

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Хоменко Ирины Анатольевны на тему:
«Новые методы получения медицинских радиоизотопов лантана»
по специальности 1.3.21. Медицинская физика**

Диссертационная работа Хоменко И.А. посвящена актуальной проблеме современной медицинской физики – разработке физических основ производства перспективных медицинских радионуклидов ^{133}La и ^{135}La с использованием пучков протонов и альфа-частиц на циклотронах. В последние годы стремительно развивается тераностический подход, предполагающий использование пар радионуклидов для диагностики и терапии. Физические характеристики распада изотопов лантана ^{133}La и ^{135}La делают эту пару одной из наиболее перспективных для реализации концепции тераностики. Однако переход от теоретической привлекательности к клиническому применению упирается в проблему наработки. Получение этих изотопов в циклотронных мишенях требует точного знания сечений ядерных реакций при различных энергиях налетающих частиц. Поэтому задача получения новых и уточнения существующих экспериментальных данных о сечениях ядерных реакций является фундаментальной основой для разработки технологий получения этих перспективных медицинских изотопов. Диссертация Хоменко И.А. направлена на решение этой важной задачи ядерной медицины, что определяет ее высокую актуальность.

Диссертация изложена на 113 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы (включающего 104 наименования). Работа содержит 58 рисунков и 17 таблиц, что свидетельствует о значительном объеме экспериментального материала. Структура диссертации представляется логичной и продуманной: последовательно изложены обзор литературы, методы исследования, результаты проведенных экспериментов и их анализ.

Во **Введении** достаточно четко и последовательно сформулированы цель и задачи, убедительно обоснована актуальность темы, а также представлены научная новизна и практическая значимость исследования. Автор определяет свою работу как создание физико-технологической основы для производства радионуклидов, подчеркивая, что конечной целью является их применение в составе радиофармпрепаратов. Такая постановка цели и задач представляется полностью соответствующей современным направлениям и задачам медицинской физики.

Глава 1 представляет собой развернутый обзор литературы, в котором рассмотрены физические основы ядерной медицины, требования, предъявляемые к радионуклидам для медицинского применения, а также современные методы диагностики (ОФЭКТ, ПЭТ) и терапии (бета-, альфа- и Оже-излучатели). Отдельное внимание уделено способам получения радионуклидов и перспективам использования лантана и его аналогов. Обзор написан логично и последовательно, отличается критическим анализом существующих данных и демонстрирует глубокое понимание автором проблематики.

Глава 2 подробно описывает экспериментальные методы, использованные в работе: изготовление тонких мишеней методом седиментации, метод стопки фольг, мониторные реакции, гамма-спектрометрию, расчет сечений и выходов, а также методику экстракционной хроматографии. Автор не только последовательно излагает технические детали, но и поясняет физические принципы, лежащие в основе каждого метода, что демонстрирует уверенное владение экспериментальной техникой и понимание ее ограничений. Представленное описание создает надежную методическую базу для корректной интерпретации результатов, полученных в ходе дальнейших экспериментов.

Глава 3 содержит основные экспериментальные результаты диссертационной работы. Автором были исследованы четыре группы ядерных реакций: на мишенях природного состава и обогащенных изотопов — $^{nat}\text{Ba}(\alpha, x)$,

$^{133}\text{Cs}(\alpha, x)$, $^{135}\text{Ba}(p, x)$ и $^{136}\text{Ba}(p, x)$. Измеренные впервые сечения реакций имеют значение для фундаментальной науки, поскольку они дополняют международную базу экспериментальных ядерных данных (EXFOR) в областях энергий, где информация ранее была ограниченной. Проведенное сравнение экспериментальных данных с теоретическими значениями библиотеки ядерных данных TENDL позволяет оценить их предсказательную способность и уточнить параметры ядерных моделей (TALYS).

На основе этих фундаментальных данных автором рассчитаны выходы целевых радионуклидов ^{133}La и ^{135}La для различных энергетических диапазонов, что служит физической основой для выбора оптимальных режимов производства. Отдельно следует отметить экспериментально разработанную и апробированную методику экстракционно-хроматографического разделения лантана и бария на сорбенте TRU Resin. Представленные количественные характеристики подтверждают ее эффективность, что делает этот метод важным этапом в технологической цепочке создания радиофармацевтических препаратов на основе радиоизотопов лантана.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, которые логично вытекают из представленных экспериментальных данных и полностью соответствуют поставленным в работе задачам. Автору удалось последовательно реализовать полный цикл исследования: от измеренных сечений ядерных реакций, восполняющих пробелы в фундаментальной базе данных EXFOR, до расчета выходов и разработки практической методики экстракционно-хроматографического выделения. Такой подход подтверждает завершенность работы и ее значимость для дальнейшего развития медицинской физики.

Защищаемые положения обоснованы экспериментально и подкреплены количественными расчетами. Первое положение соответствует впервые измеренным сечениям четырех различных групп реакций, подтвержденных сравнением с TENDL и имеет фундаментальную значимость

для уточнения ядерных моделей. Второе положение о хроматографическом выделении изотопов лантана с высокой химической чистотой может быть рассмотрено в рамках задач медицинской физики, так как его целью является получение радионуклида для радиофармпрепаратов, а метод выделения является технологической составляющей предлагаемого способа получения медицинских изотопов лантана с использованием циклотронов.

