

РАЗРАБОТКА $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ ГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОРБЕНТОВ. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ С УЧАСТИЕМ РАДИОНУКЛИДОВ ПОДСЕМЕЙСТВА ^{225}Ac

Н. Д. Бетенеков^а, С. В. Ермолаев^{б,*}, А. К. Скасырская^б

^а Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

^б Институт ядерных исследований РАН, 117312, Москва, пр. 60-летия Октября, 7а

*e-mail: ermolaev@inr.ru

Получена 21.05.2019, после доработки 21.05.2019, принята к публикации 22.07.2019

Предложена схема двухколоночного $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора с использованием неорганических сорбентов на основе гидратированного оксида титана (АО ПНФ «Термоксид», марка Т-5) и гидратированного оксида циркония, модифицированного ферроцианидом никеля-калия («Термоксид», Т-35). Получение ^{213}Bi заключалось в длительном вымывании промежуточного ^{221}Fr из первой колонки с сорбентом Т-5, содержащим ^{225}Ac , и удерживании его на второй колонке с Т-35 для распада и накопления ^{213}Bi , который затем извлекали раствором 1 моль/л HCl. Испытаны прямоточная и циркулирующая схемы, определены свойства генератора по отношению к радионуклидам подсемейства ^{225}Ac в широкой области скорости пропускания и объема элюента. Предполагается, что сорбенты марки Т-5 и Т-35 пригодны для создания $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора с активностью сотни мКи ^{225}Ac .

Ключевые слова: $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератор, неорганические сорбенты, гидроксиды титана и циркония, ферроцианид никеля-калия, сорбция, десорбция, радиационная устойчивость

DOI: 10.31857/S0033831120040073

$^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генераторы перспективны для многократного получения ^{213}Bi , который находит все большее применение в терапии онкологических заболеваний [1]. Применение радиационно-устойчивых неорганических сорбентов может увеличить исходную активность материнского ^{225}Ac в таких генераторах до сотен мКи.

Цель работы заключалась в изучении режимов получения ^{213}Bi из прототипа $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора, состоящего из последовательно соединенных хроматографических колонок, заполненных сорбентами двух типов Т-5 и Т-35, следуя методике, разработанной в [2]. Получение ^{213}Bi состояло из двух стадий. Сначала из первой колонки с Т-5, содержащей ^{225}Ac , вымывали ^{221}Fr , и адсорбировали его на второй колонке с Т-35, где происходил распад ^{221}Fr и накопление ^{213}Bi . Далее накопленный

^{213}Bi смывали со второй колонки небольшим объемом раствора 1 моль/л HCl.

Была изучена эффективность вымывания ^{221}Fr из колонок с сорбентами, содержащими ^{225}Ac : сорбентом Т-5 и экстракционно-хроматографической смолой Actinide Resin (Triskem Int., Франция); получены зависимости от концентрации элюента, скорости его пропускания и длины колонки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали неорганические и экстракционно-хроматографические сорбенты. Неорганические сорбенты были произведены ПНФ «Термоксид» золь-гель-методом [3, 4]. Сорбент марки Т-5 на основе гидратированного оксида титана был получен в виде гранул размером ~80 мкм и высушен при температуре 100°C [сокращенно Т-5(100)]. Выбор сорбента и его параметров пре-

