

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

Актуальность избранной темы

Диссертационная работа Ирины Анатольевны Хоменко посвящена актуальной проблеме – разработке физико-технологических основ производства новых радионуклидов для ядерной медицины. Следует подчеркнуть, что относительно недавно возникший интерес к изотопам лантана ^{133}La и ^{135}La обусловлен их уникальными свойствами: ^{133}La является позитронным излучателем, пригодным для ПЭТ-диагностики, а ^{135}La – Оже-эмиттером, перспективным для терапии злокачественных микрообразований. Кроме этого, постольку лантан является химическим аналогом актиния-225, применяемого для альфа-терапии, то его изотопы могут служить диагностическим компонентом в столь перспективной тераностике. До настоящего времени экспериментальные данные по сечениям реакций получения этих изотопов в диапазонах энергий, доступных на медицинских циклотронах, были фрагментарными или вообще отсутствовали. Представленная работа восполняет этот пробел, являясь актуальной как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Содержательная характеристика диссертации

Диссертационная работа представлена на 113 страницах, состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 104 наименований, содержит 58 рисунков и 17 таблиц. Основные результаты диссертации полностью отражены в публикациях автора. Автореферат адекватно отражает основное содержание и структуру диссертационного исследования.

Во введении сформулированы цели, задачи, научная новизна и защищаемые положения. Актуальность работы убедительно обоснована клинической потребностью в новых радионуклидах для тераностики и недостатком ядерно-физических данных, необходимых для организации их производства.

В главе 1 подробно сформулированы требования к радионуклидам для диагностики и терапии, описываются способы их получения, методы ОФЭКТ и ПЭТ, разъяснены особенности и преимущества альфа- и Оже-терапии. Особое значение имеет раздел 1.8, посвящённый свойствам и перспективам использования изотопов лантана и церия в медицине.

В главе 2 детально описываются экспериментальные методы диссертационной работы: методы стопки фольг, мониторинговых реакций, гамма-спектрометрии, хроматографического разделения, измерения сечений реакций и выходов изотопов. Благодаря подробному описанию процедур изготовления тонких мишеней методом седиментации, сборки мишенной конструкции, обработки спектров и методики хроматографического разделения обеспечена возможность воспроизводства полученных результатов другими авторами.

Центральное место в диссертации занимает глава 3. В ней представлены важнейшие экспериментальные результаты по четырём обширным группам ядерных реакций, инициированных альфа-частицами и протонами на мишенях из бария и цезия. Впечатляет объем проделанной автором диссертации работы: было проведено пять экспериментов по облучению мишеней из карбоната бария и один эксперимент по облучению мишеней из цезия. При этом для каждого эксперимента мишени готовились индивидуально, и отличались составом материала и толщинами слоёв.

В разделе 3.1, посвящённом реакциям $^{nat}\text{Ba}(\alpha, x)$, впервые получены сечения образования ^{135}La и ряда изотопов церия и бария в диапазоне энергий до 60 МэВ. Показано, что выход ^{135}La составляет 2,4 МБк/(мкА·ч), но примесь ^{140}La достигает 13%. Ценным результатом является демонстрация

возможности получения дополнительного ^{135}La , свободного от ^{140}La , при распаде ^{135}Ce в количестве 2,2 МБк/(мкА·ч) через сутки.

В разделе 3.2 исследованы реакции $^{133}\text{Cs}(\alpha, x)$. Показано, что выход ^{133}La достигает 432,8 МБк/(мкА·ч), но образуются примеси ^{132}La и ^{135}La .

Раздел 3.3 посвящён реакциям $^{135}\text{Ba}(p, x)$. Впервые экспериментально определены сечения реакций $^{135}\text{Ba}(p, x)^{133,135}\text{La}$. Показано, что реакция $^{135}\text{Ba}(p, 3n)^{133}\text{La}$ обеспечивает выход 3,3 ГБк/(мкА·ч). Это позволяет нарабатывать до 55,5 ГБк ^{133}La за 2 часа при токе 10 мкА с содержанием примесей 2%, что удовлетворяет требованиям к изотопам для ПЭТ-диагностики.

