

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.Г. ХЛОПИНА»
(АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»)**

УТВЕРЖДАЮ

ВРИО генерального директора
(должность)

Русских И.М.
(Ф.И.О.)

(подпись руководителя организации)

2022 г.



ОТЗЫВ

**ведущей организации Акционерного общества «Радиевый институт
имени В.Г. Хлопина»**

на диссертационную работу Рахимова Алимардона Восибовича
«Радиохимические аспекты получения высокодисперсного селена-82 с низким
содержанием радиоактивных примесей и анализ материалов для низкофоновых
исследований», представленную на соискание ученой степени кандидата химических
наук по специальности 1.4.13 (02.00.14) – Радиохимия

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа Рахимова Алимардона Восибовича посвящена получению и анализу веществ, используемых в качестве источника двойного бета-распада, а также материала нейтронной защиты при поиске частиц темной материи. Эти вещества должны отличаться ультрамалым содержанием радиоактивных примесей, поскольку снижение фона при поиске редких процессов является ключевым фактором успеха экспериментов. После открытия нейтринных осцилляций, подтвердивших ненулевую массу нейтрино, поиск безнейтринной моды двойного бета-распада ($0\nu 2\beta$) приобрел особую актуальность для фундаментальной физики, поскольку позволяет экспериментально определить природу нейтрино (майорановская или дираковская). Если $0\nu 2\beta$ мода распада возможна, то нейтрино – майорановская частица, это означает, нейтрино тождественно своей собственной античастице. Поиск $0\nu 2\beta$ моды распада позволяет

экспериментально оценить границы «Стандартной модели», которая является основополагающей в современной физике и объясняет поведение большинства элементарных частиц.

Относительно большая энергия радиоактивного распада ^{82}Se ($E_{2\beta} = 2995$ кэВ) делает его одним из лучших кандидатов для поиска $0\nu 2\beta$ моды распада, в частности, в международном низкофоновом эксперименте SuperNEMO. В эксперименте SuperNEMO-Демонстратор (первый модуль SuperNEMO) в качестве объектов исследования используются тонкие фольги из изотопно-обогащенного ^{82}Se . Для успеха эксперимента SuperNEMO необходимы килограммовые количества изотопно-обогащенного ^{82}Se с ультранизким содержанием радиоактивных примесей калия (^{40}K), радия (^{226}Ra), актиния (^{227}Ac), тория (^{232}Th) и урана (^{238}U). Наличие ^{232}Th (^{208}Tl) и ^{226}Ra (^{214}Bi) в фольгах может критично увеличивать фон, поэтому их содержание должно быть на уровне мБк/кг. Изотопно-обогащенный ^{82}Se , как показали измерения в предыдущем эксперименте NEMO-3, содержал радиоактивные примеси на уровне мБк/кг. Это диктует необходимость развития новых и высокоэффективных методов не только для очистки селена, но и всех этапов получения фольг изотопно-обогащенного ^{82}Se с уровнем радиоактивных примесей тория и радия порядка мБк/кг, а по другим примесям (актиний, уран, калий, техногенные радионуклиды) по крайней мере уровня мБк/кг. Это также подразумевает определение содержания примесей на подобном уникальном уровне.

В международном низкофоновом эксперименте EDELWEISS по поиску темной материи наиболее критичным является нейтронный фон, возникающий в процессах деления и в реакциях с альфа-частицами. В этом случае необходим тщательный отбор материалов с низким уровнем радиоактивных примесей, прежде всего Th и U, что также предполагает отработку и развитие аналитических методов их определения в полиэтилене нейтронной защиты низкофоновой установки.

Целями диссертационной работы являются получение высокодисперсного, очищенного и кондиционированного изотопно-обогащенного селена-82 с низким содержанием радиоактивных примесей для приготовления фольг, которые используются на установке SuperNEMO-Демонстратор (первый модуль), а также определение содержания природных радионуклидов ^{232}Th и ^{238}U в полиэтилене, используемом в качестве нейтронной защиты установки EDELWEISS.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан способ реверсной катионообменной хроматографической очистки селена от примесных радионуклидов при их вымывании в направлении обратном элюированию продукта;

- разработан метод получения (хроматография, восстановление селенистой кислоты с помощью диоксида серы, центрифугирование, гомогенизация, промывка и вакуумная сушка) высокодисперсной формы элементного ^{82}Se , обеспечивающий минимизацию непосредственного контакта селеносодержащих фаз с атмосферой и поверхностями реакционных и технологических сосудов. Измерения на ViPo-3 спектрометре фольг, приготовленных из полученного селена, показали их уникально

