-21}$ с, распад ГДР через составное ядро, достигшее теплового равновесия, требует времени $\approx 10^{-19} - 10^{-18}$ с. Если распад ГДР происходит на промежуточной между этими крайними способами распада стадии (её называют предравновесной), то он занимает время $\approx 10^{-20}$ с. У легких ядер доминирует полупрямой распад ГДР, у тяжелых – статистический. О механизме распада ядра за ГДР практически ничего не известно и, поскольку именно в этой области протекают МФНР, то их изучение способно дать ответ на поставленный вопрос.

В-третьих, реакции с вылетом нескольких нейтронов (в основном они формируют набор МФНР) приводят к образованию конечных ядер, сдвинутых от линии стабильности в сторону перегруженных протонами нуклидов, т. е. нейтронодефицитных ядер. Изучение таких ядер является одним из

магистральных направлений современной физики ядра. Реакции (γ , 2n), (γ , 3n), (γ , 4n) и т.д. дают информацию о том, с какой скоростью образуются нейтронодефицитные ядра при облучении мишени интенсивными потоками высокоэнергичных фотонов и тем самым позволяют прогнозировать достижимые концентрации таких ядер в различных мишенях, подвергнутых облучению. Эти концентрации могут оказаться приемлемыми для успешного исследования свойств нейтронодефицитных ядер тонкими современными методами.

Цель работы. Отработка методики проведения экспериментов по изучению многочастичных фотоядерных реакций. Получение новых экспериментальных данных о выходах и интегральных сечениях многочастичных фотоядерных реакций на тяжелых ядрах в области энергий за гигантским дипольным резонансом.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. Создана и успешно апробирована методика проведения экспериментов по исследованию многочастичных фотоядерных реакций в режиме наведенной активности на пучке тормозного излучения от ускорителя электронов РТМ-70 НИИЯФ МГУ [8]. Методика характеризуется высокой эффективностью, позволяющей изучать идущие с весьма низкими сечениями реакции фоторасщепления ядер с вылетом из ядра до семи нейтронов.
2. Создана система обработки экспериментальных данных, позволяющая из γ -спектров остаточной активности получить выходы фотоядерных реакций различной множественности.
3. Предложен метод определения выходов фотоядерных реакций по интенсивности характеристического рентгеновского излучения.
4. Получены данные о выходах и интегральных сечениях многочастичных фотоядерных реакций на ядрах $^{203,205}\text{Tl}$ и ^{209}Bi в области за гигантским дипольным резонансом и вплоть до энергии 67.7 МэВ. Данные для $^{203,205}\text{Tl}$ получены впервые, а данные для ^{209}Bi существенно уточняют результаты более ранних (40 лет назад) измерений.
5. Проведен совместный анализ имеющихся экспериментальных данных по многочастичному фоторасщеплению за гигантским дипольным резонансом для тяжелых ядер с массовым числом около 200: ^{197}Au , $^{203,205}\text{Tl}$ и ^{209}Bi (данные для $^{203,205}\text{Tl}$ и ^{209}Bi получены в настоящей диссертации, а для ^{197}Au – ранее также при непосредственном участии автора диссертации). Установлено, что экспериментальные данные для всех рассмотренных тяжелых ядер характеризуются общими чертами, свидетельствующими об

универсальности механизма фоторасщепления в тяжелых ядрах за гигантским дипольным резонансом.

6. Экспериментальные данные по многочастичному фоторасщеплению для ядер ^{197}Au , $^{203,205}\text{Tl}$ и ^{209}Bi сравниваются с данными современной теоретической модели фоторасщепления [9], учитывающей как фоторасщепление через возбуждение ГДР, так и квазидейтронное фоторасщепление. Данные этих теоретических расчетов успешно описывают для всех ядер соотношение между выходами фотонейтронных реакций различной множественности, что свидетельствует об адекватности модели и позволяет сделать следующие выводы:

а) экспериментальные данные могут быть описаны лишь при совместном учете обоих альтернативных механизмов фоторасщепления – через возбуждение гигантского дипольного резонанса и квазидейтронного фоторасщепления;

б) роль квазидейтронного фоторасщепления растет с увеличением энергии фотона и нейтронной множественности и становится доминирующей для реакций с вылетом из ядра не менее четырех нейтронов.

Научная новизна работы. Впервые измерены выходы и интегральные сечения многочастичных фотоядерных реакций на ядрах $^{203,205}\text{Tl}$. Существенно уточнены данные о выходах и интегральных сечениях многочастичных фотоядерных реакций на ядре ^{209}Bi (более ранние исследования выполнены 40 лет назад). Сделаны заключения о механизме протекания фотоядерных реакций в тяжелых атомных ядрах в области энергий за гигантским дипольным резонансом.

Практическая значимость работы. Полученные экспериментальные результаты по интегральным сечениям многочастичных фотоядерных реакций на ядрах $^{203,205}\text{Tl}$ и ^{209}Bi являются необходимыми данными для выяснения механизма фотоядерных реакций в области энергий за гигантским дипольным резонансом и создания моделей для описания таких реакций. Подобные экспериментальные данные в настоящее время отсутствуют для большинства ядер.

Полученные данные о величинах выходов и интегральных сечений многочастичных фотоядерных реакций дают информацию о том, с какой скоростью образуются нейтронодефицитные ядра при облучении мишени интенсивными потоками высокоэнергичных фотонов и тем самым позволяют прогнозировать достижимые концентрации таких ядер в различных мишенях, подвергнутых облучению. Изучение ядер, далеких от полосы β -стабильности,

дает сведения о ядрах, находящихся в экстремальных условиях, что позволяет получить новые сведения о свойствах ядерной материи.