Третье положение о пригодности $^{135}\text{Ba}(p,3n)^{133}\text{La}$ подтверждено полученными результатами, а именно значением выхода ^{133}La , соответствующим применяемым в медицине количествам. Четвертое положение о двух способах получения ^{135}La подкреплено сравнением рассчитанных в работе выходов. Выводы работы полностью соответствуют защищаемым положениям и имеют четкое экспериментальное подтверждение.

Достоверность результатов обеспечивается использованием стандартных методик – полупроводниковой гамма-спектрометрии на основе детекторов из сверхчистого германия, а также методов статистического анализа полученных данных. Сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими значениями, рассчитанными с использованием библиотеки TENDL, позволяет корректно интерпретировать измеренные сечения с учетом вклада различных механизмов ядерных взаимодействий. Результаты проведенной работы опубликованы в рецензируемых журналах и представлены на всероссийских и международных конференциях.

Научная новизна работы заключается в том, что автором впервые получены экспериментальные данные о сечениях целого ряда ядерных реакций, а также предложены методы получения ^{133}La и ^{135}La на циклотронах. Особо следует отметить, что впервые показана перспективность реакции $^{136}\text{Ba}(p,2n)$ для наработки ^{135}La , что подтверждено рассчитанным значением выхода целевого радионуклида и открывает возможность его практического применения для получения медицинского изотопа.

Высоко оценивая научную и практическую значимость диссертационного исследования, в целом положительно характеризуя полученные результаты и защищаемые положения, хотелось бы остановиться на ряде **замечаний и уточнений**, которые, на мой взгляд, позволят улучшить и прояснить некоторые аспекты работы.

1. В разделе автореферата «Степень разработанности темы» и во введении диссертации указано, что «Экспериментальные работы по измерению сечений ядерных реакций образования радиоизотопов лантана под действием альфа-частиц и протонов отсутствуют». Однако в следующем абзаце в научной новизне указывается что «расширен энергетический диапазон для реакций под действием альфа-частиц для ^{133}Cs ». В связи с этим было бы целесообразно уточнить, какие именно экспериментальные данные получены впервые, а какие – считаются уточненными в рамках данной работы.

2. В разделе 2.5 диссертации достаточно детально описана процедура калибровки гамма-спектрометра и методика расчета активностей по площадям пиков полного поглощения. Однако в тексте работы приведен лишь один пример гамма-спектра, причем исключительно для облученной мишени из хлорида цезия-133 (Рисунок 34, с. 76), в то время как для бариевых мишеней, составляющих основной массив экспериментальных данных, измеренные гамма-спектры не представлены вовсе. В автореферате примеры гамма-спектров также отсутствуют. Учитывая, что ряд целевых радионуклидов идентифицировался по линиям с относительно малой интенсивностью, наличие хотя бы одного иллюстративного примера для бариевой мишени сделало бы представленный материал более наглядным.

3. Поскольку значения выходов, приведенные в размерности Бк/(мкА·ч), представлены в диссертации и в автореферате как заключительный итог работы, в таком виде их нельзя считать полностью определенными без указания параметров мишеней, для которых они были рассчитаны. Для корректной интерпретации и обеспечения воспроизводимости представленных данных необходимо приводить характеристики толстых

мишеней – такие как химический состав (металл, карбонат, оксид), толщина, соответствующая полному пробегу частиц при данной энергии, плотность и молярная масса, - отдельно для каждого типа используемого соединения. Это позволит сопоставить приведенные величины с данными других авторов и оценить их применимость для планирования наработки радионуклидов на конкретных циклотронах.

4. Также в тексте автореферата и диссертации встречаются формулировки, которые нуждаются в уточнении или корректировке, например: «В сравнении с реакцией $^{135}\text{Ba}(p,n)$ реакция $^{136}\text{Ba}(p,2n)$ может дать больший выход, т.к. известно, что сечения (p,n) реакций меньше, чем у $(p,2n)$ в силу кулоновского барьера.» (стр. 19 автореферата и стр. 95 диссертации). Кулоновский барьер препятствует сближению заряженных частиц (протонов) с ядром во входном канале, однако он одинаков для обеих реакций и не влияет на испускание незаряженных нейтронов. Кроме того, утверждение, что сечения (p,n) реакций всегда меньше, чем у $(p,2n)$, тоже не является однозначным. Поскольку при энергии налетающих протонов ~ 10 МэВ канал $(p,2n)$ ещё не открыт, сечение (p,n) может быть больше.

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 1.3.21. Медицинская физика (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.

Таким образом, соискатель Хоменко Ирина Анатольевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.21. Медицинская физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник кафедры физики
ускорителей и радиационной медицины физического факультета
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

ЖЕЛТОНОЖСКАЯ Марина Викторовна

4.09

2026 г.

Контактные данные:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

1.5.1. Радиобиология

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, с2
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», физический факультет

Подпись сотрудника МГУ имени М.В. Ломоносова
М.В. Желтоножской удостоверяю:
руководитель/кадровый работник

(дата)

08.09.2026