

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.039.34

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ  
РАДИОИЗОТОПОВ  $^{103}\text{Pd}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  НА ИОНООБМЕННОЙ КОЛОНКЕ С  
АНИОНИТОМ В ХЛОРИДНОЙ ФОРМЕ**

**©2025 г. Т. М. Кузнецова<sup>а</sup>, В. А. Загрядский<sup>а</sup>, К. О. Королев<sup>а\*</sup>,  
А. В. Курочкин<sup>а</sup>, А. Н. Стрепетов<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”*

*Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

*\*e-mail: kirik.korolev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.03.2025 г.

После доработки 26.04.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г.

Описана техника реакторного получения и идентификации радиоизотопа  $^{103}\text{Pd}$ , подобраны условия растворения облученного в реакторе металлического палладия и нанесения его на ионообменную колонку. Получены экспериментальные результаты эффективности смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки с анионом Eicrom 1×8 с размером частиц 200–00 Меш в хлоридной форме для нескольких вариантов его накопления и элюирования. Измерена величина примесной активности  $^{103}\text{Pd}$  в элюате с  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ . Продемонстрирована устойчивость работы ионообменной колонки с повторяющимися условиями смыва и накопления  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в течение примерно месяца ее эксплуатации.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радиоизотоп  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  рассматривается в качестве одного из наименее радиотоксичных и удобных для практического применения эмиттеров конверсионных и оже-электронов, который может быть использован для терапии онкологических заболеваний низкой дозой облучения [1–3]. Радиоизотоп  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  может быть получен генераторным способом. Поэтому исследования, направленные на создание изотопного генератора  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ , представляются актуальными. Предшественниками  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  ( $T_{1/2} = 56.1$  мин) в генераторе могут быть  $^{103}\text{Ru}$  ( $T_{1/2} = 39.247$  дня) или  $^{103}\text{Pd}$  ( $T_{1/2} = 16.991$  дня). У радиоизотопа  $^{103}\text{Pd}$  есть определенные преимущества по сравнению с  $^{103}\text{Ru}$ , и он имеет те же радиологические параметры, что и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ . Поэтому возможный пророскок  $^{103}\text{Pd}$  при элюировании  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки не изменяет радиологических свойств элюата и не создает рисков

дополнительной радиологической нагрузки на пациентов. Известны разные подходы к созданию  $^{103}\text{Pd}/^{103\text{m}}\text{Rh}$ -изотопного генератора [4–6]. В настоящей работе исследуется способ, основанный на сорбции  $^{103}\text{Pd}$  и селективной десорбции дочернего  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки с анионитом Eichrom  $1\times 8$  с размером частиц 200–400 Меш в хлоридной форме.

## 2. ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОИЗОТОПА $^{103}\text{Pd}$

Образец металлического палладия массой 4.6 мг, обогащенный по изотопу  $^{102}\text{Pd}$  до 96.36%, герметично запаивался в кварцевой ампуле диаметром 8 мм и длиной 30 мм. Ампула помещалась в алюминиевый контейнер диаметром 13 мм, который при помощи пневматической почты подавался по горизонтальному экспериментальному каналу в бериллиевый отражатель реактора ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт” [7]. Радиоизотоп  $^{103}\text{Pd}$  нарабатывался в потоке нейтронов по реакции  $^{102}\text{Pd}(n,\gamma)^{103}\text{Pd}$  в течение примерно 100 часов при средней тепловой мощности реактора 5.8 МВт. После облучения алюминиевый контейнер с образцом при помощи пневматической почты извлекался из канала и в транспортном контейнере перевозился в радиохимическую лабораторию для измерения наработанной активности  $^{103}\text{Pd}$  и последующей его радиохимической переработки.

## 3. РАСТВОРЕНИЕ ОБЛУЧЕННОГО НЕЙТРОНАМИ ОБРАЗЦА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПАЛЛАДИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАРАБОТАННОЙ АКТИВНОСТИ $^{103}\text{Pd}$

Кварцевая ампула с порошком металлического палладия после облучения вскрывалась в вытяжном шкафу с помощью бормашины с алмазным диском. Содержимое ампулы помещалось в стеклянный стаканчик (5 мл). Растворение облученного порошка палладия проводилось в 12М-растворе соляной кислоты объемом 1мл при нагревании в течение 10 минут. Для обеспечения полноты растворения в реакционную смесь добавлялось несколько капель концентрированной азотной кислоты. Полученный темно-коричневый раствор выпаривался в том же стаканчике, образовавшийся осадок повторно обрабатывался соляной кислотой концентрацией 1М (0.3–0.5мл). Операция выпаривания-растворения повторялась дважды для удаления иона нитрата. На последнем этапе осадок растворялся в соляной кислоте концентрацией 1М и объемом 1 мл. Для измерения активности  $^{103}\text{Pd}$  из активного раствора объемом 1мл отбиралась проба объемом 25 мкл, и с помощью микропипетки помещалась на тонкую полиэтиленовую пленку, натянутую на алюминиевое кольцо диаметром 16 мм. Затем проба высушивалась в естественных условиях в вытяжном шкафу. После чего проводилось измерение активности  $^{103}\text{Pd}$  в пробе по  $\gamma$ -линии  $E_\gamma = 357.45$  кэВ ( $K_\gamma = 0.0221\%$ ) [8] с помощью гамма-спектрометра фирмы ORTEC GEM 35P4 (США) с детектором из сверхчистого