Полученные экспериментальные значения величин сечений фотоядерных реакций необходимы также для прогнозирования радиационной обстановки на существующих и планируемых электронных ускорителях с энергиями пучка не менее 30 МэВ.

Достоверность. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием надежно апробированных методов спектрометрирования γ -квантов и анализа их спектров, согласием полученных результатов в той области энергий, где имеются экспериментальные данные с соответствующими результатами известных экспериментальных работ.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, совещаниях, семинарах и научных школах:

1. 55, 56, 57, 58 Международные совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро – 2005», «Ядро – 2006», «Ядро – 2007», «Ядро – 2008». С.-Петербург, Петергоф 2005 г., Саров 2006 г., Воронеж 2007 г., Москва 2008,
2. 7th AFOSR Workshop on Isomers and Quantum Nucleonics, Dubna 2005,
3. XI International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei EMIN-2006, Moscow, 2006,
4. 2007 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. Nice, France, 2007,
5. 5, 6, 7, 8 межвузовские научные школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Москва, 2004 г., 2005 г., 2006 г., 2007 г.,
6. 12, 14, 15 Международные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2005», «Ломоносов – 2007», «Ломоносов – 2008». Москва 2005 г., 2007 г., 2008 г.,
7. Научные конференции «Ломоносовские чтения». Москва 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2008 г.
8. Форум «Всемирный год физики в Московском университете», Конференция молодых ученых. Москва 2005 г.,
9. 12, 13, 14 Всероссийские Научные Конференции Студентов–Физиков и молодых учёных. Новосибирск 2006 г., Ростов-на-Дону - Таганрог 2007 г., Уфа 2008 г.,
10. Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Москва, 2007 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 36 печатных работах, в числе которых 6 статей в российских рецензируемых журналах, труды и тезисы докладов международных и всероссийских конференций, совещаний, семинаров и научных школ.

Личный вклад автора. Автор принял непосредственное участие на всех этапах проведения работы, включая отработку методики проведения экспериментов, планирование эксперимента и выполнение измерений. Определяющим был вклад автора в анализе экспериментальных данных, расшифровке экспериментальных γ -спектров, получении из экспериментальных данных информации о выходах и интегральных сечениях многочастичных фотоядерных реакций, сравнении результатов с теорией и получении выводов о механизме взаимодействия энергичного γ -кванта с атомным ядром, а также формулировке метода определения выходов фотоядерных реакций по интенсивности характеристического рентгеновского излучения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение и Приложения. Она содержит 57 рисунков и 30 таблиц. Список цитируемой литературы включает 64 наименования. Общий объем диссертации составляет 132 страницы.

Содержание диссертации. Во Введении обосновывается актуальность темы диссертации, представлены преимущества выбранного метода исследований. Формулируется основная цель работы. Приводится структура и краткое содержание глав диссертации.

В первой главе диссертации представлена экспериментальная методика изучения многочастичных фотоядерных реакций в режиме наведенной γ -активности. В этом методе мишень облучается тормозным γ -пучком ускорителя и затем перемещается к γ -спектрометру, который вне пучка измеряет γ -спектры остаточной β -активности. По результатам одного такого эксперимента можно получить сведения обо всех фотонуклонных реакциях. Проведение измерений вне пучка резко снижает фон, многократно повышает чувствительность опыта и позволяет исследовать каналы фотоядерных реакций с низкими эффективными сечениями, ранее недоступные для наблюдений. Метод наведенной активности, по сравнению с прямыми методами регистрации продуктов фотоядерных реакций, использует более простые измерительные установки, а в случае больших времен полураспада радиоактивных ядер, позволяет проводить многократные и тщательные измерения с целью получения максимальной информации о парциальных каналах реакций.

Успеху данного метода исследований в настоящее время способствует наличие интенсивных ускорителей электронов нового поколения на энергии в

несколько десятков МэВ (до 100 МэВ), использование эффективных γ -спектрометров высокого разрешения из сверхчистого германия и, наконец, обширные и надежные данные о схемах уровней остаточной активности и свойствах ядер, систематизированные в международных базах ядерных данных.

В НИИЯФ МГУ создан исследовательский комплекс по изучению многочастичных фотоядерных реакций. Комплекс включает в себя

- компактный ускоритель электронов RTM-70 на энергию электронов до 67.7 МэВ [8],

- спектрометрическую установку на основе HPGe детектора эффективностью 30 %, изготовленного из сверхчистого германия,

- библиотеку программ, обеспечивающую проведение экспериментов в непрерывном круглосуточном режиме, а также анализ и обработку экспериментальных данных,

- базы данных Центра данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) НИИ ядерной физики МГУ, включающие обширный спектроскопический материал о γ - и β -распадах изотопов [10],

- теоретические модели взаимодействия фотонов с ядром в области энергий до мезонного порога [9].

Используемый метод измерений позволяет одновременно изучать до 10 реакций в одних и тех же экспериментальных условиях, что максимально увеличивает относительную точность определения выходов реакций. Абсолютный масштаб сечений получается сравнением с выходом хорошо известной (эталонной) реакции (γ, n) или ($\gamma, 2n$), измеренным на ядрах той же мишени, что исключает необходимость прецизионного мониторинга γ -пучка.

