

ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук Фурсовой Надежды Юрьевны  
на тему: «Фотоядерные реакции на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и  
молибдена»  
по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий

Диссертация Фурсовой Надежды Юрьевны посвящена изучению фотоядерных реакций различной множественности на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. В рамках диссертационной работы выполнен цикл экспериментов по облучению мишеней естественного изотопного состава на пучках тормозного гамма-излучения. Получены данные о выходах и сечениях на эквивалентный квант для фотоядерных реакций, которые сопоставлены с результатами расчётов, выполненных на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и с использованием программного кода TALYS 2.0.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена фундаментальной и прикладной значимостью получения новых данных о фотоядерных реакциях. Результаты таких исследований позволяют углубить понимание механизмов возбуждения и распада гигантского дипольного резонанса, а также создают основу для совершенствования теоретических моделей взаимодействия гамма-квантов с атомными ядрами. Практическая значимость определяется возможностью использования полученных данных о фотоядерных реакциях для решения актуальных задач разработки альтернативных технологий производства медицинских изотопов и уточнения моделей, описывающих образование и разрушение обойдённых ядер в астрофизических условиях.

Кроме того, работа Фурсовой Н.Ю. особенно актуальна в связи со строительством в России источника комптоновского излучения на базе

Национального центра физики и математики в городе Саров. Полученные в диссертационной работе результаты используются при планировании первых гамма-активационных экспериментов на данной установке.

Диссертация Фурсовой Н.Ю. представляет собой завершённое исследование и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 150 страницах, содержит 51 рисунок и 27 таблиц. Тема диссертации и её содержание соответствуют научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Во введении обозначены цели и задачи диссертационной работы, обоснованы актуальность и степень разработанности темы исследования, определена научная и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о публикациях соискателя и апробации работы.

В первой главе описывается методика проведения экспериментальных исследований фотоядерных реакций на мишенях естественного изотопного состава из эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Для экспериментов выбран гамма-активационный метод, включающий облучение мишеней на пучке тормозных гамма-квантов, генерируемых в вольфрамовом конверторе при попадании электронов от импульсного разрезного микротрона РМ-55 НИИЯФ МГУ и микротрона МТ-25 ОИЯИ, а также измерение наведённой в мишенях активности с помощью детектора из сверхчистого германия. В данной главе подробно представлен вывод формул для вычисления экспериментальных выходов и сечений на эквивалентный квант.

Вторая глава посвящена теоретическим моделям фотоядерных реакций, используемым в диссертационной работе. Рассмотрены разработанная в НИИЯФ МГУ комбинированная модель фотонуклонных реакций и программный код TALYS 2.0. В программном коде TALYS 2.0 при расчёте сечений фотопоглощения учитывались гигантский дипольный резонанс и

квазидейтронный механизм фотопоглощения. Для описания гигантского дипольного резонанса были рассмотрены различные варианты силовых фотонных функций, но для всех последующих расчётов выбраны параметры по умолчанию. В комбинированной модели фотонуклонных реакций дополнительно учитывались изоспиновое расщепление гигантского дипольного резонанса, вклады изовекторного квадрупольного резонанса и обертона гигантского дипольного резонанса.

Третья глава содержит описание результатов проведённых исследований. Достоверность полученных данных базируется на сочетании широко используемого гамма-активационного метода экспериментальных исследований и хорошо зарекомендовавших себя теоретических подходов (комбинированной модели фотонуклонных реакций и программного кода TALYS 2.0), рассмотренных в первых двух главах работы. Представлены экспериментальные сечения на эквивалентный квант для фотонейтронных и фотопротонных реакций на мишенях естественного изотопного состава из эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Такие данные для фотопротонных реакций на изотопах эрбия и диспрозия получены впервые. Выполнено сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант с результатами расчётов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0, которое показало необходимость учёта изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса для описания фотопротонных реакций.