германия. Энергетическая зависимость эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов детектором определялась экспериментально с помощью комплекта образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ). На рис.1 в качестве иллюстрации приведен фрагмент аппаратного спектра гамма-квантов пробы, измеренный через двое суток после облучения. Используя полученную активность пробы и учитывая соотношение объемов пробы (25мкл) и раствора  $^{103}\text{Pd}$ , нанесенного на ионообменную колонку, определялась полная исходная активность  $^{103}\text{Pd}$ . На дату нанесения  $^{103}\text{Pd}$  на колонку его активность составляла  $2.5 \cdot 10^7$  Бк.

**Рис. 1.** Фрагмент аппаратного гамма-спектра пробы с  $^{103}\text{Pd}$  через два дня после облучения.

#### 4. МЕТОДИКА РАЗДЕЛЕНИЯ $^{103}\text{Pd}$ И $^{103\text{m}}\text{Rh}$ НА ИОНООБМЕННОЙ КОЛОНКЕ С АНИОНИТОМ В ХЛОРИДНОЙ ФОРМЕ

Ионообменная колонка представляла собой стеклянную трубку с внутренним диаметром 6 мм, заполненную смолой Eichrom 1×8 (анионит в хлоридной форме с размером частиц 200–400 Меш). Высота слоя смолы составляла 15 мм, масса в сухом виде равна 0.2 г. Колоночные фильтры изготавливались из кварцевой ваты компании ТПК “Терм” с диаметром волокон 11 мкм. Раствор хлорида палладия в соляной кислоте концентрацией 1М и объемом 1 мл наносился на колонку при помощи перистальтического насоса (LongerPump BQ50 – 1J). Скорость подачи раствора на колонку поддерживалась в пределах от 0.1 до 0.3 мл/мин. На рис. 2 представлена схема, а на рис. 3 фото общего вида ионообменной колонкой с сопутствующей оснасткой.

**Рис. 2.** Схема ионообменной колонки с оснасткой для разделения  $^{103}\text{Pd}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ .

В растворе соляной кислоты концентрацией 1М палладий преимущественно находился в виде анионного хлоридного комплекса  $[\text{PdCl}_4]^{2-}$  и вследствие этого довольно прочно сорбировался на анионите. Окрашенный хлоридный комплекс палладия локализовался в верхней части колонки в виде пятна длиной порядка 10 мм. После нанесения солянокислого раствора палладия колонка промывалась дистиллированной водой до полного вытеснения кислоты из системы. При этом визуального изменения размера пятна или продвижения его по колонке замечено не было.

Разделение  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  и  $^{103}\text{Pd}$  проводилось методом сорбции  $^{103}\text{Pd}$  и последующей селективной десорбции родия с ионообменной колонки. В разбавленных солянокислых растворах родий способен образовывать аквахлорокомплексы с зарядом от  $-2$  до  $+2$ , такие как  $[\text{RhCl}_5(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$ ,  $[\text{RhCl}_4(\text{H}_2\text{O})_2]^{-}$ ,  $[\text{RhCl}_3(\text{H}_2\text{O})_3]^0$ ,  $[\text{RhCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4]^+$ ,  $[\text{RhCl}(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$  [9]. Образовавшийся в результате распада палладия родий, входящий в состав положительных, нейтральных и отрицательных однозарядных комплексов, прочность связи которых на

анионите не столь высока, как у палладия, смывался с анионита как разбавленными солянокислыми растворами, так и дистиллированной водой, оставляя на анионите палладий.

**Рис. 3.** Общий вид ионообменной колонки с оснасткой для разделения  $^{103}\text{Pd}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$

