

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата химических наук
Баймухановой Аягоз Елтаевны
на тему: «Подбор пар радионуклидов III – IV валентных элементов для
создания генераторов нового типа»
по специальности 2.6.8. - Технология редких, рассеянных и
радиоактивных элементов**

Актуальность избранной темы. Диссертационная работа Баймухановой А. Е. посвящена решению важной научно-практической проблемы получения радионуклидов для направленной радионуклидной терапии (^{90}Y и ^{225}Ac) и диагностики (^{68}Ga и ^{86}Y) из радионуклидных генераторов и облученных мишеней. Известные методы получения данных радионуклидов не являются оптимальными, прежде всего с точек зрения эффективности методов, минимизации объемов жидких отходов, генераторов, удобных в эксплуатации и подходящих для автоматизации, обеспечения минимального количества стадий, что **подтверждает особую актуальность** разработки методов получения указанных радионуклидов. Достижение поставленных задач позволит оптимизировать и развить методы получения медицинских радионуклидов, а также поспособствует развитию технологий разделения элементов.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- предложен радионуклидный генератор $^{86}\text{Zr} \rightarrow ^{86}\text{Y}$. Разработана методика получения ^{86}Zr по реакции $\text{Y}(p, 4n)$ с протонами в диапазоне энергий 45-70 МэВ;
- предложена схема радионуклидного генератора $^{68}\text{Ge} \rightarrow ^{68}\text{Ga}$, основанная на анионообменной хроматографии в оксалатно-хлористоводородной среде с различными модами элюирования (прямой и реверсной);
- разработана схема выделения изотопов Ge(IV) из мишеней галлия, облученных протонами, на основе экстракции из жидкой мишени с последующей рекстракцией на DGA Resin в среде трихлоруксусной кислоты;
- предложена реверсная схема радионуклидного генератора $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$, основанная на катионообменной хроматографии в среде уксусная кислота – ацетат аммония;
- разработана методика растворения тория в трихлоруксусной кислоте в целях хроматографического выделения Ac(III) и Ra(II) на катионите;

разработана методика выделения изотопов Ac(III) и Ra(II) из облученных протонами мишеней тория с возможностью масштабирования;

- определены коэффициенты распределения Ge(IV), Zr(IV) и Y(III) на катионите Dowex 50×8 и анионите Dowex 1×8 в смесях этандиовой и хлористоводородной кислот; Zr(IV) и Y(III) на экстракционной смоле UTEVA Resin в растворах этандиовой кислоты; Th(IV), Ac(III) и Ra(II), а также Ac(III) и Ra(II) с макроколичеством тория на катионите Dowex 50×8 в среде трихлоруксусной кислоты; Sr(II) и Y(III) на катионите Dowex 50×8 и анионите Dowex 1×8 в растворах уксусной кислоты и смеси уксусной кислоты и ацетата аммония.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Радионуклидные генераторы $^{68}\text{Ge} \rightarrow ^{68}\text{Ga}$, $^{86}\text{Zr} \rightarrow ^{86}\text{Y}$ и $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$ определяют возможность получения медицинских радионуклидов ^{68}Ga , ^{86}Y и ^{90}Y .
- Методика выделения ^{225}Ac из макроколичеств тория позволяет увеличить его наработку за счет использования массивных мишеней тория, а также попутно извлечь радиоизотопы радия.
- Результаты проведенной оценки сорбционного поведения элементов (II, III, IV) на ионообменных и экстракционных смолах в среде карбоновых кислот возможно использовать при разделении элементов в соответствующих отраслях, а также для оценки их химических свойств.

Характеристика основного содержания диссертации

Диссертация включает введение, обзор известных данных по тематике исследований, методическую часть, четыре главы обсуждения полученных результатов, заключение и список цитируемой литературы из 161 наименований. Диссертационная работа изложена на 126 страницах печатного текста, включает 44 рисунка и 16 таблиц.