На основе комбинированной модели фотонуклонных реакций были рассчитаны весовые коэффициенты, которые позволили выделить из экспериментальных данных, полученных на естественной смеси изотопов, сечения на эквивалентный квант для реакций  $(\gamma, 1p)$ ,  $(\gamma, 2n)$  и  $(\gamma, 3n)$ . Выявлены тенденции уменьшения сечений на эквивалентный квант для реакции  $(\gamma, 1p)$  внутри каждого изотопного ряда, а также их общего спада при увеличении отношения  $N/Z$ . Для реакций  $(\gamma, 2n)$  и  $(\gamma, 3n)$  показан рост соответствующих сечений с увеличением  $N/Z$ .

Кроме того, были изучены реакции, приводящие к образованию не только основных, но и метастабильных состояний ядер, что позволило определить изомерные отношения для некоторых ядер палладия, родия, молибдена и ниобия. Сравнение полученных изомерных отношений с результатами других работ и расчётами, выполненными с помощью программного кода TALYS 2.0 с параметрами по умолчанию, показало, что для их описания требуется учитывать многонуклонные реакции и пороговый фактор.

В четвёртой главе показана применимость полученных данных для ядерной астрофизики и медицины. В настоящее время фотоядерные реакции являются одним из сценариев образования и разрушения обойдённых ядер в процессе нуклеосинтеза. В диссертации представлено сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для основных фотонуклонных реакций, приводящих к разрушению ядер  $^{102}\text{Pd}$  и  $^{92}\text{Mo}$ , с результатами расчётов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций, а также с использованием программного кода TALYS 2.0 и библиотеки оцененных ядерных данных JENDL. Показано, что код TALYS 2.0 и данные библиотеки JENDL не позволяют корректно описывать ряд реакций (особенно фотопротонные), что может ограничивать точность определения скоростей образования и распада обойдённых ядер.

Во втором параграфе данной главы рассмотрены реакции, приводящие к образованию медицинских изотопов  $^{166}\text{Ho}$  и  $^{161}\text{Tb}$ . В современной ядерной медицине фотопротонные реакции рассматриваются как перспективный способ получения радиоизотопов, используемых для диагностики и терапии различных заболеваний. В параграфе представлены экспериментальные радиохимические выходы фотоядерных реакций на мишенях естественного изотопного состава из эрбия и диспрозия. На основе комбинированной модели фотонуклонных реакций рассчитаны оптимальные энергии для наработки  $^{166}\text{Ho}$  и  $^{161}\text{Tb}$  на ускорителях электронов.

Положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы корректны и обоснованы. Результаты диссертации были опубликованы в 6 статьях в научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова, и представлены в 20 докладах на всероссийских и международных конференциях.

В то же время, к диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Отсутствует общий обзор результатов и перспектив фотоядерных методик исследования, не обсуждаются иные методы и подходы к рассматриваемой проблеме.
2. Не приведено обсуждение спектра тормозного излучения пучка электронов и его перекрытия с энергетической зависимостью сечения ГДР. Влияет ли выбор энергии электронного пучка на результаты проведенных оценок сечений? При этом выбор толщины вольфрамового конвертера никак не обосновывается (в разных экспериментах – разная толщина при отсутствии корреляции с максимальной энергией электронов).
3. Из текста работы не ясно, как от полного выхода фотоядерной реакции, оцененного исходя из числа созданных изотопов, осуществлялся переход к эффективному сечению реакции.
4. В таблицах погрешности приведены с избыточным числом знаков после запятой. Например:  $0.264 \pm 0.061$ .

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно

требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат диссертации адекватно отражает ее основное содержание.

Таким образом, соискатель Фурсова Надежда Юрьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

профессор кафедры физики частиц и экстремальных состояний материи

физического факультета

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Московский государственный университет имени

М.В. Ломоносова»

САВЕЛЬЕВ-ТРОФИМОВ Андрей Борисович

24.02.2026

Контактные данные:

тел.: 7(916)1845084, e-mail: savelevab@my.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Московский государственный университет имени

М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра физики частиц и

экстремальных состояний материи

Тел.: 8(495) 939-53-18; e-mail: savelevab@my.msu.ru

Подпись сотрудника Савельева-Трофимова Андрея Борисовича  
удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого Совета  
физического факультета

МГУ имени М.В.Ломоносова

С.Ю. Стремоухов

24.02.2026