Элюирование  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с колонки осуществлялось после достижения равновесия с материнским  $^{103}\text{Pd}$ . Как правило, элюирование проводилось с суточной периодичностью при помощи перистальтического насоса со скоростью 0.3 мл/мин в полипропиленовые пробирки, собирая по 500 мкл в каждую пробирку. Относительные активности  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в пробирках измерялись в одном и том же фиксированном положении с помощью рентгеновского спектрометра фирмы ORTEC GLP 25325/10 (США) с детектором из сверхчистого германия по суммарному пику полного поглощения неразрешенных линий с  $E_\gamma = 20.074$  кэВ ( $K_\gamma = 2.17\%$ ) и  $E_\gamma = 20.216$  ( $K_\gamma = 4.1\%$ ) кэВ [8]. Эффективность рентгеновского спектрометра определялась экспериментально с помощью набора спектрометрических источников из комплекта ОСГИ. Для исключения влияния самопоглощения мягкого рентгеновского излучения в объеме раствора (500мкл) и в материале пробирки на результаты измерения абсолютной активности  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  применялась та же техника, что и при измерении активности  $^{103}\text{Pd}$ . Из одной из пробирок объемом 500 мкл со смывом  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  отбиралась проба объемом 25 мкл, помещалась с помощью микропипетки на тонкую полиэтиленовую пленку, натянутую на алюминиевое кольцо диаметром 16 мм. Затем проба высушивалась в естественных условиях в вытяжном шкафу. После чего проводилось измерение абсолютной активности в пробе  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  (считая, что поправка на самопоглощение рентгеновского излучения в изготовленной указанным выше способом пробе пренебрежимо мала). По соотношению объемов пробы 25 мкл и пробирки 500 мкл с учетом результатов измерения относительной активности  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в пробирках определялась абсолютная суммарная активность смываемого с колонки  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ . Зная предварительно измеренную активность  $^{103}\text{Pd}$  на колонке, можно рассчитать активность  $^{103}\text{Pd}$  на момент смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ . С учетом того, что  $^{103}\text{Pd}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  на момент смыва находились в равновесии, эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ , накопленного на колонке, определялась как отношение его активности в смыве к расчетной активности  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ , находящегося на колонке в равновесии с  $^{103}\text{Pd}$ . Погрешность определения эффективности смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с колонки не превышала 20 % при доверительной вероятности 68%. Учтенными источниками погрешности являлись погрешности определения эффективности спектрометра, измерения пиков полного поглощения  $\gamma$ -квантов, выходов  $\gamma$ -квантов, измерения объемов элюата в пробах. Ни в одном из приведенных ниже экспериментов элюирования  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки видимого изменения формы или перемещения пятна палладия по сорбционной колонке также замечено не было.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЫВА С КОЛОНКИ $^{103m}\text{Rh}$ ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЮИРОВАНИЯ И УСЛОВИЙ НАКОПЛЕНИЯ $^{103m}\text{Rh}$

Для изучения процесса извлечения  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки были исследованы два разных режима суточного накопления  $^{103m}\text{Rh}$ . Был исследован режим, при котором  $^{103m}\text{Rh}$  накапливался на колонке, заполненной дистиллированной водой и режим, при котором  $^{103m}\text{Rh}$  накапливался на колонке, заполненной 0.1М-раствором соляной кислоты. Исследование указанных режимов важно для выбора в будущем регламента эксплуатации  $^{103}\text{Pd}/^{103m}\text{Rh}$ -изотопного генератора. На рис. 4 приведены кривые зависимости эффективности смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки 0.1М-раствором  $\text{HCl}$  для режимов накопления  $^{103m}\text{Rh}$  в воде и в этом растворе.

**Рис. 4.** Эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  в зависимости от объема элюента, прошедшего через ионообменную колонку...

Из рис. 4 следует, что как для накопления  $^{103m}\text{Rh}$  в воде, так и для накопления в 0.1М-растворе  $\text{HCl}$ , кривые эффективности элюирования  $^{103m}\text{Rh}$  с сорбционной колонки выходят на плато при пропускании через колонку элюента объемом 2 мл. Кроме того, показано, что накопление  $^{103m}\text{Rh}$  в колонке, заполненной водой, обеспечивает примерно в два раза большую эффективность смыва, по сравнению с режимом накопления в 0.1М-растворе соляной кислоты. Снижение эффективности смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки при его накоплении в 0.1М-растворе  $\text{HCl}$  может быть предположительно объяснено изменением равновесного соотношения между аквахлорокомплексами родия в сторону увеличения количества отрицательных двухзарядных комплексов, прочность связи которых на анионите более высокая.

В последующих экспериментах накопление  $^{103m}\text{Rh}$  проводилось в колонках, заполненных водой, а для определения эффективности смыва  $^{103m}\text{Rh}$  ограничивалось пропусканием через колонку элюента объемом 2 мл (примерно 5 колоночных объемов).

На рис. 5 приведен график эффективности смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки в зависимости от pH элюента. В качестве элюентов были использованы дистиллированная вода и солянокислые водные растворы концентрациями 0.01М, 0.1М, 1М при температуре 25 °С. Накопление  $^{103m}\text{Rh}$  проводилось в течение суток в колонке, заполненной водой. Скорость подачи элюентов составляла 0.3 мл/мин. Согласно рис. 5, эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки линейно падает с увеличением pH элюента. Максимальная эффективность смыва 22% получена при элюировании  $^{103m}\text{Rh}$  1М-раствором соляной кислоты.

**Рис. 5.** Эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки в зависимости от pH элюента...

На рис. 6 приведена эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки в зависимости от скорости подачи элюента. В качестве элюента использовался 0.1М-раствор соляной кислоты ( $\text{pH}=0.77$ ) при температуре  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Накопление  $^{103m}\text{Rh}$  проводилось в течение суток в колонке, заполненной водой.

**Рис. 6.** Эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки в зависимости от скорости ...

На рис.7 приведена эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки 0.1М-раствором  $\text{HCl}$  в зависимости от температуры элюента. Накопление  $^{103m}\text{Rh}$  проводилось в течение суток в колонке, заполненной водой. Скорость подачи элюента составляла 0.3 мл/мин.