Во введении представлены актуальность темы диссертационной работы, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, выносимые на защиту положения, а также приведены сведения об апробации результатов работы, авторских публикациях, личном вкладе автора.

Первая глава (Литературный обзор) содержит данные критического анализа литературных источников, посвященные обзору современных направлений в ядерной медицине, методов получения медицинских радионуклидов, их комплексообразованию в карбоновых кислотах и сорбции на ионообменных смолах.

Во второй главе (Методическая часть) представлено обоснование выбора пар радионуклидов для создания радионуклидных генераторов, описана методика определения коэффициентов распределения элементов с радиоактивной меткой.

В третьей главе описано получение радионуклидно чистых препаратов ^{86}Y . Представлены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов распределения циркония и иттрия на ионообменной Dowex 1×8 и экстракционной UTEVA Resin смолах в растворах щавелевой кислоты, а также на ионообменных Dowex 1×8 и Dowex 50×8 в смеси растворов щавелевой и соляной кислот. Полученные данные использовались для разработки радионуклидного генератора $^{86}\text{Zr} \rightarrow ^{86}\text{Y}$. Материнский ^{86}Zr нарабатывали при облучении иттриевых пластинок протонами с энергией 70 МэВ. Разработана методика выделения циркония из облученных мишеней с высокой степенью очистки $7 \cdot 10^6$, основанная на анионообменной и экстракционной хроматографии в азотнокислой и солянокислой средах соответственно. Полученный радиопрепарат ^{86}Zr использовали для 2 генераторов. В основу первой схемы положен метод анионообменной хроматографии с использованием смеси щавелевой и хлороводородной кислот; химический выход ^{86}Y составил $\geq 70\%$, а проскок $^{86}\text{Zr} < 10^{-3} \%$. Вторая схема основана на твердофазной экстракции (ZR Resin) и растворах: 0.1 М HCl с химическим выходом $^{86}\text{Y} \geq 95\%$ и проскоком $^{86}\text{Zr} \leq 10^{-4} \%$; 0.25 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ / ~ 0.14 М CH_3COOH с выходом $^{86}\text{Y} \geq 57 \%$ при проскоке $^{86}\text{Zr} \leq 10^{-4} \%$. Радионуклидная чистота ^{86}Y составила $\geq 99.6 \%$.

Четвертая глава посвящена получению ^{68}Ga с использованием генератора $^{68}\text{Ge} \rightarrow ^{68}\text{Ga}$, а также получению изотопов германия из облученных протонами мишеней галлия. Опробованы 2 варианта выделения германия из макроколичеств галлия: 1) экстракционная (DGA Resin) и катионообменная хроматография в азотнокислой среде; 2) экстракционная хроматография (DGA Resin) в среде трихлоруксусной кислоты. Достигнут выход германия $> 70\%$. Предложен радионуклидный генератор $^{68}\text{Ge} \rightarrow ^{68}\text{Ga}$ с прямым и реверсным типами элюирования, основанный на ионообменной хроматографии и смеси 0.005 М $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ / 0.33 М HCl в качестве элюента. Обе моды элюирования - прямая и реверсная - обеспечивают выход ^{68}Ga 75–80%.

В пятой главе представлены результаты работ по получению радиопрепаратов ^{90}Y с использованием генератора $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$ с реверсной схемой элюирования. Определены коэффициенты распределения иттрия и стронция на ионообменных смолах Dowex 50×8 с уксусной кислотой и смесью

уксусной кислоты и ацетата аммония. По результатам оценки работы генератора показано, что выход ^{90}Y 70%, а проскок $^{90}\text{Sr} < 4 \cdot 10^{-3} \%$.

