Заключение диссертационного совета МГУ.011.9.

по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

Решение диссертационного совета от «17» сентября 2026 г. №16

О присуждении Хоменко Ирине Анатольевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Новые методы получения медицинских радиоизотопов лантана» по специальности 1.3.21. Медицинская физика (физико-математические науки) принята к защите диссертационным советом МГУ.011.9., 30 июня 2026 г., протокол № 14.

Соискатель Хоменко Ирина Анатольевна, 1998 года рождения, с 01.10.2021 г. по 30.09.2025 г. успешно освоила программу подготовки в аспирантуре Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия».

Хоменко Ирина Анатольевна работает младшим научным сотрудником в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» в Курчатовском комплексе НБИКС-природоподобных технологий, лаборатории радионуклидов и радиофармпрепаратов.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» в Курчатовском комплексе НБИКС-природоподобных технологий.

Научный руководитель – доктор химических наук, начальник лаборатории радионуклидов и радиофармпрепаратов Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Алиев Рамиз Автандилович;

Официальные оппоненты:

- Пшеничнов Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, Институт ядерных исследований РАН, Отдел экспериментальной физики, лаборатория релятивистской ядерной физики, ведущий научный сотрудник;
- Желтоножская Марина Викторовна, доктор физико-математических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины, старший научный сотрудник;

- Красикова Раиса Николаевна, кандидат химических наук, Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, лаборатория направленной внутримозговой доставки препаратов, ведущий научный сотрудник;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов обусловлен их высокой научной квалификацией и признанной компетентностью в областях ядерной физики, медицинской физики, физики ядерных реакций, производства медицинских радионуклидов и радиохимии. Научные интересы И.А. Пшеничнова связаны с исследованием ядерных и фотоядерных реакций, моделированием прохождения частиц через вещество и применением ионизирующих излучений в медицине; М.В. Желтоножской – с физикой ускорителей, радиационной медициной и разработкой методов получения радионуклидов для ядерной медицины; Р.Н. Красиковой – с радиохимией, разработкой и синтезом радиофармацевтических препаратов, в том числе для позитронно-эмиссионной томографии. Компетенции официальных оппонентов непосредственно соответствуют тематике диссертационной работы, посвящённой экспериментальному исследованию ядерных реакций, разработке методов циклотронного получения медицинских радиоизотопов лантана и их радиохимического выделения из облучённых мишеней. Официальные оппоненты являются авторами значительного числа научных публикаций в ведущих отечественных и международных изданиях, хорошо известных специалистам в соответствующих областях. Совместные научные проекты и публикации с соискателем у официальных оппонентов отсутствуют.

Соискатель имеет 3 опубликованные работы по тематике диссертационного исследования в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.21 «Медицинская физика».

[A1]. Khomenko I.A., Kormazeva E.S., Bogomolova T.V., Furkina E.B., Novikov V.I., Aliev R.A. Proton-induced nuclear reactions on barium-136 for the production of the medically relevant radionuclide lanthanum-135 // European Physical Journal Plus. – 2024. – Vol. 139. – № 12. – P. 1121. EDN: EYMUQR. Импакт-фактор: 0,426 (SJR); Объем/вклад соискателя: 0,625 п.л./0,55 п.л.

[A2]. Хоменко И.А., Кормазева Е.С, Новиков В.И., Алиев Р.А. Измерение сечений образования радиоизотопов лантана при взаимодействии протонов с энергией до 30 МэВ с ядрами Ba-135 // Краткие сообщения по физике ФИАН. –2024. – Т. 51. – №12. – С. 35-39. EDN: QESTDV. Импакт-фактор: 0,444 (РИНЦ); Объем/вклад соискателя: 0,3125 п.л./0,28 п.л.

Переводная версия статьи:

Khomenko I.A., Kormazeva E.S., Novikov V.I., Aliev R.A. Measurement of the Cross-Sections for the Formation of Lanthanum Radioisotopes in Proton Induced Reactions on Ba-135 Nuclei up to 30 MeV // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2024. – Vol. 51. – № 12. – P. 515-518. EDN: TVVAQC.