**Рис. 7.** Эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  с ионообменной колонки ...

На рис. 8 представлена эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  в зависимости от длительности эксплуатации ионообменной колонки (на графике приведены эффективности в экспериментах с идентичными условиями смыва). В этих экспериментах в качестве элюента был использован 0.1М-раствор  $\text{HCl}$ . Накопление  $^{103m}\text{Rh}$  перед элюированием проводили в течение суток на колонке, заполненной водой. Скорость подачи элюента 0.3 мл/мин. За месяц эксплуатации колонки на ней было проведено около десятка экспериментов по элюированию  $^{103m}\text{Rh}$  разными элюентами и с разными условиями его накопления. Всего через колонку было пропущено примерно 100 мл элюента (включая несколько колоночных объемов воды для промывки колонки после каждого эксперимента с элюентами в форме солянокислых растворов).

**Рис. 8.** Эффективность смыва  $^{103m}\text{Rh}$  в зависимости от длительности эксплуатации ионообменной колонки.

Для оценки возможного смыва  $^{103}\text{Pd}$  при элюировании  $^{103m}\text{Rh}$  был измерен уровень примесной активности  $^{103}\text{Pd}$  в элюате с  $^{103m}\text{Rh}$ . Измерения примесной активности  $^{103}\text{Pd}$  в элюате с  $^{103m}\text{Rh}$  проводились после суточной выдержки проб элюата для гарантированного распада  $^{103m}\text{Rh}$ . Для измерения активности  $^{103}\text{Pd}$  в нескольких контрольных пробах элюата использовался рентгеновский спектрометр фирмы ORTEC GLP 25325/10 (США) с детектором из сверхчистого германия. Активность  $^{103}\text{Pd}$  определялась по суммарному пику полного поглощения неразрешенных линий с  $E_\gamma = 20.074\text{ кэВ}$  ( $K_\gamma = 22.4\%$ ) и  $E_\gamma = 20.216\text{ кэВ}$  ( $K_\gamma = 42.5\%$ ) [8].

**Таблица 1.** Относительное содержание примесной активности  $^{103}\text{Pd}$  в смывах с ионообменной колонки  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в зависимости от элюента

Элюент	Отношение активностей $^{103}\text{Pd} / ^{103\text{m}}\text{Rh}$ в смывах с ионообменной колонки, %	
	Температура элюента 25°C	Температура элюента 80°C
1М-раствор HCl	0.0018	–
0.1М-раствор HCl	0.0016	0.002
0.01М-раствор HCl	0.0009	–
Вода	0.0011	–

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты разделения радиоизотопов  $^{103}\text{Pd}$  и дочернего  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ , основанные на сорбции  $^{103}\text{Pd}$  и последующей селективной десорбции  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки с анионитом Eichrom 1×8 в хлоридной форме. Данные результаты могут быть положены в основу создания  $^{103}\text{Pd}/^{103\text{m}}\text{Rh}$ -изотопного генератора.

Получены экспериментальные результаты эффективности смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки для нескольких вариантов накопления и элюирования родия. Показано, что к повышению эффективности смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки приводят уменьшение pH элюента, повышение температуры элюента и снижение скорости элюирования. Установлено, что эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  зависит от среды, в которой происходит его накопления на ионообменной колонке. Показано, что эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  максимальна при его предварительном накоплении в колонке с водой (при прочих равных условиях). Максимальное полученное значение эффективности смыва с колонки  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в проведенных экспериментах составило 26 % (для элюента 0.1М-раствора HCl при температуре 80°C, при скорости подачи элюента 0.3 мл/мин и предварительном суточном накоплении  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  на колонке, заполненной водой). Обнаруженный эффект зависимости эффективности смыва родия с колонки от среды, в которой происходит его накопление, в последующем может быть использован при разработке технологического регламента эксплуатации  $^{103}\text{Pd}/^{103\text{m}}\text{Rh}$ -изотопного генератора. Измерена величина примесной активности  $^{103}\text{Pd}$  в элюате с  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ . Показано, что активность  $^{103}\text{Pd}$  в элюате при элюировании с колонки  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  для диапазона pH элюента от 1 до 4 (0.01–1М) с температурой элюента вплоть до 80°C не превышает 0.002% по отношению к активности  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ . Продемонстрирована устойчивость работы ионообменной колонки. Показано, что эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с колонки с повторяющимися условиями смыва и накопления остается постоянной в течение примерно месяца ее эксплуатации.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

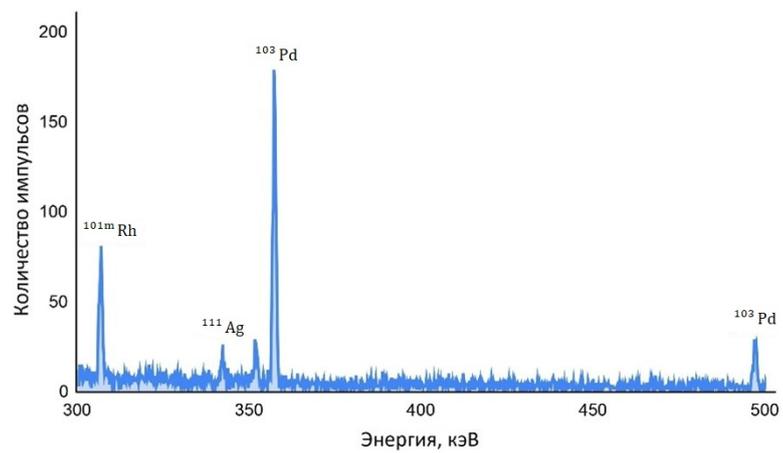
Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