Идентификация типа реакции осуществляется с помощью анализа γ -спектров остаточной активности, а также временного спада этой активности. Идентификация каналов реакции была, по существу, тройной – наряду с наблюдением в спектрах γ -пиков, отвечающих конкретному каналу фотоядерной реакции и определению относительных интенсивностей γ -переходов, измерялся период полураспада соответствующего изотопа. Все эти величины (энергия γ -перехода, его относительная интенсивность и период полураспада) сопоставлялись с табличными. Такой метод позволяет однозначно идентифицировать каналы фотоядерных реакций.

Выходом фотоядерной реакции в экспериментах с тормозным γ -излучением называют

$$Y(E_m) = M \int_0^{E_m} \sigma(E) W(E, E_m) dE \quad (1)$$

где M – число исследуемых облученных ядер, $\sigma(E)$ – эффективное сечение реакции, $W(E, E_m)$ – число фотонов с энергией E в единичном энергетическом интервале в спектре тормозных фотонов, генерируемых в единицу времени монохроматическими электронами с кинетической энергией $E_e = E_m$.

Выходы реакций рассчитываются по интенсивностям соответствующих γ -пиков в спектрах остаточной активности. В случае проведения одного измерения γ -спектра выход данного остаточного ядра определяется по интенсивности соответствующих γ -пиков в спектрах с учетом поправок на эффективность ε_γ HPGe детектора, относительную интенсивность γ -линии I_γ и площадь S_γ фотопика для соответствующей γ -линии:

$$Y(E_{\max}) = \lambda S_\gamma / (n_t \varepsilon_\gamma I_\gamma f(t_i, t_d, t_m)), \quad (1)$$

где n_t – число ядер, а временной фактор $f(t_i, t_d, t_m)$ равняется:

$$f(t_i, t_d, t_m) = (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_m}), \quad (2)$$

где t_i , t_d и t_m – соответственно, время облучения, распада и измерения. Для корректности в (2) нужно ввести дополнительные поправки на мертвое время спектрометрического тракта, коэффициент самопоглощения в анализируемом образце и др.

Представлен также метод определения выходов фотоядерных реакций по характеристическому рентгеновскому излучению. Данный метод может использоваться в случае, когда β -распады конечных ядер реакции не сопровождаются последующими γ -переходами в дочерних ядрах, что не позволяет исследовать такие реакции по γ -линиям спектров остаточной активности. Если β -распад сопровождается переходами электронов в электронной оболочке атома дочернего ядра, такой β -распад может быть зарегистрирован по характеристическим рентгеновским линиям в спектре остаточной активности облученного образца. При этом необходимо учитывать, что различные изотопы одного химического элемента могут иметь рентгеновские линии одинаковых энергий. Выделить вклад отдельного изотопа в образование рентгеновских линий можно, анализируя временные зависимости интенсивности таких линий.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований многочастичных фотоядерных реакций на ядре ^{209}Bi при облучении исследуемого образца тормозными фотонами с максимальной энергией фотонов 67.7 МэВ.

Исследуемая мишень была изготовлена из металлического висмута и представляла собой пластинку диаметром 5 см толщиной 3 мм. Содержание изотопа ^{209}Bi в естественной смеси изотопов висмута составляет 100%. Длительность облучения образца ^{209}Bi составила 4.3 ч. Проведено 314 серий измерений γ -спектров остаточной активности облученного образца. Общая длительность экспозиции спектров составила 245 сут. Спектры измерены в диапазоне энергий γ -квантов от 40 кэВ до 2980 кэВ.

Из анализа экспериментальных γ -спектров остаточной активности были рассчитаны выходы наблюдаемых фотоядерных реакций на изотопе ^{209}Bi . В таблице 1 приведены величины относительных выходов фотоядерных реакций на ядре ^{209}Bi , нормированные на выход реакции $^{209}\text{Bi}(\gamma,2n)^{207}\text{Bi}$.

Из анализа экспериментальных данных по выходам фотонуклонных реакций различной множественности были получены новые данные по интегральным сечениям многочастичных фотоядерных реакций на изотопе ^{209}Bi . Для получения абсолютных величин значения интегральных сечений были нормированы на экспериментальное значение интегрального сечения реакции $^{209}\text{Bi}(\gamma,2n)^{207}\text{Bi}$, исследованной в работах [11-15]. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 1

Относительные выходы фотонейтронных реакций на изотопе ^{209}Bi

Реакция	Эксп. выход (отн. ед.)
$(\gamma,2n)$	1.00 ± 0.05
$(\gamma,3n)$	0.15 ± 0.03
$(\gamma,4n)$	0.09 ± 0.02
$(\gamma,5n)$	0.017 ± 0.003
$(\gamma,6n)$	0.007 ± 0.002
$(\gamma,7n)$	0.00012 ± 0.00006

Таблица 2

Интегральные сечения фотонейтронных реакций на изотопе ^{209}Bi

Реакция	Интегральное сечение, МэВ·мб
(γ,n)	2625
$(\gamma,2n)$	940 ± 50
$(\gamma,3n)$	327 ± 65
$(\gamma,4n)$	290 ± 80
$(\gamma,5n)$	128 ± 20
$(\gamma,6n)$	106 ± 30
$(\gamma,7n)$	5 ± 2

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования многочастичных фотоядерных реакций на изотопах $^{203,205}\text{Tl}$.

Образец был изготовлен из сульфата таллия Tl_2SO_4 с естественным содержанием изотопов таллия и упакован в пластиковую ампулу. Размеры мишени составляли $1\text{ см} \times 1\text{ см} \times 1\text{ см}$. Естественная смесь изотопов таллия содержит два стабильных изотопа ^{203}Tl ($29.524 \pm 0.014\%$) и ^{205}Tl ($70.476 \pm 0.014\%$).