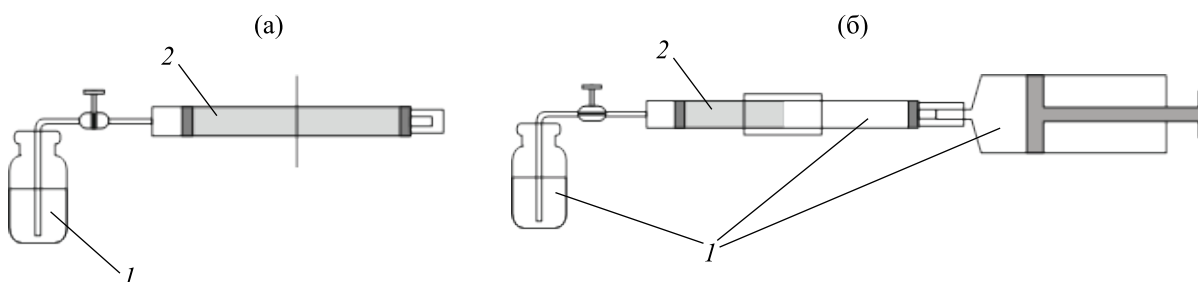


Рис. 1. Уменьшение длины колонки с сорбентом Т-5(100), содержащим ^{225}Ac . а – колонка, приготовленная к отрезанию части без ^{225}Ac ; б – схема перемещения сорбента с ^{225}Ac в корпус новой колонки; (1) раствор NH_4Cl , (2) материнский радионуклид ^{225}Ac .

следовал цель прочного удержания ^{225}Ac и основывался на результатах работы [5]. Сорбент Т-35 представлял собой продукт химического модифицирования поверхности частиц гидроксида циркония размером ~ 80 мкм тонким слоем смешанного ферроцианида никеля-калия, его свойства и условия получения описаны в работах [6, 7]. Экстракционно-хроматографическая смола Actinide Resin (экстрагент – ди-(2-этилгексил)метандифосфоновая кислота, размер зерен 100–150 мкм) была поставлена компанией Triskem Int. (Франция).

^{225}Ac был получен облучением металлического тория протонами средних энергий на линейном ускорителе ИЯИ РАН [8, 9] и выделен по известной методике [10].

Приготовление хроматографических колонок. Сорбентом Т-5(100) заполняли первую колонку объемом 1 мл и длиной 6 см и пропускали через колонку раствор 1 моль/л NH_4Cl (рН 6.78) до тех пор, пока значения рН элюента и элюата, определенные по лабораторному рН-метру, не стали одинаковыми. Исходный раствор 0.1 моль/л HNO_3 , содержащий 4 мКи (150 кБк) ^{225}Ac , нейтрализовывали аммиаком, добавляли NH_4Cl до концентрации 1 моль/л, доводили значение рН до 6.78 и пропускали через колонку, при этом ^{225}Ac количественно адсорбировался. После проведения опытов с данной колонкой уменьшали ее длину следующим образом (рис. 1). На пластиковом корпусе колонки, заполненной раствором 1 моль/л NH_4Cl и герметично закрытой, отмеряли слой сорбента с ^{225}Ac длиной 3.3 см и отрезали скальпелем по отметке. Новый пластиковый корпус, заполненный тем же раствором, соединяли с отрезанной частью муфтой из силиконового шланга. С другой стороны новую колонку соединили со шприцом, запол-

ненным тем же раствором, как показано на рис. 1, б, и втягивали сорбент с ^{225}Ac в новую колонку.

На колонке, заполненной сорбентом Actinide Resin, объемом 0.25 мл и длиной 2.5 см адсорбировали сравнимое количество ^{225}Ac непосредственно из исходного раствора. Для перехода в среду NH_4Cl (рН 6.78) через колонку пропускали 10–15 мл этого раствора требуемой концентрации.

Эффективность вымывания ^{221}Fr из колонки, заполненной Т-5(100) или Actinide Resin, определяли, пропуская с заданной скоростью растворы NH_4Cl в диапазоне концентраций 0.0025–2 моль/л с рН = 6.78 ± 0.04 и собирая элюат порциями по 0.5–4 мл. В каждой порции сразу после отбора измеряли активность ^{221}Fr . С помощью секундомера отмечали длительность сбора проб и время между окончанием сбора пробы и началом ее измерения.

Вторую колонку генератора, предназначенную для удерживания ^{221}Fr , заполняли сорбентом Т-35, уравновешенным с раствором 1 моль/л NH_4Cl (рН 6.78). Готовили две колонки с Т-35 объемом 0.25 мл и длиной 2.5 см.

Конструкция $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора. Приготовленные колонки соединяли в схему так, как показано на рис. 2. Были испытаны прямоточная (рис. 2, а) и циркулирующая (рис. 2, б) генераторные схемы.