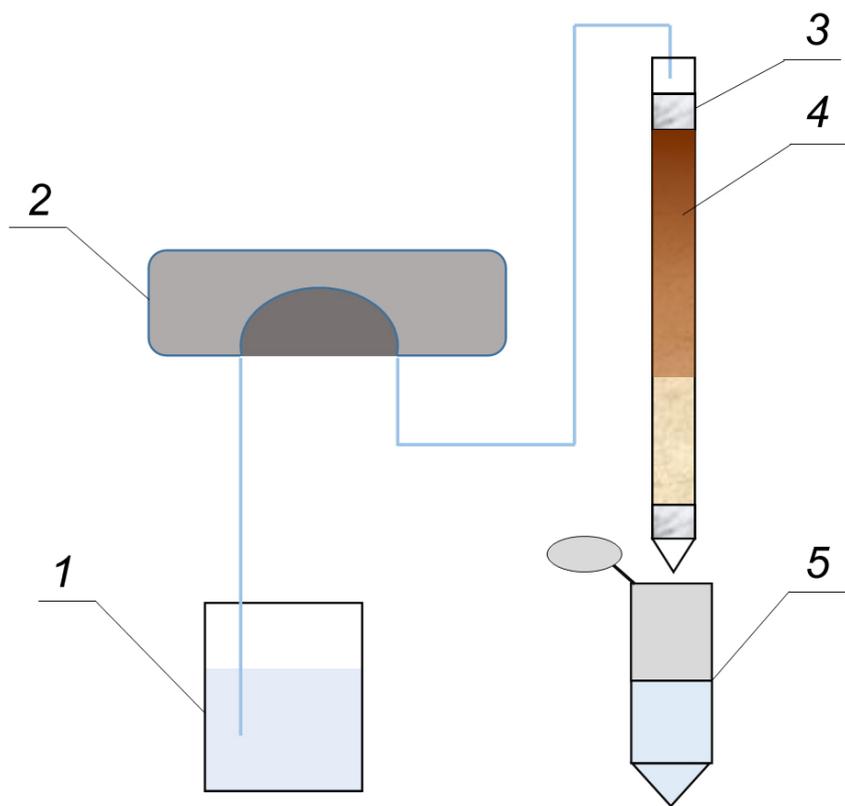
1. *Filosofov D., Kurakina E., Radchenko V.* // Nucl. Med. Biol. 2021. V. 94–95. P. 1.  
<https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2020.12.001>
2. *Bernhardt P., Forssell-Aronsson E., Jacobsson L. Skarnemark G.* // Acta Oncologica. 2001. V. 40. P. 602. <https://doi.org/10.1080/028418601750444141>
3. *Загрядский В.А.* // Российские нанотехнологии. 2023. Т. 18. № 4. С. 564.  
<https://doi.org/10.56304/S1992722323040179>
4. *Мамадалиев Н., Левин В.И., Малинин А.Б.* Генератор родия-103. // Радиохимия. 1978. № 5. С. 772.
5. *Jensen A.I., Zhuravlev F., Severin G. et al.* // Appl. Radiat. Isot. 2020. V. 156. P. 108985.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108985>
6. *Ohya T., Ichinose J., Nagatsu K., Sugo Y., Ishioka N., Watabe H., Itoh M., Minegishi K., Zhang M.-R.* // Radiochim. Acta. 2024. V. 112. P. 37.  
<https://doi.org/10.1515/ract-2023-0238>.
7. *Арзуманов С.С., Буслаев В.С., Ерозолимский Б.Г., Масалович С.В., Стренетов А.Н., Федунин В.П., Франк А.И., Яшин А.Ф., Яценко Б.А.* Двойной изогнутый канал реактора ИР-8 для работ с очень медленными нейтронами. Препринт ИАЭ-4216/14. 1985 г.
8. *De Frenne D.* // Nucl. Data Sheets. 2009. V. 110. P. 2081.  
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2009.08.002>
9. *Алексанко С., Гуменюк А., Муштакова С. и др.* // Fresenius J. Anal. Chem. 2001. V. 370. P. 865. <https://doi.org/10.1007/s002160100878>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