В шестой главе описана методика получения радиопрепаратов актиния и радия из облученных протонами средних энергий ториевых пластинок. Проведена оценка сорбции тория, актиния и радия на катионообменной смоле в трихлоруксусной кислоте. Разработана методика, основанная на ионообменной и твердофазной экстракционной хроматографии (DGA Resin и SR Resin соответственно). Получены радиопрепараты актиния и радия с выходом $\geq 95\%$. Диссертант отмечает, что использование небольших количеств смол (1 мл катионита на 1 г тория) позволяет масштабировать методику разделения мишеней тория массой до 300 г.

Замечания к диссертации:

1. Данные в разделе 2.1 было целесообразно разместить в Главе 1 непосредственно перед выводами к литобзору, так как обоснование выбора пар радионуклидов для создания генераторов проведено теоретически на основе известных литературных данных. Эти данные отвечают поставленной задаче №1 диссертационной работы.
2. Названия некоторых разделов не отражают решаемые задачи и используемые подходы и методы. Например, раздел 3.2 (Облучение мишеней природного иттрия) было уместнее озаглавить как «Выбор условий получения ^{86}Zr при облучении мишеней природного иттрия протонами с энергией 70 МэВ».
3. В разделах 3.4 и 6.3 приведено описание схемы радионуклидного генератора $^{86}\text{Zr} \rightarrow ^{86}\text{Y}$ и схемы выделения изотопов актиния и радия из облученных мишеней природного тория соответственно. При этом следовало более подробно описать результаты по выбору условий реализации разработанных схем (среды, сорбенты, потоки и прочее).
4. В работе не затрагиваются вопросы доступности коммерческих сорбентов, используемых в разработанных методиках, а также их радиационной устойчивости.
5. Следовало более подробно рассмотреть преимущества разработанной методики получения радиопрепаратов актиния и радия из облученных ториевых пластинок протонами средних энергий в сравнении с другими известными способами (например, в работе [153] Алиев Р.А. и др., Радиохимия. 2014).

6. К автореферату: Ограниченный объем автореферата (16 страниц) представляется неоправданным. Отдельные рисунки оказались плохочитаемыми (например, рисунок 11).

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку данной диссертационной работы, выполненной на высоком научном и экспериментальном уровне.

Достоверность полученных автором результатов подтверждается использованием методик эксперимента, соответствующих современному научному уровню, в том числе методов масс-спектрометрии, ионной хроматографии, бета- и гамма-спектрометрии, воспроизводимостью результатов, а также согласованностью результатов с опубликованными данными, представленными в независимых источниках по близкой тематике. Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

Автореферат диссертации Баймухановой А. Е. полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы представлены в материалах 11 научных конференций и опубликованы в 4 статьях в журналах, в том числе в 3 статьях в журналах, входящих в международные базы данных научного цитирования (Web of Science, Scopus).

По своему содержанию диссертационная работа Баймухановой А. Е. **соответствует паспорту научной специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части направлений исследований 8. Конверсия достижений технологии редких металлов и ядерной технологии, использование опыта эксплуатации типичных для данной отрасли промышленности процессов (сорбция, экстракция, плазменные, пламенные процессы и т.п.) для создания малоотходных, ресурсосберегающих технологических схем других отраслей промышленности.**

Диссертация Баймухановой А. Е. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи по разработке методов получения радионуклидов из радионуклидных генераторов и облученных мишеней, а также способов разделения радионуклидов и выделения микроколичества целевых радионуклидов из макроколичества вещества как основы создания новых эффективных технологий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

По актуальности, новизне, практической значимости диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Баймуханова Аягоз Елтаевна** заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата химических наук по специальности **2.6.8. - Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.**

Официальный оппонент:

доктор химических наук,

главный научный сотрудник Лаборатории радиохимии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Винокуров Сергей Евгеньевич

15.02.2024 г.

Адрес места работы: 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Тел.: +7 (499) 137-41-27; e-mail: vinokurov@geokhi.ru



Винокурова Сергей Евгеньевич
Д. Зверева Г. В.
Ин-т ГЕОХИ РАН