[А3]. Khomenko I.A., Kormazeva E.S., Unezhev V.N., Aliev R.A. Excitation functions of alpha particle induced nuclear reactions on natBa up to 60 MeV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2023. – Vol. 535. – P. 47-54. EDN: SPLEQG. Импакт-фактор: 0,369 (SJR); Объем/вклад соискателя: 0,5 п.л./0,4 п.л.

На диссертацию и автореферат поступило 3 дополнительных отзыва, все положительные.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация Хоменко Ирины Анатольевны на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.21 «Медицинская физика» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная научная задача – создана физико-технологическая основа для производства перспективных медицинских радиоизотопов лантана ^{133}La и ^{135}La, включающая экспериментальное определение сечений ядерных реакций, выбор оптимальных режимов облучения мишеней и разработку метода радиохимического выделения целевых радионуклидов.

В диссертационной работе экспериментально исследованы реакции, протекающие при облучении бария природного изотопного состава и ^{133}Cs альфа-частицами с энергиями до 60 МэВ, а также мишеней, обогащённых изотопами ^{135}Ba и ^{136}Ba, протонами с энергиями до 30 МэВ. Для проведения исследований использованы активационный анализ, метод стопки фольг, метод мониторных реакций и гамма-спектрометрия высокого разрешения. Полученные экспериментальные сечения сопоставлены с результатами расчётов по библиотеке TENDL на основе программного кода TALYS. Впервые определены сечения ряда реакций образования радиоизотопов лантана, бария, церия и цезия; расширен энергетический диапазон экспериментальных данных для реакций на ^{133}Cs. Полученные результаты внесены в международную базу экспериментальных ядерных данных EXFOR.

На основании измеренных сечений рассчитаны выходы целевых радионуклидов и содержание радиоизотопных примесей, что позволило определить оптимальные реакции и энергетические интервалы для получения ^{133}La и ^{135}La. Экспериментально обосновано получение позитрон-излучающего ^{133}La по реакции ^{135}Ba(p,3n)^{133}La при

энергии протонов до 30 МэВ. Для энергетического интервала 29,8–19,8 МэВ рассчитанный выход на толстой мишени составил 3,3 ГБк/(мкА·ч). Показано, что при облучении в течение двух часов при токе 10 мкА может быть получено до 55,5 ГБк ^{133}La при содержании радиоизотопных примесей около 2 % на момент окончания облучения. Полученная активность достаточна для проведения диагностических исследований методом позитронно-эмиссионной томографии.

Для получения Оже-эмиттера ^{135}La исследованы реакции на ядрах бария при облучении протонами и альфа-частицами. Установлено, что протонные реакции обеспечивают существенно более высокие выходы ^{135}La. Для реакции ^{136}Ba(p,2n)^{135}La в энергетическом диапазоне 29,3–14,0 МэВ рассчитанный выход на толстой мишени составил 907 МБк/(мкА·ч). Показано, что реакция ^{135}Ba(p,n)^{135}La может быть реализована на медицинских циклотронах с энергией протонов до 20 МэВ, а реакция ^{136}Ba(p,2n)^{135}La – на циклотронах с энергией до 30 МэВ. Предложенные варианты позволяют получать активность ^{135}La, достаточную для клинического применения, при приемлемом содержании радиоизотопных примесей.

Разработана и экспериментально апробирована методика экстракционно-хроматографического выделения радиоизотопов лантана из облучённых бариевых мишеней с использованием сорбента TRU Resin. Показано, что более 98 % радиоизотопа бария удаляется в первых 4 мл элюата, а в последующей фракции объёмом 5 мл собирается 82,7 % ^{135}La. Полученный продукт обладает химической чистотой, необходимой для последующего синтеза радиофармацевтических препаратов. Разработанная методика может быть масштабирована для производства медицинских радионуклидов.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых экспериментальных данных о сечениях ядерных реакций, вызванных протонами и альфа-частицами, и в расширении возможностей проверки и уточнения теоретических моделей ядерных реакций. Практическая значимость определяется разработкой реализуемых на циклотронах методов производства ^{133}La и ^{135}La с активностью и чистотой, необходимыми для дальнейшего медицинского применения. Полученные результаты создают основу для разработки радиофармацевтических препаратов на основе ^{133}La для ПЭТ-диагностики и ^{135}La для таргетной Оже-электронной терапии, а также для применения радиоизотопов лантана в тераностических подходах и персонализированном лечении онкологических заболеваний.