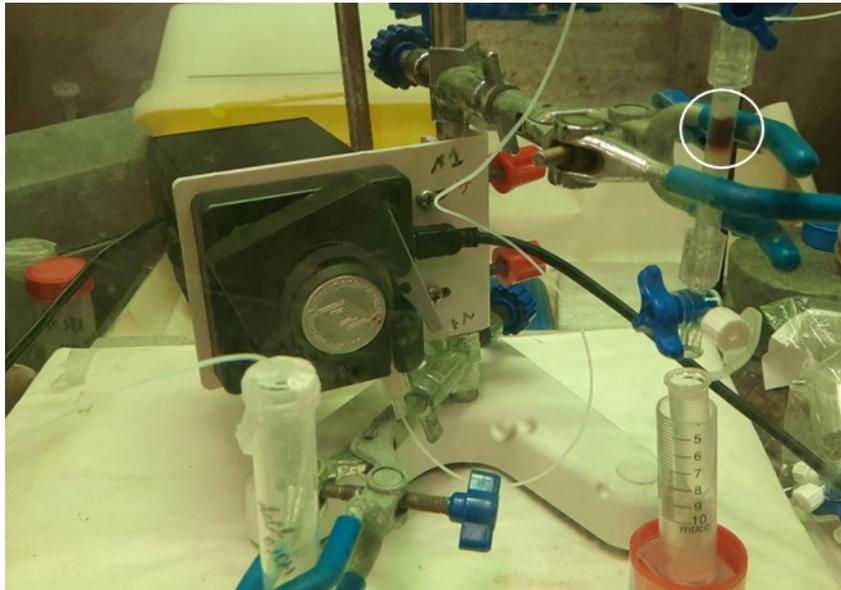
- Рис. 1.** Фрагмент аппаратного гамма-спектра пробы с  $^{103}\text{Pd}$  через два дня после облучения.
- Рис. 2.** Схема ионообменной колонки с оснасткой для разделения  $^{103}\text{Pd}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ : 1 – емкость с элюентом, 2 – перистальтический насос, 3 – ионообменная колонка, 4 – область локализации хлорида палладия, 5 – емкость для сбора элюата.
- Рис. 3.** Общий вид ионообменной колонки с оснасткой для разделения  $^{103}\text{Pd}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  (темно-коричневый хлоридный комплекс палладия на колонке обведен белым кружком).
- Рис. 4.** Эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в зависимости от объема элюента, прошедшего через ионообменную колонку. Элюент – 0.1М-раствор соляной кислоты (pH=0.77) при температуре 25 °С, скорость подачи элюента 0.3мл/мин.
- Рис. 5.** Эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки в зависимости от pH элюента
- Рис. 6.** Эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки в зависимости от скорости подачи 0.1М-раствора соляной кислоты.
- Рис. 7.** Эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с ионообменной колонки 0.1М-раствором соляной кислоты в зависимости от температуры элюента.
- Рис. 8.** Эффективность смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в зависимости от длительности эксплуатации ионообменной колонки.



**Рис. 1.**



**Рис. 2.**



**Рис. 3.**

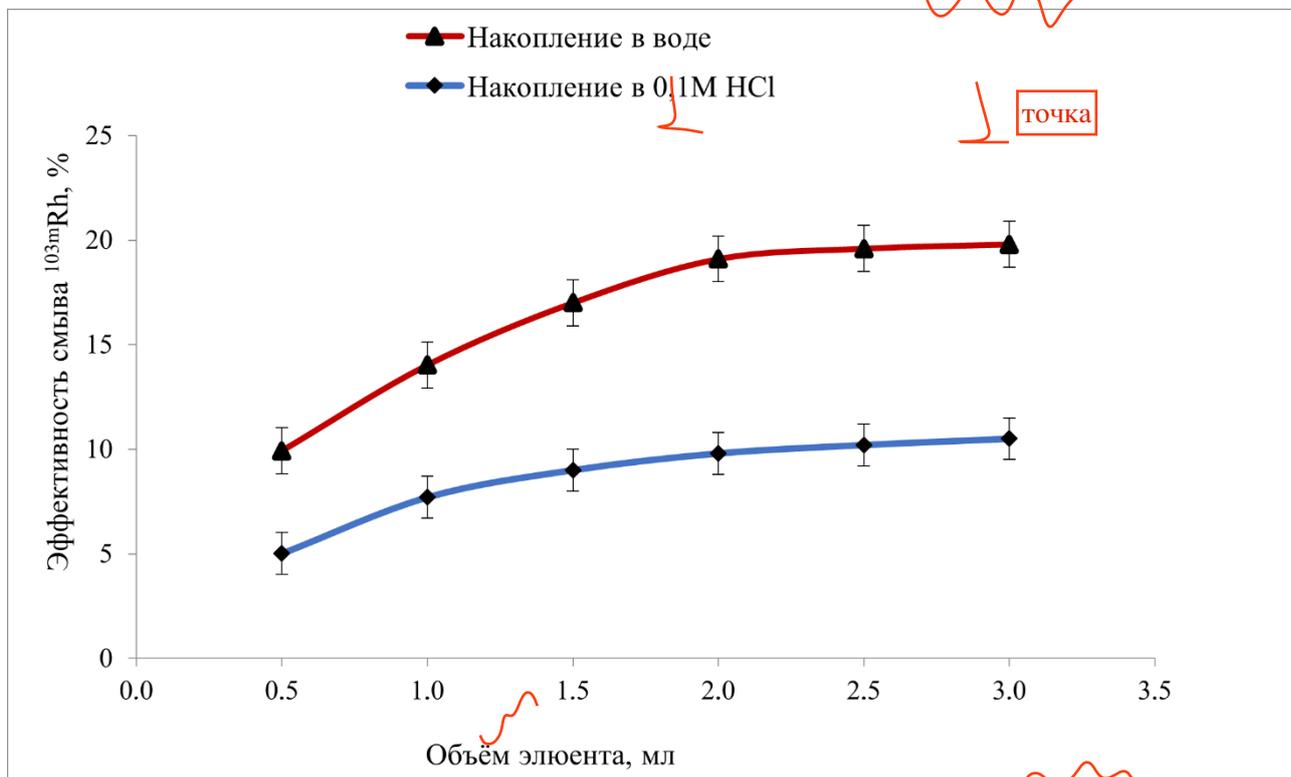
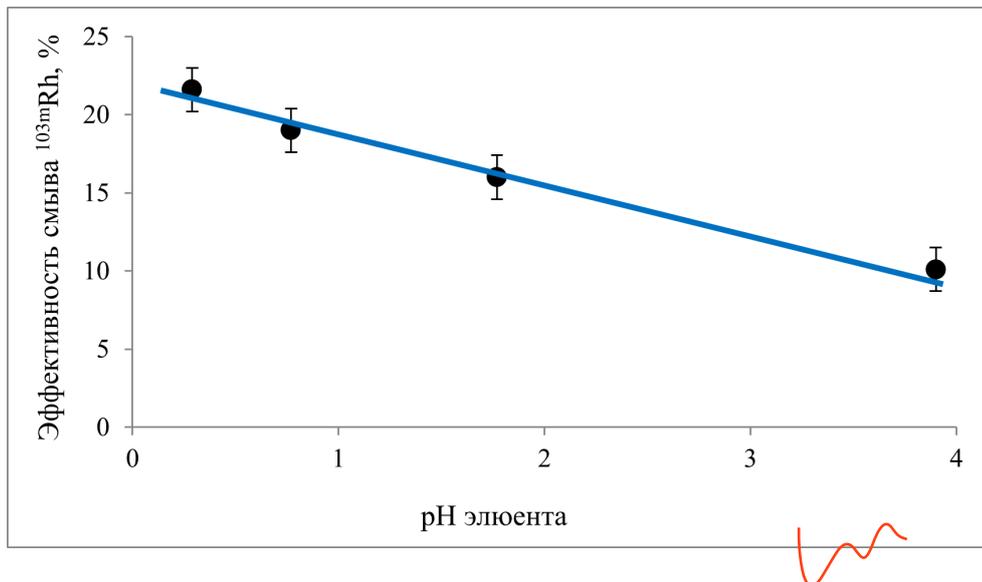