В первом варианте элюент 3 с помощью перистальтического насоса 4 подавали на колонку 1, заполненную сорбентом Т-5(100) с ^{225}Ac , и вымывали из нее ^{221}Fr , который адсорбировали на колонках 2, заполненных сорбентом Т-35, а элюат 5 собирали в приемник. ^{213}Bi накапливали на колонках 2 до достижения подвижного равновесия с ^{225}Ac не менее 4 ч [$\geq 5T_{1/2}(^{213}\text{Bi})$] и затем смывали раствором 1 моль/л HCl порциями по 1 мл, ис-

пользуя трехходовые краны. Во втором варианте (рис. 2, б) раствор *б* после пропускания через систему колонок снова возвращали в ту же емкость, образуя замкнутый контур.

Гамма-спектрометрические измерения проводили с использованием спектрометра с детектором из особо чистого германия (ORTEC). Активность дочерних радионуклидов измеряли по наиболее интенсивным гамма-квантам [11]: ^{221}Fr – 218.1 кэВ (интенсивность 11.4%), ^{213}Bi – 440.4 кэВ (25.9%). Материнский ^{225}Ac определяли по активностям пришедших с ним в равновесие ^{221}Fr и ^{213}Bi . Для оценки распределения ^{225}Ac по длине колонки с сорбентом Т-5(100), а также распределения ^{213}Bi по длине колонки с Т-35 использовали коллиматор из двух свинцовых кирпичей толщиной 5 см с щелью между ними 0.5 см. С одной стороны щели располагали дозиметр, с другой – колонку. Сканируя, т.е. перемещая колонку относительно щели, измеряли активности ее частей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Накопление ^{213}Bi на колонках, заполненных сорбентом Т-35. Неорганические сорбенты, модифицированные смешанными ферроцианидами, позволяют эффективно выделять ионы щелочных металлов вплоть до франция из растворов аммонийных солей минеральных кислот [12]. С ростом концентрации солей аммония коэффициент распределения щелочных металлов закономерно падает, так что зависимость $\lg K_d$ от $\lg[\text{NH}_4^+]$ имеет угловой коэффициент 1, что указывает на ионообменный механизм их сорбции. Для испытаний двух-колоночного $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора использовали раствор 1 моль/л NH_4Cl . Абсолютное значение коэффициента распределения франция в растворе такой концентрации достаточно велико – около 10^3 . Это гарантирует эффективное удержание ^{221}Fr из элюата первой колонки ферроцианидсодержащим сорбентом второй колонки для его распада в ^{213}Bi .

Была изучена зависимость накопления ^{213}Bi в сорбенте Т-35 от скорости пропускания элюента и от длины материнской колонки с Т-5(100). Использовали две колонки с сорбентом Т-35, как показано на рис. 2, чтобы проследить влияние скорости пропускания на распределение ^{213}Bi по колонкам, зависящее в первую очередь, по нашему мнению,

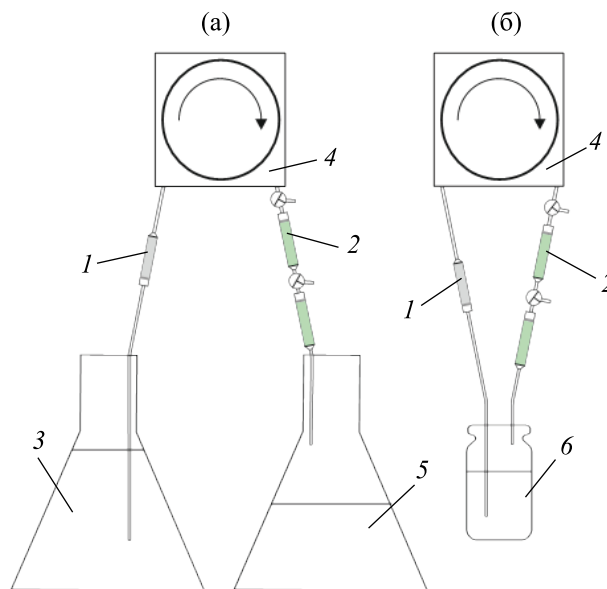


Рис. 2. Схема прототипа $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора с двумя сорбентами Т-5(100) и Т-35: а – прямоточная схема; б – циркулирующая схема. Обозначения: 1 – колонка с сорбентом Т-5(100), содержащим ^{225}Ac ; 2 – две колонки с сорбентом Т-35; 3 – раствор NH_4Cl (элюент); 4 – перистальтический насос; 5 – элюат, 6 – циркулирующий раствор.