Реакции (γ, in) на изотопе ^{203}Tl и $(\gamma, (i+2)n)$ на изотопе ^{205}Tl приводят к образованию одних и тех же конечных изотопов таллия (здесь $i = 1, 2, 3, \dots$). Поэтому активность радиоактивных изотопов таллия, образующихся в результате фотоядерных реакций, позволяет рассчитать суммарные выходы вышеуказанных реакций на двух стабильных изотопах таллия $^{203,205}\text{Tl}$. В дальнейшем приводятся суммарные выходы парных интерферирующих реакций $^{205}\text{Tl}(\gamma, (i+2)n)^{205-i-2}\text{Tl}$ и $^{203}\text{Tl}(\gamma, in)^{203-i}\text{Tl}$.

Облучение образца было проведено при максимальной энергии тормозных фотонов 67.7 МэВ. Длительность облучения составила 4 ч. γ -Спектры наведенной активности измерены через 1 мин после облучения образца. Проведено 654 серии измерений γ -спектров остаточной активности облученного образца: 36 серий измерений длительностью по 10 мин, затем 503 серии измерений длительностью по 30 мин общей длительностью 10.8 сут непрерывных измерений. Также через 197 сут после облучения проведены 115 серий измерений по 1 ч общей длительностью 4.8 сут непрерывных измерений. Общая длительность экспозиции спектров составила 202 сут.

По интенсивностям γ -пикув в спектрах рассчитаны выходы фотоядерных реакций. В таблице 3 приведены величины выходов реакций, нормированные на величину суммарного выхода реакций $^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl}$ и $^{205}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{202}\text{Tl}$.

Таблица 3

Относительные выходы фотоядерных реакций на изотопах таллия

Реакция	Эксп. выход (отн. ед.)
$^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{202}\text{Tl}$	1.00 ± 0.03
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 2n)^{201}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{201}\text{Tl}$	0.18 ± 0.06
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{200}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{200}\text{Tl}$	0.029 ± 0.003
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{199}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{199}\text{Tl}$	0.011 ± 0.002
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{198}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 7n)^{198}\text{Tl}$	0.004 ± 0.001
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{197}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 8n)^{197}\text{Tl}$	0.0012 ± 0.0005
$^{205}\text{Tl}(\gamma, np)^{203}\text{Hg}$	0.0035 ± 0.0012
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{198}\text{Tl}^m + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 7n)^{198}\text{Tl}^m$	0.0012 ± 0.0004

Для оценки интегральных сечений фотоядерных реакций на изотопах таллия были использованы формы энергетической зависимости сечений реакций и соотношения между вероятностями парных интерферирующих реакций, полученные в работе [9]. Выходы реакций с такими сечениями в пределах погрешностей совпадают с экспериментальными значениями выходов. Для получения абсолютной величины сечений данные были нормированы на значения экспериментальной работы [16]. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Интегральные сечения фотоядерных реакций на изотопах таллия

Реакция	Интегральное сечение, МэВ·мб
$^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl}$	2280 ± 70
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 2n)^{201}\text{Tl}$	787 ± 260
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{200}\text{Tl}$	225 ± 23
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{199}\text{Tl}$	198 ± 36
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{198}\text{Tl}$	112 ± 30
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{197}\text{Tl}$	56 ± 23
$^{205}\text{Tl}(\gamma, n)^{204}\text{Tl}$	2240 ± 70
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 2n)^{203}\text{Tl}$	923 ± 150
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{201}\text{Tl}$	240 ± 20
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{200}\text{Tl}$	206 ± 50
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{199}\text{Tl}$	126 ± 30
$^{205}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{198}\text{Tl}$	71 ± 20
$^{205}\text{Tl}(\gamma, np)^{203}\text{Hg}$	20 ± 7

В четвертой главе приведены основные положения теоретической модели [9], описывающей фотопоглощение атомными ядрами в области энергий до мезонного порога с учетом двух конкурирующих механизмов фоторасщепления – через возбуждение гигантского дипольного резонанса и путем расщепления квазидейтронов. Проведено сравнение результатов расчетов сечений по этой модели [9] с экспериментальными данными, полученными в настоящей диссертации для ядер $^{203,205}\text{Tl}$ и ^{209}Bi и при участии автора диссертации для ядра ^{197}Au [17].

Взаимодействие электромагнитного поля с ядром осуществляется в основном через его E1-компоненту. При малых энергиях поглощаемого фотона ($E_\gamma < 30$ МэВ), когда справедливо длинноволновое приближение, это приводит к возбуждению гигантского дипольного резонанса (ГДР), так как под влиянием внешнего E1-поля возникают самоподдерживающиеся синхронные колебания

всех протонов относительно всех нейтронов. С ростом энергии фотона его длина волны уменьшается, поэтому начинает доминировать (при $E_\gamma > 30\text{--}40$ МэВ и вплоть до порога рождения пиона) другой, квазидейтронный (КД) механизм фотопоглощения, при котором дипольное возбуждение передается не всему ядру в целом, а скорее отдельным пространственно коррелированным нейтрон-протонным парам [5].