высокую чистоту по ^{232}Th (22-150 мкБк/кг) и ^{226}Ra (< 600 мкБк/кг), которая ранее для высокодисперсного элементного селена не была достигнута;

- разработана оригинальная методика выделения широкого спектра радионуклидов, образующихся при облучении тория протонами, с помощью анионообменной колонки со смолой AG-1×8 (100-200 меш) с последующим их разделением на катионообменной колонке со смолой AG-50×8 (- 400 меш);

- впервые определены коэффициенты распределения Th, U, Ra, Ac, ряда техногенных радионуклидов, таких как цезия (аналог калия), кобальта и редкоземельных элементов (Y, Ce, Pm, Tm, Yb, Lu) на катионообменной смоле Dowex 50W×8 (200-400 меш) в растворах селенистой кислоты в диапазоне концентраций 0,5-4 моль/л.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что разработанный способ реверсной катионообменной хроматографической очистки селена от примесных радионуклидов удовлетворяет требованиям низкофоновых экспериментов и может быть использован для эффективной очистки и других веществ, таких как Ge-76, Te-130, используемых в подобных экспериментах; приготовлены фольги из очищенного и кондиционированного 2,5 кг селена-82, которые были установлены в установке «SuperNEMO-Демонстратор» для поиска $0\nu 2\beta$ -распада. Полученные сведения по содержанию тория-232 и урана-238 в образцах полиэтилена позволили уточнить модель фона установки EDELWEISS-3.

Структура и объем диссертационной работы: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы (182 наименования). Полный объем диссертации составляет 126 страниц, в том числе 26 таблицы и 33 рисунка. Все главы диссертации написаны логично, а полученные результаты имеют обоснованную интерпретацию.

Во **введении** отражены актуальность исследований, их научная новизна и практическая значимость, сформулирована цель работы и очерчен круг задач, которые необходимо было решить для достижения поставленных целей.

В **первой главе** представлен обзор литературы, посвященный источникам фона при проведении ядерно-физических низкофоновых экспериментов, дан краткий обзор экспериментов NEMO-3/SuperNEMO и EDELWEISS. Обсужден метод радиоактивных индикаторов, основные моменты для разработки методики очистки селена, а также методики выделения радионуклидов из мишени тория, облученного протонами. Приведены сведения о химических и физико-химических свойствах селена и его соединений, а также методов его получения и анализа.

Во **второй главе** описаны методики получения широкого спектра радионуклидов, в том числе радиоактивных индикаторов ^{223}Ra , ^{225}Ac и ^{230}U из ториевой мишени, а также исследование сорбции ряда элементов на катионообменной смоле в растворах селенистой кислоты.

В **третьей главе** описаны результаты определения содержания примесей в химических реактивах (бидистиллированной воде, азотной кислоте и изопропиловом

спирте) и полимерных материалах: химическая посуда и хроматографическая колонка, полиэтилен нейтронной защиты низкофоновой установки EDEL WEISS.

Четвертая глава посвящена разработке методики очистки, кондиционирования и анализа селена. Очистка и кондиционирование селена состоит из следующих основных процедур: приготовление исходного раствора селенистой кислоты; хроматографическая очистка; восстановление селенистой кислоты до селена с помощью диоксида серы (SO_2); отделение селена от жидкой фазы, промывка водой и спиртом; вакуумная сушка.

Диссертация и автореферат написаны хорошим языком. Автореферат в полной мере отражает цели, задачи, основные положения диссертации, полностью соответствует ей по содержанию и выводам.

О замечаниях по работе:

1. отсутствует обоснование выбора используемых ионообменных смол, а также изопропилового спирта при производстве фольг,

2. в выводах сформулировано, что в результате проведённых работ разработана методика получения ^{223}Ra , ^{225}Ac , ^{230}U , а также широкого круга радионуклидов из облучённой ториевой мишени, основанная на отделении радионуклидов от тория на анионитной колонке со смолой AG-1×8 в азотнокислом растворе с последующим хроматографическим разделением на катионите со смолой AG-50×8. Утверждение о разработке методики представляется не совсем корректным, так как данная технология известна ещё с конца 1960-х гг. В то же время, основным отличием представленной работы является процесс выделения ^{230}U из фракции протактиния ^{230}Pa . Таким образом, целесообразнее было бы написать, что основной особенностью является выделение широкого спектра радионуклидов и, в частности, ^{230}U из фракции протактиния ^{230}Pa , по известной методике.