от скорости движения ^{221}Fr в этом сорбенте. Результаты представлены в таблице.

В режиме циркуляции объем элюата складывался из объема оборотного раствора и раствора в трубках перистальтического насоса. Объем элюата, равный 1.3 мл, означает, что оборотного раствора не было вовсе, т.е. трубка, выходящая из второй колонки с Т-35 была непосредственно соединена с трубкой, входящей в колонку с Т-5(100). Заметили, что режим работы $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора – прямоточный или циркуляционный – не влияет на получение ^{213}Bi . Содержание ^{213}Bi (в процентах) рассчитывали, измеряя его активность в колонках с Т-35, приводя ее на момент окончания элюирования и деля на активность ^{213}Bi (равновесную), находившуюся в материнской колонке в момент начала элюирования. Содержание ^{225}Ac в колонках с Т-35 определяли по активности дочерних ^{221}Fr и ^{213}Bi после выдержки и длительного измерения.

На рис. 3 показаны графики зависимости общего накопления ^{213}Bi на обеих колонках с сорбентом Т-35 (верхняя кривая) и его накопления на второй колонке (нижняя кривая) от скорости пропускания раствора.

Результаты испытаний прототипа $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора с двумя неорганическими сорбентами Т-5(100) и Т-35

Скорость пропускания элюента, мл/мин	Наличие циркуляции	Длительность накопления ²¹³ Bi, мин	Объем элюата, мл	Содержание ²¹³ Bi на колонках с сорбентом Т-35, %		Содержание ²²⁵ Ac на колонках с сорбентом Т-35, %		
				колонка 1	колонка 2	колонка 1	колонка 2	колонки 1+2
Длинная колонка с сорбентом Т-5(100), содержащим ²²⁵ Ac (исходная)								
0.85	–	304	258	45.4	0.1	0.03	0.02	0.05
1.8	–	283	500	50.6	1.0	0.04	0.02	0.06
1.8	–	272	480	47.3	3.6	0.03	0.03	0.06
2.0	+	185	22.3	48.1	3.0			
Короткая колонка с сорбентом Т-5(100), содержащим ²²⁵ Ac								
0.53	+	240	22.3	41.9	< 0.2	0.05	0.03	0.08
1.0	–	245	250	49.3	< 0.2			0.02
1.0	+	240	22.3	48.7	1.1			0.10
1.0	+	240	1.3	45.4	1.4			
1.1	+	240	7.3	47.1	1.2			0.11
2.0	–	251	500	46.3	6.0			0.02
2.7	+	240	22.3	43.5	9.0			0.08

Из рис. 3 следует, что накопление ^{213}Bi в сорбенте Т-35 (верхняя кривая) не зависит от длины материнской колонки. Это было бы понятно, если бы выходы ^{213}Bi превышали 90%, но в данном случае, когда доля ^{213}Bi на Т-35 около 50%, это показалось нам странным. Также общее накопление ^{213}Bi слабо зависит от скорости движения раствора. На второй колонке с Т-35 (нижняя кривая), несмотря на разброс экспериментальных данных, заметно небольшое увеличение количества ^{213}Bi с

ростом скорости движения раствора. Это связано с тем, что скорость движения ^{221}Fr в сорбенте Т-35 возрастает вместе со скоростью потока, и часть не успевшего распасться ^{221}Fr попадает на вторую колонку с Т-35.