Сформулируем основные положения используемой теоретической модели:

1. Учитываются две независимые моды фотовозбуждения ядра - образование ГДР и квазидейтронное фотопоглощение при энергиях > 30 МэВ.
2. Сечения образования этих возбуждений описываются в рамках полумикроскопической модели ГДР [18] и квазидейтронной модели [7].
3. При расчете ГДР-компоненты фотонуклонных реакций учитывается только процесс испарения нейтронов.
4. При описании КД-компоненты фотонуклонных реакций рассматриваются как равновесные, так и предравновесные процессы эмиссии нуклонов.
5. Для описания предравновесных процессов используется вариант экситонной модели, базирующийся на ферми-газовых плотностях частично-дырочных состояний, что позволяет учесть влияние энергетической зависимости плотностей одночастичных и однодырочных состояний на динамику развития предравновесного каскада.

Вышеописанная модель была применена для описания фотонуклонных реакций на ядрах $^{203,205}\text{Tl}$, ^{209}Bi , ^{197}Au . В таблицах 5 – 7 показано сравнение относительных выходов многонуклонных фотоядерных реакций для изотопов $^{203,205}\text{Tl}$, ^{209}Bi (настоящая диссертация) и ^{197}Au [17], полученных экспериментально в настоящей работе и в работе [17], и рассчитанных теоретически по модели [9]. Показаны результаты теоретического расчета с учетом обоих возможных механизмов фоторасщепления (ГДР + КД) и с учетом только ГДР. Теоретические выходы были рассчитаны с использованием тормозного спектра, рассчитанного с помощью библиотек программ GEANT-4.

Данные приведенные в табл. 5 – 7 показывают, что описание многонуклонного фоторасщепления с учетом ГДР и квазидейтронного механизма дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом для фотонейтронных реакций всех множественностей. В то же время без учета КД-фоторасщепления выходы фотонейтронных реакций с вылетом более чем двух-трех нейтронов оказываются заниженными по сравнению с результатами эксперимента, причем для реакций высокой множественности ($i \geq 4$) это занижение достигает и превышает фактор 2. Отчетливо видна тенденция роста роли квазидейтронного механизма с увеличением множественности

фотонейтронов (энергии возбуждения ядра). Для $i \geq 5$ квазидейтронный механизм начинает доминировать.

Эти выводы являются одинаковыми для четырех рассмотренных тяжелых ядер ^{197}Au , $^{203,205}\text{Tl}$, ^{209}Bi и свидетельствуют о том, что механизм протекания в них многочастичных фотоядерных реакций является общим, т.е. присущим тяжелым ядрам с числом нуклонов ≈ 200 .

В Заключение резюмированы основные результаты диссертации.

Таблица 5

**Сравнение экспериментальных и теоретических выходов
фотонейтронных реакций на ядре ^{209}Bi**

Реакция	Эксп. выход (отн. ед.)	Теор. выход [9], ГДР+КД (отн. ед.)	Теор. выход [9], ГДР (отн. ед.)
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 2n)^{208}\text{Bi}$	1.00 ± 0.05	1.0000	1.0000
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 3n)^{207}\text{Bi}$	0.15 ± 0.03	0.113	0.080
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 4n)^{206}\text{Bi}$	0.09 ± 0.02	0.051	0.025
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 5n)^{205}\text{Bi}$	0.017 ± 0.003	0.016	0.007
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 6n)^{204}\text{Bi}$	0.007 ± 0.002	0.0041	0.0020
$^{209}\text{Bi}(\gamma, 7n)^{203}\text{Bi}$	0.00012 ± 0.00006	0.00012	0.00007

Таблица 6

**Сравнение экспериментальных и теоретических выходов
фотоядерных реакций на ядрах $^{203,205}\text{Tl}$**

Реакция	Эксп. выход (отн. ед.)	Теор. выход [9], ГДР+КД (отн. ед.)	Теор. выход [9], ГДР (отн. ед.)
$^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{202}\text{Tl}$	1.00 ± 0.03	1.0000	1.0000
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 2n)^{201}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{201}\text{Tl}$	0.18 ± 0.06	0.211	0.192
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 3n)^{200}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{200}\text{Tl}$	0.029 ± 0.003	0.032	0.019
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 4n)^{199}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{199}\text{Tl}$	0.011 ± 0.002	0.013	0.006
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 5n)^{198}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 7n)^{198}\text{Tl}$	0.004 ± 0.001	0.003	0.001
$^{203}\text{Tl}(\gamma, 6n)^{197}\text{Tl} + ^{205}\text{Tl}(\gamma, 8n)^{197}\text{Tl}$	0.0012 ± 0.0005	0.0008	0.0004
$^{205}\text{Tl}(\gamma, np)^{203}\text{Hg}$	0.0035 ± 0.0012	0.0040	0.0027

**Сравнение экспериментальных и теоретических выходов
фотонейтронных реакций на ядре ^{197}Au**

Реакция	Эксп. выход (отн. ед.)	Теор. выход [9], ГДР+КД (отн. ед.)	Теор. выход [9], ГДР (отн. ед.)
$^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$	1.0000	1.0000	1.0000
$^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	0.16 ± 0.01	0.20	0.19
$^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	0.023 ± 0.002	0.021	0.014
$^{197}\text{Au}(\gamma, 4n)^{193}\text{Au}$	0.0074 ± 0.0013	0.0097	0.0043
$^{197}\text{Au}(\gamma, 5n)^{192}\text{Au}$	0.0025 ± 0.0002	0.0027	0.0010
$^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$	0.00050 ± 0.00007	0.0006	0.0002