Указанные замечания не снижают высокую оценку диссертационной работы Рахимова А.В., которая является цельным и законченным исследованием. Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне. Цель работы, поставленная соискателем, успешно достигнута.

Публикации. Материалы диссертационной работы представлены в 11 публикациях, включая 4 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах РИНЦ, WebofScience, Scopus и 2 препринта ОИЯИ.

Апробация. Основные результаты работы были представлены на всероссийских и международных научных конференциях и опубликованы в 5 тезисах докладов в сборниках трудов этих конференций.

Диссертационная работа Рахимова Алимардона Восибовича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи – получение и анализ веществ, характеризующихся ультранизким содержанием радиоактивных примесей, для снижения фона при исследовании редких

процессов, таких, как поиск частиц темной материи, изучение двойного бета-распада ($2\nu 2\beta$), регистрация нейтрино и определение его характеристик (масса и природа), имеющей важное значение для развития радиохимии и ядерной физики.

Тема и содержание диссертационной работы Рахимова А.В. соответствует паспорту специальности 1.4.13 (02.00.14) - «Радиохимия», конкретно следующим областям исследований, предусмотренных паспортом этой специальности: 2. Состояние и распределение радионуклидов в различных фазах. Процессы фазообразования и коллоидообразования. 5. Методы выделения, разделения и очистки радиоактивных элементов и изотопов. Экстракционные, сорбционные, электрохимические, хроматографические процессы разделения в радиохимии. Ядерно-физические методы в радиохимии. 7. Определение радиоактивных элементов и изотопов. Методы радиохимического анализа. Авторадиография. Аналитический контроль радиохимических производств. Радиохимические аспекты радиационной безопасности. 10. Применение радионуклидов в химии и химической технологии. Метод радиоактивных индикаторов. Химические аспекты использования радионуклидов в биологии и медицине.

Диссертационная работа Рахимова Алимардона Восибовича по своей актуальности, новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов соответствует п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 11.09.2021) "О порядке присуждения ученых степеней", а ее автор - **Рахимов Алимардон Восибович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.13 (02.00.14) – Радиохимия.

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании секции радиохимических исследований научно-технического совета АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (протокол № 66 от 27.05.2022).


Смирнов Игорь Валентинович,
учёный секретарь, доктор химических наук (02.00.14 – Радиохимия), старший научный сотрудник
194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр., д.28
E-mail: igor_smirnov@khlopin.ru
Телефон: +7(921)949-43-13

Подпись Смирнова И.В. заверяю:
Лужбин Кирилл Сергеевич
Начальник управления по работе с персоналом
E-mail: ksluzhbin@khlopin.ru
Телефон: +7(812)346-90-29 доб. 4020



Сведения о ведущей организации

*по диссертационной работе Рахимова Алимардона Восибовича
«Радиохимические аспекты получения высокодисперсного селена-82 с низким
содержанием радиоактивных примесей и анализ материалов для
низкофоновых исследований» на соискание ученой степени кандидата
химических наук по специальности 1.4.13 – радиохимия*

Полное наименование организации	Акционерное общество «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина»
Сокращенное наименование организации	АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»
Ведомственная принадлежность	Госкорпорация «Росатом»
Почтовый адрес	194021, Санкт-Петербург, 2 ^й Муринский проспект, д. 28
Телефон	+7(812)346-90-29
Адрес электронной почты	radium@khlopin.ru
Адрес интернет-страницы	www.khlopin.ru
Список публикаций в соответствующей сфере исследований за последние 5 лет в рецензируемых журналах (не более 15)	<p>A novel highly selective ligand for separation of actinides and lanthanides in the nuclear fuel cycle. Experimental verification of theoretical prediction. Lavrov H.V., Ustynyuk N.A., Matveev P.I., Gloriov I.P., Zhokhov S.S., Kalmykov S.N., Ustynyuk Y.A., Alyapyshev M.Y., Tkachenko L.I., VoronaeV I.G., Babain V.A. Dalton Trans.: An International Journal of Inorganic Chemistry. 2017, V.46, №33, pp. 10926-10934</p> <p>Определение концентраций продуктов деления методом АЭС-ИСП в технологических растворах при переработке ОЯТ. Наумова Ю.А., Сапожникова Н.В., Егорова О.Н., Лумпов А.А. Радиохимия. 2017, Т.59, №6, стр. 544-548</p> <p>Various flowsheets of actinides recovery with diamides of heterocyclic dicarboxylic acids. Alyapyshev M.Y., Babain V.A., Tkachenko L.I. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017, V.312, №1, pp. 47-58</p>