Обе колонки с Т-35 сканировали спустя ~30 мин после окончания элюирования (для распада ^{221}Fr) и находили распределение ^{213}Bi по длине (объему) колонки. Сканирование второй колонки не было информативным, т.е. величина активности ^{213}Bi

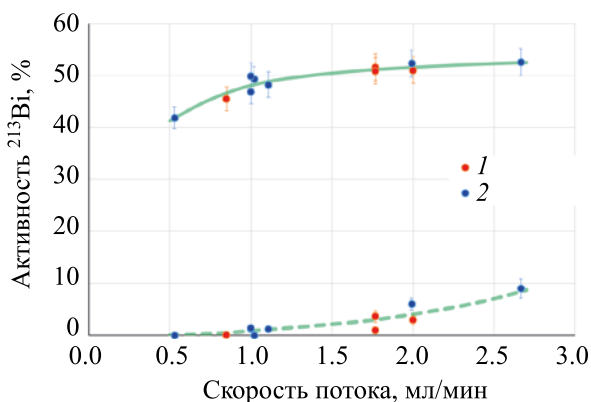


Рис. 3. Зависимость накопления ^{213}Bi в сорбенте Т-35 от скорости пропускания раствора и от длины материнской колонки с Т-5(100). Верхняя кривая — накопление ^{213}Bi на обеих колонках с Т-35; нижняя кривая — накопление ^{213}Bi на второй колонке с Т-35, 1 — длинная колонка с Т-5(100); 2 — короткая колонка с Т-5(100).

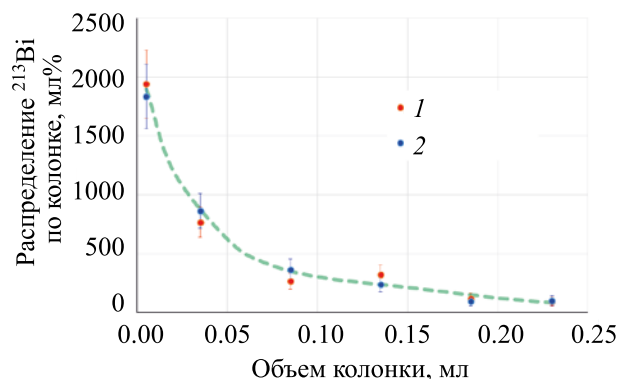


Рис. 4. Распределение ^{213}Bi в первой колонке с Т-35. Скорости потока: (1) длинная колонка с Т-5(100) — 1.8 мл/мин; (2) короткая колонка с Т-5(100) — 1.0 мл/мин.

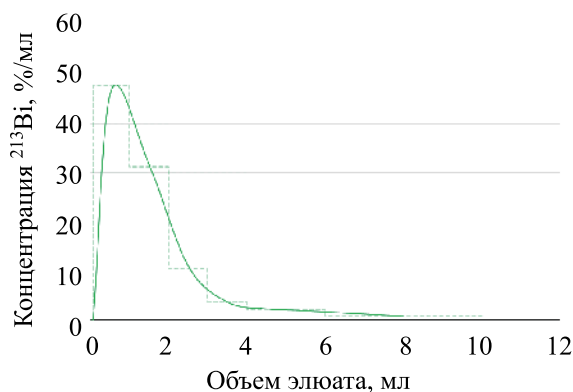


Рис. 5. Кривая элюирования ^{213}Bi , накопленного на колонке с Т-35.

была сравнима с фоном. Типичные результаты сканирования первой колонки с Т-35 показаны на рис. 4.

В пределах точности измерения распределение ^{213}Bi в первой колонке с Т-35 не зависит от длины материнской колонки и скорости потока. Оно выглядит достаточно пологим и предполагает попадание некоторого количества ^{213}Bi на вторую колонку с Т-35, что соответствует данным таблицы.

Извлечение накопленного ^{213}Bi из колонки с Т-35. С помощью трехходовых кранов (рис. 2) через первую колонку с Т-35, содержащую основное количество накопленного ^{213}Bi , пропускали раствор 1 моль/л HCl и собирали элюат порциями по 1 мл. При сборе первой порции наблюдали образование мелких пузырей, что связали со сменой среды с 1 моль/л NH_4Cl на 1 моль/л HCl . Определяли значения активности ^{213}Bi в каждой порции и приводили их на одно время (на начало элюирования ^{213}Bi). На рис. 5 показана кривая вымывания ^{213}Bi .

Штриховой линией на рис. 5 обозначена гистограмма, показывающая измеренную концентрацию ^{213}Bi (в %/мл), собранного в каждой порции. Сплошная линия, проведенная на основе гистограммы, иллюстрирует форму кривой элюирования. В элюате объемом 10 мл обнаруживали в среднем около трех четвертей ^{225}Ac , содержавшегося в колонке с Т-35 к началу извлечения ^{213}Bi .