Цитируемая литература

1. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. — М.: Изд-во московского ун-та, 1979. — 216 с.
2. *Eramzhan R.A., Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Neudatchin V.G.* The giant dipole resonance light nuclei and related phenomena. // *Physics Reports*. — 1986. — V. 136. — P. 229-400.
3. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Неудачин В.Г., Шевченко В.Г., Эрамжян Р.А., Юдин Н.П.* Конфигурационное расщепление дипольного гигантского резонанса в атомных ядрах // *УФН*. — 1990. — Т. 160, вып. 3. — С. 57-99.
4. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Эрамжян Р.А.* Исследование дипольного гигантского резонанса в $(\gamma, x\gamma')$ -экспериментах // *ЭЧАЯ*. — 1992. — Т. 23. — С. 1770-1826.
5. *Levinger J.S.* The high energy nuclear photoeffect // *Phys. Rev.* — 1951. — V. 84. — P. 43-51.
6. *Levinger J.S.* Nuclear photo-disintegration. — Oxford University Press, 1960.
7. *Chadwick M.B., Obloinsky P., Hodgson P.E., Reffo G.* Pauli-blocking in the quasideuteron model of photoabsorption // *Phys. Rev. C*. — 1991. — V. 44. — P. 814-823.
8. *Shvedunov V.I., Ermakov A.N., Gribov I.V., Knapp E.A., Novikov G.A., Pakhomov N.I., Shvedunov I.V., Skachkov V.S., Sobenin N.P., Trower W.P. and Yajlijan V.R.* A 70 MeV racetrack microtron. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2005. — V. 550. — P. 39-53.

9. *Ииханов Б.С., Орлин В.Н.* Предравновесная модель фотонуклонных реакций, базирующаяся на ферми-газовых плотностях. // *Ядерная физика.* – 2008. – Т. 71. – С. 517.
10. *Бобошин И.Н., Варламов В.В., Иванов Е.М., Иванов С.В., Песков Н.Н., Степанов М.Е., Чесноков В.В.* // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». (24 – 29 сентября 2001г., Новороссийск) ISBN 5-211-04521-1. Издательство Московского университета. – Москва, 2001. – С. 19–21.
11. *Belyaev S.N., Kozin A.B., Nechkin A.A., Semenov, Semenko S.F.* On Photoabsorption Cross Sections of Pr, Bi, and Ta Isotopes in The Energy Region $E_{\gamma} < 12$ MeV // *Yad. Fiz.* – 1985. – V. 42. – P. 1050.
12. *Young L.M.* Photoneutron Cross Sections and Spectra from Monoenergetic Photons on Yttrium, Praseodymium, Lead, and Bismuth in the Giant Resonance. // Ph.D. Thesis. – 1972. – University of Illinois, USA.
13. *Kocimski S.M., Cook B.C.* Photoneutron cross sections for ^{209}Bi . // In proceedings Int. Conf. on Photonuclear Reactions (Pacific Grove, 1973). – 1973. – V.2. – P. 1059.
14. *Harvey R.R., Caldwell J.T., Bramblett R.L., Fultz S.C.* Photoneutron cross sections of Pb^{206} , Pb^{207} , Pb^{208} and Bi^{209} . // *Phys. Rev.* – 1964. – V. 136, Issue 1B. – P. 126.
15. *Варламов В.В., Песков Н.Н., Руденко Д.С., Степанов М.Е.* Согласованная оценка сечений фотонейтронных реакций по данным, полученным в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов в Ливерморе (США) и Сакле (Франция). // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 2003. – № 1-2. – С. 48-89.
16. *Antropov G.P., Mitrofanof I.E., Prokofev A.I., Russkikh V.S.* Photoneutron cross sections for ^{203}Tl and ^{205}Tl . // *Izv. Kaz. Akad. Nauk, Ser.Fiz.-Mat.* – 1970. – V.34. – P. 116.
17. *Ермаков А.Н., Ииханов Б.С., Капитонов И.М., Чжо Чжо Тун, Макаренко И.В., Орлин В.Н., Шведунов В.И.* Мультинейтронное фоторасщепление ядра ^{197}Au за гигантским дипольным резонансом // *Ядерная физика.* – 2008. – Том 71, №3. – С. 419–426.
18. *Ииханов Б.С., Орлин В.Н.* Полумикроскопическое описание дипольного гигантского резонанса. // *ЭЧАЯ.* – 2007. – Т. 38. – С. 84.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Алиев Р.А., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Конюхов И.Г., Куау Куау Нтун, Макаренко И.В., Минеева Т.Н., Стопани К.А.* Возбуждение изомерного уровня 135.5 кэВ в ядре ^{92}Nb методом фотоядерных реакций. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и астрономия. — 2006. — № 6. — С. 55-57.
2. *Асанов Ж.А., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Куау Куау Нтун, Макаренко И.В., Салахутдинов Д.Р., Четверткова В.А.* Многочастичные фотоядерные реакции на ядре ^{203}Tl . // Известия РАН. Серия физическая. — 2007. — Т. 71, №3. — С. 346-349.
3. *Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* «Ускоритель РТМ – 70 как импульсный источник нейтронов и фотонов». // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и астрономия. — 2007. — № 6. — С. 25-28.
4. *Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Чжо Чжо Тун, Макаренко И.В.* Мультинейтронные фотоядерные реакции на изотопе ^{197}Au . // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и астрономия. — 2007. — №5. — С. 49-52.
5. *Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Чжо Чжо Тун, Макаренко И.В., Орлин В.Н., Шведунов В.И.* Мультинейтронное фоторасщепление ядра ^{197}Au за гигантским дипольным резонансом // Ядерная физика. — 2008. — Том 71, №3. — С. 419–426.
6. *Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Макаренко И.В., Четверткова В.А., Шведунов В.И.* Выходы многочастичных фотонейтронных реакций на изотопе ^{209}Bi // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и астрономия. — 2008. — №3. — С. 57-59.
7. *Aliiev R.A., Ermakov A.N., Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Konyukhov I.G., Kuaw Kuaw Ntun, Makarenko I.V., Mineeva T.N., Stopani K.A.* Excitation of 135.5 keV isomeric level of ^{92}Nb nucleus in photonuclear reactions. // In proceedings of LV International Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure "Frontiers in the Physics of Nucleus". (June 28 – July 1, 2005, St. Peterburg, Peterhof, Russia) — St. Peterburg. — P. 56.
8. *Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Макаренко И.В.* Возбуждение изомерного уровня 2^+ изотопа ^{104}Ag в фотоядерных реакциях. // 56 Международная конференция "Ядро-2006" по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (4-8 сентября 2006 г., Саров). Сборник тезисов. — Саров, 2006. — С. 90.