Extraction of actinides with heterocyclic dicarboxamides. Alyapyshev M., Babain V., Tkachenko L., Kenf E., Voronaev I., Dar'in D., Matveev P., Petrov V., Kalmykov S., Ustynyuk Y. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2018, V.316, №2, pp. 419-428

Описание экстракции нитратов редкоземельных элементов из слабокислых растворов концентрированными растворами трибутилфосфата. Пузиков Е.А., Зильберман Б.Я., Голецкий Н.Д., Кудинов А.С. Радиохимия. 2019, Т.61, №4, стр. 324-333

Актинидное сжатие в кислородсодержащих соединениях An(VI). Серёжкин В.Н., Савченков А.В., Сидоренко Г.В., Серёжкина Л.Б. Радиохимия. 2019. Т.61, №4, стр. 297-307

Potentiometric multisensory system for tetra- and hexavalent actinide quantification in complex rare earth metal mixtures related to spent nuclear fuel reprocessing. Oleneva E., Savosina J., Agafonova-Moroz M., Lumpov A., Babain V., Legin A., Kirsanov D., Jahatspanian I. Sensors and Actuators B: Chemical. 2019, V.288, pp. 155-162

Microstructure of aged ^{238}Pu -doped Lamonazite ceramic and peculiarities of its X-ray emission spectra. Shiryaev A.A., Egorov A.V., Vlasova I.E., Burakov B.E., Yapaskurt V.O. MRS Advances. 2020, V.5, №1-2, pp. 1-7

Plutonium (IV) quantification in technologically relevant media using potentiometric sensor array. Savosina J., Agafonova-Moroz M., Yaroshenko I., Babain V., Lumpov A., Legin A., Kirsanov D., Ashina J. Sensors. 2020, V.20, №6, pp.1604
Production of the $^{186\text{m}}\text{Re}$ isomer in nuclear reactors. Koltsov V.V. Physics of Atomic Nuclei. 2021, V.84, №11, pp. 1817-1820

Сорбция NdF_3 и ThF_4 из расплава LiF-NaF-KF . Фёдоров Ю.С., Самонин В.В., Зотов А.С., Хрылова Е.Д., Спиридонова Е.А.,

	<p>Мирославов А.Е., Акатов А.А. Радиохимия. 2021, Т.63, №6, стр. 525-532</p> <p>Разделение РЗЭ(III) и Am(III) экстракцией соединениями циркония и дибутилфосфорной кислоты из растворов азотной и соляной кислот. Шишкин Д.Н., Петрова Н.К. Радиохимия. 2021. Т.63, №4, стр. 381-387</p>
--	--

«27» мая 2022 г.

Учёный секретарь



Смирнов И.В.



РАДИЕВЫЙ
ИНСТИТУТ
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «НАУКА И ИННОВАЦИИ»

**Акционерное общество
«Радиевый институт
имени В.Г. Хлопина»
(АО «Радиевый институт
им. В.Г. Хлопина»)**

2-ой Муринский пр., д. 28,
г. Санкт-Петербург, Россия, 194021

Телефон (812) 346-90-29

E-mail: radium@khlopin.ru; office@khlopin.ru

ОКПО 07625447, ОГРН1137847503100

ИНН 7802846922, КПП 780201001

31.05.2022 №217/3-3.4/1851

На № 13110-18-6566 от 29.04.2022

О согласии выступить ведущей
организацией по диссертационной
работе

Глубокоуважаемый Борис Фёдорович!

Акционерное общество «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина» выражает согласие выступить в качестве ведущей организации по диссертационной работе Рахимова Алимардона Восибовича на тему **«Радиохимические аспекты получения высокодисперсного селена-82 с низким содержанием радиоактивных примесей и анализ материалов для низкофоновых исследований»** на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.13. – «Радиохимия» и направляет официальный отзыв и сведения об организации.

Приложения: 1. Отзыв на 5 л. в 2 экз.
2. Сведения о ведущей организации на 3 л. в 1 экз.

Заместитель генерального директора
по науке

Д.В. Рябков

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
СВЕДЕНИЯ О СЕРТИФИКАТЕ ЭП

Сертификат: 030ef99e0 046ae97a 54e84155 04d28ca24

Владелец: Рябков Дмитрий Викторович

Действителен с 24.02.2022 по 24.05.2023

Смирнов Игорь Валентинович
(921)949-43-13