В разделе 3.4 исследованы реакции $^{136}\text{Ba}(p, x)$. Ключевой результат – выход ^{135}La по реакции $^{136}\text{Ba}(p, 2n)$ составляет 907 МБк/(мкА·ч) на металлической мишени, что в 16 раз больше чем в реакции $^{135}\text{Ba}(p, n)$. При облучении карбоната ^{136}Ba в течение 20 часов при токе 1 мкА можно получить 7,4 ГБк ^{135}La с чистотой >99% через час охлаждения. Это убедительно показывает, что реакция $^{136}\text{Ba}(p, 2n)$ оптимальна для получения ^{135}La для Оже-электронной терапии.

В разделах 3.5 и 3.6 оцениваются перспективы наработки ^{133}La и ^{135}La , соответственно, с учётом требований к величинам активности аналогичных медицинским изотопов. Эти оценки имеют большое практическое значение для перехода к клиническому применению $^{133,135}\text{La}$.

В разделе 3.7 представлена разработка метода экстракционно-хроматографического разделения La и Ba на сорбенте TRU Resin.

В заключении чётко сформулированы основные результаты и выводы, которые полностью соответствуют поставленным задачам и защищаемым положениям. Автор показывает, что в работе заложены физико-технологические основы для производства ^{133}La и ^{135}La с характеристиками, достаточными для их применения в составе радиофармпрепаратов для ПЭТ-диагностики и Оже-электронной терапии.

Достоверность и научная новизна

Впервые выполнено систематическое экспериментальное исследование четырёх различных реакций для получения ^{133}La и ^{135}La , что позволило объективно сравнить их эффективность. Работа выполнена на высоком методическом уровне и демонстрирует высокий уровень экспериментальных навыков автора. Достоверность результатов обеспечена использованием общепринятых и апробированных методик: активационный метод, метод стопки фольг, мониторинговые реакции (рекомендованные МАГАТЭ), гамма-спектрометрия с калибровкой по ОСГИ.

Учёт погрешностей и многократное проведение измерений каждого образца подтверждают надёжность данных. Полученные результаты опубликованы в трёх статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в Scopus и WoS, а также представлены на семи международных и российских конференциях. Измеренные величины сечений $^{135}\text{Ba}(p,n)^{135}\text{La}$ и $^{136}\text{Ba}(p,2n)^{135}\text{La}$ полностью согласуются с измеренными в свежей работе Gaia Dellepiane et al., App.Rad.Isotop. 236 (2026) 112727. Признание результатов научным сообществом подтверждается также включением результатов измерений в международную базу EXFOR.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Все четыре положения, выносимые на защиту, имеют прочное экспериментальное обоснование. Первое положение (получение новых фундаментальных ядерных данных и установление оптимальных условий наработки) базируется на результатах, представленных в главе 3. Хоменко И.А. измерены сечения реакций, ранее не изученных экспериментально, и на их основе рассчитаны выходы, что позволяет объективно оценить перспективность каждой реакции для медицинского применения. Сравнение с теоретическими данными TENDL, хотя и выявляет расхождения для метастабильных состояний, подтверждает надёжность

основных результатов. Второе положение (хроматографическое выделение лантана с высокой чистотой) подтверждено экспериментальными данными раздела 3.7, где показано эффективное отделение лантана от бария (более 98%). Третье положение (пригодность реакции $^{135}\text{Ba}(p,3n)^{133}\text{La}$) обосновано экспериментальными сечениями, измеренными впервые, и расчётами выходов, показывающими возможность наработки до 55,5 ГБк ^{133}La с содержанием примесей 2%, что достаточно для диагностических применений. Четвёртое положение (два альтернативных способа получения ^{135}La) опирается на сравнение выходов реакций $^{135}\text{Ba}(p,n)$ и $^{136}\text{Ba}(p,2n)$, показавшее 16-кратное преимущество последней, а также на расчёты, демонстрирующие получение 7,4 ГБк ^{135}La с чистотой >99% через 1 час охлаждения.

Ключевым достоинством работы является практическая ориентированность: все предложенные методы получения ^{135}La используют энергии протонов до 30 МэВ, которые доступны на большинстве медицинских циклотронов. Ирина Анатольевна подошла к вопросу комплексно: не только измерены сечения, но и выполнены расчёты выходов для реальных условий (карбонатные мишени, учёт примесей), а также проведено химическое разделение, т.е. рассмотрен полный цикл от облучения до очистки. Предложены и экспериментально обоснованы режимы облучения и методика хроматографического разделения, которые могут быть непосредственно внедрены в практику медицинских циклотронных центров.