9. *Асанов Ж.А., Ермаков А.Н., Ииханов Б.С., Капитонов И.М., Куау Куау Нтин, Макаренко И.В., Салахутдинов Д.Р., Четверткова В.А.* Многочастичные фотоядерные реакции на ядре ^{203}Tl . // 56 Международная конференция "Ядро-2006" по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (4-8 сентября 2006 г., Саров). Сборник тезисов. – Саров, 2006. – С. 142-143.
10. *Ермаков А.Н., Бельшев С.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* Фоторасщепление естественной смеси изотопов $^{235}, ^{238}\text{U}$ // 57 Международная конференция «ЯДРО 2007» «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (25 – 29 июня 2007 г., Воронеж). Сборник тезисов. – Воронеж, 2007. – С. 46.
11. *Ермаков А.Н., Бельшев С.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* Возбуждение изомерных состояний изотопов иттрия методом фотоядерных реакций // 57 Международная конференция «ЯДРО 2007» «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (25 – 29 июня 2007 г., Воронеж). Сборник тезисов. – Воронеж, 2007. – С. 131.
12. *Ермаков А.Н., Бельшев С.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* Фотоядерные реакции с вылетом нескольких нейтронов на ядре ^{127}I // 57 Международная конференция «ЯДРО 2007» «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (25 – 29 июня 2007 г., Воронеж). Сборник тезисов. – Воронеж, 2007. – С. 132.
13. *Ермаков А.Н., Бельшев С.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* Многочастичные фотоядерные реакции на ядре ^{197}Au // 57 Международная конференция «ЯДРО 2007» «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (25 – 29 июня 2007 г., Воронеж). Сборник тезисов. – Воронеж, 2007. – С. 154.
14. *Ермаков А.Н., Бельшев С.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* Фотоядерные реакции на ядре ^{209}Bi в области энергий фотонов до 70 МэВ // 57 Международная конференция «ЯДРО 2007» «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (25 – 29 июня 2007 г., Воронеж). Сборник тезисов. – Воронеж, 2007. – С. 155.
15. *Ермаков А.Н., Ииханов Б.С., Капитонов И.М., Макаренко И.В., Четверткова В.А.* Фоторасщепление изотопа ^{209}Bi // 58 Международная конференция «Ядро-2008. Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской

- физики и ядерной энергетики» (23 – 27 июня 2008 г., Москва). Сборник тезисов. – Москва, 2008. – С. 125.
16. *Бельшиев С.С., Ермаков А.Н., Кузнецов А.А., Курилик А.С., Макаренко И.В., Стопани К.А., Ханкин В.В.* Исследование фоторасщепления естественной смеси изотопов $^{235}, ^{238}\text{U}$ на ускорителе РТМ-70 // 58 Международная конференция «Ядро-2008. Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики» (23 – 27 июня 2008 г., Москва). Сборник тезисов. – Москва, 2008. – С. 149.
 17. *Asanov Zh.A., Ermakov A.N., Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Kyaw Kyaw Htun, Makarenko I.V., Salakhutdinov D.R., Chetvertkova V.A.* Multiparticle photonuclear reactions in ^{203}Tl nucleus // In proceeding of XI International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei EMIN-2006 (September 2006, Moscow). – Moscow, 2006. – P. 147-152.
 18. *Ermakov A., Ishkhanov B., Kapitonov I., Makarenko I.* Excitation of 2+ isomeric level of ^{104}Ag nucleus in photonuclear reactions. // 2007 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (April 22-27, 2007, Nice, France). Book of summaries. – 2007 – P. 124.
 19. *Ermakov A., Ishkhanov B., Kapitonov I., Kyaw Kyaw Htun, Makarenko I., Chetvertkova V.* Multiparticle photonuclear reactions in ^{203}Tl and ^{197}Tl nuclei. // 2007 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (April 22-27, 2007, Nice, France). Book of summaries. – 2007 – P. 125.
 20. *Ермаков А.Н., Капитонов И.М., Конюхов И.Г., Макаренко И.В., Минеева Т.Н., Стопани К.А., Ханкин В.В.* О возбуждении долгоживущих ядерных состояний на электронном пучке ускорителя РТМ-70 НИИЯФ МГУ. // Труды V межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (22-23 ноября 2004 г., Москва) — Москва, 2004. — С. 63-66.
 21. *Алиев Р.А., Ермаков А.Н., Ишиханов Б.С., Капитонов И.М., Конюхов И.Г., Куау Куау Нтун, Макаренко И.В., Минеева Т.Н., Стопани К.А.* Возбуждение изомерного уровня 135.5 кэВ в ядре ^{92}Nb методом фотоядерных реакций. // Труды 6 межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». (21-22 ноября 2005 г., Москва) — Москва, 2005. — С. 97-101.
 22. *Асанов Ж.А., Ермаков А.Н., Ишиханов Б.С., Капитонов И.М., Куау Куау Нтун, Макаренко И.В., Салахутдинов Д.Р., Четверткова В.А.*