Результаты работы включают:

1. В рамках экспериментального исследования впервые получены сечения ядерных реакций образования радиоизотопов лантана, бария и церия в реакциях natBa(α,x), ^{133}Cs(α,x), ^{135}Ba(p,x) и ^{136}Ba(p,x) в широком диапазоне энергий: до 30 МэВ для протонов и до 60 МэВ для альфа-частиц. Полученные данные внесены в международную базу экспериментальных ядерных данных EXFOR и позволили обосновать оптимальные режимы облучения для получения ^{133}La и ^{135}La с минимальным содержанием радиоизотопных примесей, что имеет принципиальное значение для медицинского применения этих радионуклидов.
2. Установлено, что облучение протонами обеспечивает существенно больший выход ^{135}La по сравнению с облучением альфа-частицами. Определённые в работе оптимальные параметры облучения достижимы на медицинских циклотронах. При использовании предложенных энергетических диапазонов реакции на мишенях из $^{135}BaCO_3$ и $^{136}BaCO_3$ позволяют получать ^{135}La с приемлемым для медицинского применения содержанием радиоизотопных примесей.
3. Показано, что получение позитрон-излучающего ^{133}La по реакции ^{135}Ba(p,3n)^{133}La с использованием протонов с энергией до 30 МэВ является наиболее эффективным из исследованных способов производства данного радионуклида. При облучении в энергетическом диапазоне 29,8–19,8 МэВ в течение 2 часов при токе 10 мкА может быть получено до 55,5 ГБк ^{133}La при содержании радиоизотопных примесей около 2 % на момент окончания облучения, что соответствует требованиям к радионуклидам диагностического назначения.
4. Разработана методика получения и экстракционно-хроматографического выделения радиоизотопов лантана, позволяющая получать целевой радионуклид в количестве и с химической чистотой, достаточными для дальнейшего синтеза радиофармацевтических препаратов и проведения клинических исследований. Предложенная методика создаёт физико-химическую основу для производства радиофармацевтических препаратов на основе лантана и может быть масштабирована для промышленного получения медицинских радионуклидов.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. На основе экспериментально измеренных сечений ядерных реакций ^{135}Ba(p,x), ^{136}Ba(p,x), ^{133}Cs(α,x), ^{nat}Ba(α,x) получены новые фундаментальные ядерные данные и установлены оптимальные условия наработки ^{133}La и ^{135}La для медицины.

2. Радиоизотопы лантана, полученные в результате облучения ^{136}Ba протонами, выделены путем экстракционной хроматографии с помощью сорбента TRU Resin с высокой химической чистотой, пригодной для дальнейшего синтеза радиофармпрепаратов.
3. Реакция ^{135}Ba(p,3n) с использованием протонов с энергией до 30 МэВ экспериментально обоснована как пригодная для получения позитрон-излучающего ^{133}La в количестве, достаточном для клинических исследований, и с приемлемым количеством примесей, не превышающим допустимые пределы для радиофармпрепаратов диагностического назначения.
4. Реакция ^{135}Ba(p,n) на циклотронах с энергией до 20 МэВ и реакция ^{136}Ba(p,2n) на циклотронах с энергией до 30 МэВ применимы как два альтернативных способа получения Оже-эмиттера ^{135}La в количестве, достаточном для клинического использования, и с необходимой чистотой в составе радиофармпрепарата.

На заседании 17 сентября 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Хоменко Ирине Анатольевне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 7 докторов наук по специальности «Медицинская физика», участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета МГУ.011.9,
д.ф.-м.н., акад. РАН Шкуринов А. П.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.011.9,
к.ф.-м.н. Осминкина Л. А.

17 сентября 2026 г.