При общей положительной оценке диссертации следует отметить следующие замечания и недостатки:

1. Диссертация несколько перегружена обзором литературы, который правильнее было бы назвать общим введением. В нем, на стр. 12 – 34 диссертации, представлены общие фундаментальные положения ядерной медицины, физики ускорителей, рассмотрены изотопы, уже прочно

вошедшие в медицинскую практику. Эта часть может послужить учебником по ядерной медицине, производству изотопов, она несёт скорее образовательный, чем научный заряд.

2. Впрочем, уже со страницы 34 разделом «1.8 Лантан и церий – перспективы использования» начинается собственно столь необходимое для диссертации введение в предмет исследования. Хотя ему отведено всего пять с половиной страниц, автору всё же удалось отметить основные работы, ставшие фундаментом для динамично развивающейся, захватывающей научной истории ^{133}La и ^{135}La .

3. Вместе с тем, не удостоена вниманием работа E.P. Abel et al., “Half-lives of ^{132}La and ^{135}La ,” Phys. Rev. C 97 (2018) . 034312. Много лет до её появления периоды полураспада изотопов лантана основывались на старых, менее точных измерениях, согласно которым период полураспада для ^{132}La составлял 4,8 ч, а для ^{135}La – 19,5 ч. E.P. Abel с соавторами точно измерили периоды полураспада $^{132,135}\text{La}$ используя гамма-спектроскопию и ионизационную камеру: для ^{132}La – 4,59 ч, а для ^{135}La 18,91 ч. Эти данные критически важны для дозиметрических расчётов, являются современным стандартом для данных изотопов. В статье также прямо указывалось, что эти изотопы лантана «представляют собой медицински интересную систему с позитронным излучателем ^{132}La и оже-электронным излучателем ^{135}La , образующими тераностическую пару».

4. Определение на стр. 13 нуждается в уточнении формулировки. Вместо «Частицы с высокой ЛПЭ испускают высокоионизирующее излучение, которое рассеивается в ткани очень быстро; частицы с низкой ЛПЭ теряют свою энергию медленно...» следовало бы написать: «Частицы с высокой ЛПЭ теряют свою энергию в тканях уже на коротких длинах пробега благодаря интенсивной ионизации атомов вещества, в противоположность частицам с низкой ЛПЭ...».

5. В работе представлена методика расчёта погрешностей измерений величин сечений, стр. 53 уравнение (15). Однако они измерены при разных

значениях энергий альфа-частиц и протонов, которые тоже неизбежно имеют погрешности измерений. Эти погрешности в величинах энергии даны в таблицах, однако в работе не раскрыт метод их оценки. Понятно, что такие погрешности растут с ростом глубины проникновения альфа-частиц и протонов в мишень, поэтому они больше вблизи порога реакций. Пояснения об этом были бы весьма желательны.

6. К сожалению, в диссертации не нашлось места оценке роли и вклада вторичных реакций, происходящих под действием нуклонов от фрагментации альфа-частиц в мишени. Даже простые оценки ядерной длины для них могли бы дать понимание о величине систематических погрешностей, связанных с измерением первичных ядерных реакций. Возможно, что именно это в какой-то степени сможет объяснить в целом более заметные расхождения (в сравнении с реакциями на протонах) измеренных сечений реакций на пучках альфа-частиц с соответствующими сечениями TENDL, которые заведомо даны только для первичных реакций.

Указанные замечания несколько не умаляют значимости диссертационного исследования, не влияют на достоверность основных результатов автора, не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы. 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 учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории релятивистской ядерной физики
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

ПШЕНИЧНОВ Игорь Анатольевич

13 августа 2026 г.

Контактные данные:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:

108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, вл. 27

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Отдел
экспериментальной физики, Лаборатория релятивистской ядерной физики

Подпись сотрудника ИЯИ РАН
И.А. Пшеничнова удостоверяю:

Заместитель директора
по научной работе
кандидат физ.-мат. наук

ПАНИН Александр Григорьевич