- Многочастичные фотоядерные реакции на ядре ^{203}Tl . // Труды 7 межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». (20-21 ноября 2006 г., Москва) — Москва, 2006. — С. 68-76.
23. *Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* «Ускоритель РТМ – 70 как импульсный источник нейтронов и фотонов». Труды 7 межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». (20-21 ноября 2006 г., Москва) — Москва, 2006. — С. 62-67.
24. *Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Ииханов Б.С., Капитонов И.М., Макаренко И.В., Четверткова В.А., Шведун В.И.* Фоторасщепление ядра ^{209}Bi в области энергий фотонов за гигантским дипольным резонансом // Труды 8 межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (19-20 ноября 2007 г., Москва). – Москва, 2007. – С. 134-137.
25. *Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* Фоторасщепление естественной смеси изотопов $^{235}, ^{238}\text{U}$ // Труды 8 межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (19-20 ноября 2007 г., Москва). – Москва, 2007. – С. 137-141.
26. *Конюхов И.Г., Макаренко И.В., Минеева Т.Н.* Возбуждение метастабильных уровней изотопов ниобия в фотоядерных реакциях. // 12 Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2005» (апрель 2005 г., Москва). Сборник тезисов. – Москва, 2005. – С. 22-24.
27. *Асанов Ж.А., Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Куав Куав Нтин, Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Салахутдинов Д.Р., Ханкин В.В., Четверткова В.А.* Получение ядер, удаленных от полосы β -стабильности, в реакциях (γ, Xn) на микротроне РТМ-70 // 14 Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2007» (апрель 2007 г., Москва). – Москва, 2007. – С. 21.
28. *Ермаков А.Н., Макаренко И.В., Салахутдинов Д.Р., Четверткова В.А.* Многочастичные фотоядерные реакции на изотопе ^{209}Bi // 14 Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2007» (апрель 2007 г., Москва). – Москва, 2007. – С. 17.

29. *Асанов Ж.А., Ермаков А.Н., Куау Куау Нтун, Макаренко И.В.* Фоторасщепление изотопа ^{197}Au в области энергий фотонов до 70 МэВ // 14 Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2007» (апрель 2007 г., Москва). – Москва, 2007. – С. 18.
30. *Ермаков А.Н., Макаренко И.В., Салахутдинов Д.Р., Четверткова В.А.* Возбуждение изомерных состояний изотопов иттрия в фотоядерных реакциях // 14 Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2007» (апрель 2007 г., Москва). – Москва, 2007. – С. 23.
31. *Ермаков А.Н., Макаренко И.В., Четверткова В.А.* Фоторасщепление изотопа ^{209}Bi в области энергий фотонов до 70 МэВ // XIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (8 – 11 апреля 2008 г., Москва). Сборник тезисов. – Москва, 2008. – С. 20.
32. *Конюхов И.Г., Макаренко И.В., Минеева Т.Н.* Фотоядерные реакции на ядре ^{103}Rh . Форум «Всемирный год физики в Московском университете», Конференция молодых ученых. (сентябрь 2005 г., Москва). Сборник тезисов. — Москва, 2005. — С. 113.
33. *Конюхов И.Г., Макаренко И.В., Минеева Т.Н.* Изучение изомерного уровня 135.5 кэВ ядра ^{92}Nb . Форум «Всемирный год физики в Московском университете», Конференция молодых ученых. (сентябрь 2005 г., Москва). Сборник тезисов. — Москва, 2005. — С. 115.
34. *Алиев Р.А., Макаренко И.В., Ермаков А.Н.* Возбуждение изомерных уровней изотопов родия в фотоядерных реакциях. // 12 Всероссийская научная конференция студентов–физиков и молодых учёных. (23-29 марта 2006 г., Новосибирск). Сборник материалов конференции. – Новосибирск, 2006. – С. 371-372.
35. *Бельшев С.С., Ермаков А.Н., Кузнецов А.А., Макаренко И.В., Ханкин В.В.* Многочастичные фотоядерные реакции на изотопе ^{197}Au . // 13 Всероссийская Научная Конференция Студентов–Физиков и молодых учёных. (20-26 апреля 2007 г., Ростов-на-Дону - Таганрог) Сборник материалов конференции. – Ростов-на-Дону, 2007. – С. 323-324.
36. *Ермаков А.Н., Макаренко И.В., Четверткова В.А.* Многочастичные фотоядерные реакции на ядре ^{209}Bi // 14 Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ – 14 (27 марта – 3 апреля 2008 г., Уфа). Сборник тезисов. – Уфа, 2008. – С. 286-287.

МАКАРЕНКО Ирина Витальевна

МНОГОЧАСТИЧНОЕ ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР ТАЛЛИЯ
И ВИСМУТА

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Заказное. Подписано в печать 03.10.2008.
Формат 60x90/16. Бумага офсетная.
Гарнитура “Таймс”. Печать цифровая.
Усл.печ.л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № Т-916

Отпечатано в типографии “КДУ”
Тел./факс (495) 939-57-32
E-mail: press@kdu.ru