Рис. 4.



**Рис. 5.**

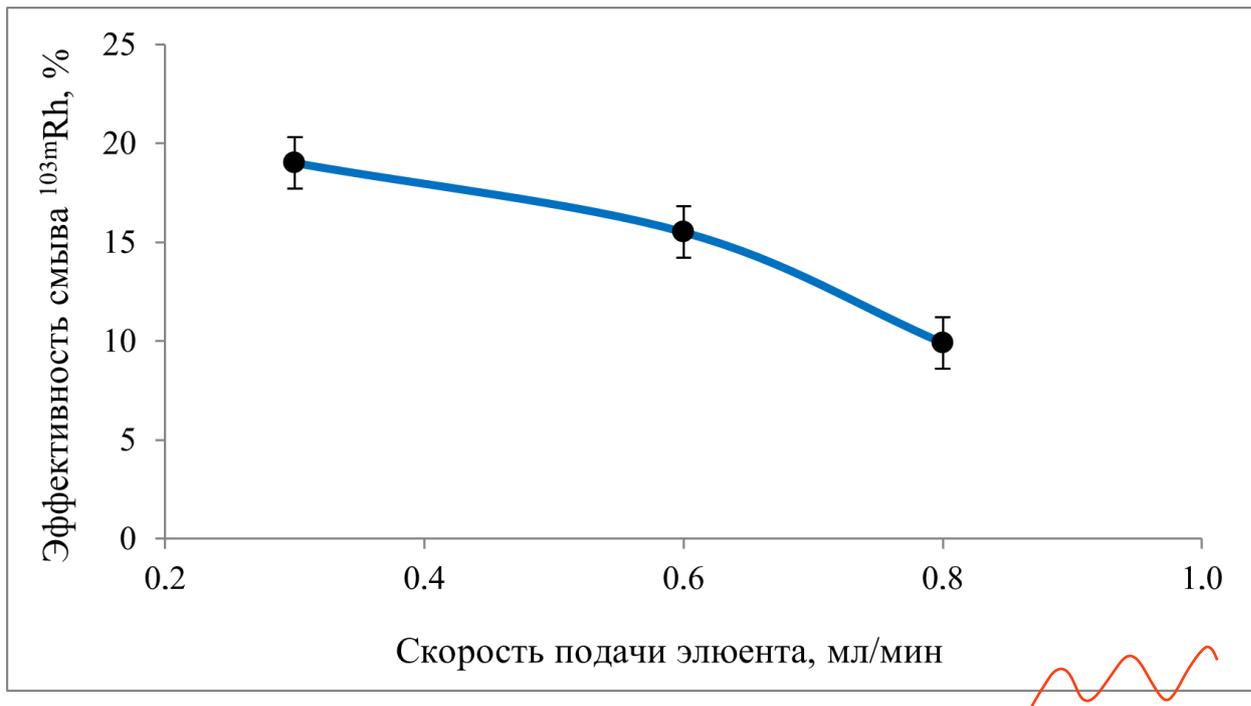
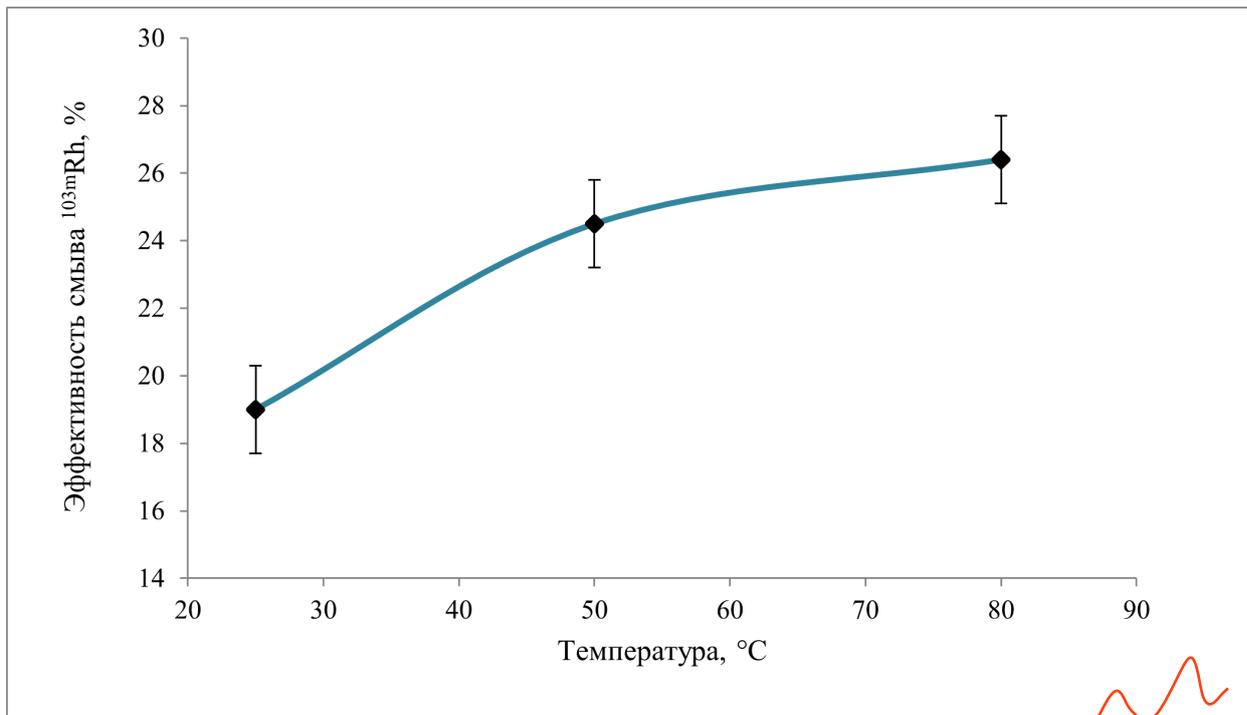
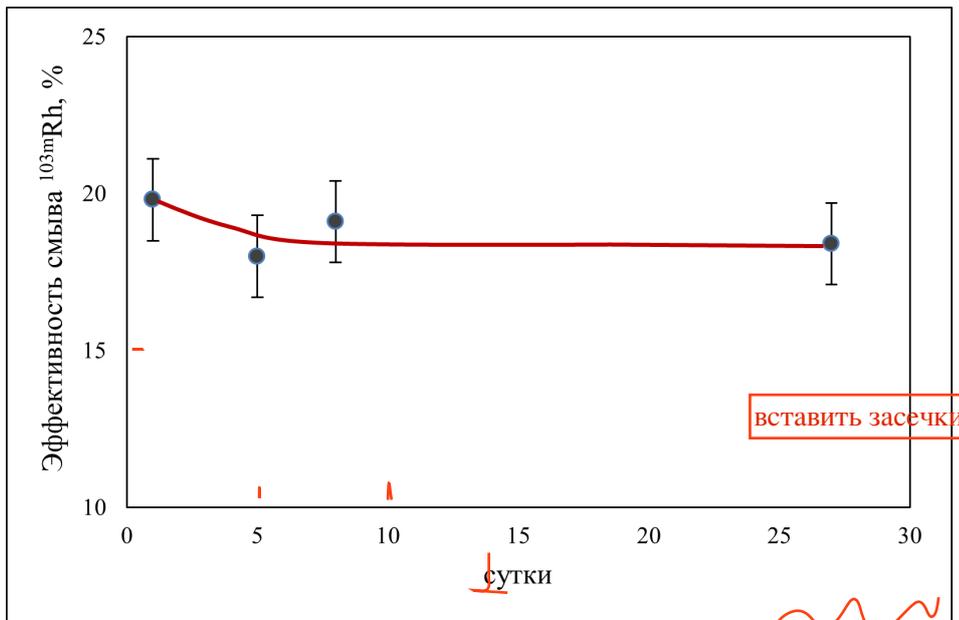


Рис. 6.



**Рис. 7.**



с

Рис. 8.