Распределение ^{225}Ac в колонке с Т-5(100) в зависимости от объема пропущенного через колонку раствора. Сканирование колонки с сор-

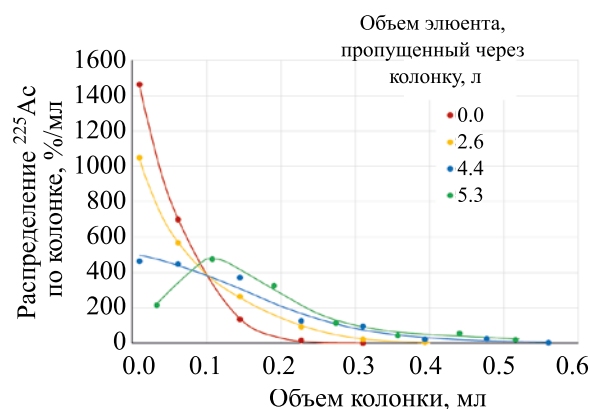


Рис. 6. Распределение ^{225}Ac в колонке, заполненной сорбентом Т-5(100), в зависимости от объема пропущенного через колонку раствора.

бентом Т-5(100), содержащим материнский ^{225}Ac , обычно проводили на следующий день после опыта по накоплению ^{213}Bi . Результаты нескольких сканирований представлены на рис. 6. Всего через колонку пропустили 6.9 л раствора, включая как испытания прототипа $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора, так и эксперименты по изучению эффективности вымывания ^{221}Fr из колонки с Т-5(100), описанные в следующем разделе. При испытаниях генератора в режиме замкнутого контура (рис. 2, б) объем пропущенного раствора рассчитывали как скорость циркуляции, умноженную на длительность пропускания.

После пропускания 4.4 л элюента длину колонки с сорбентом Т-5(100) уменьшали с 6 до 3.3 см (а объем сорбента с 1 мл до 0.55 мл соответственно). Проводили сканирование колонки перед уменьшением длины, а спустя сутки – сканирование новой короткой колонки, чтобы оценить качество перемещения сорбента с ^{225}Ac (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что в пределах точности измерения распределение ^{225}Ac после перемещения сорбента осталось таким же.

По данным сканирования можно оценить среднюю скорость движения ^{225}Ac по длине (объему) колонки и ресурс генератора. Из рис. 6 видно, что при пропускании 5.3 л раствора максимум распределения ^{225}Ac активная сместился приблизительно на 0.1 мл. $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератор рассчитан примерно на 20 сут работы. Допустим, что ^{213}Bi извлекают из генератора дважды в день; объем раствора, проходящий через колонку с ^{225}Ac со скоростью 1 мл/мин, за один цикл накопления ^{213}Bi длитель-

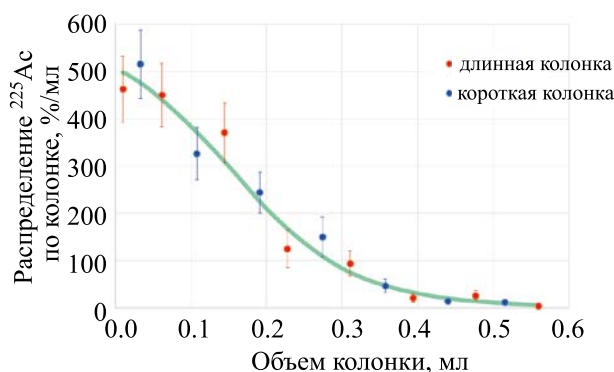


Рис. 7. Распределение ^{225}Ac в исходной колонке с сорбентом Т-5(100) перед уменьшением объема сорбента и в новой короткой колонке после перемещения в нее сорбента с ^{225}Ac .

ностью 250 мин составит 250 мл, т.е. 500 мл в день, или 10 л за весь срок работы. После пропускания 10 л раствора максимум распределения ^{225}Ac сместится по колонке всего на ~ 0.2 мл. Можно сделать вывод, что степень удерживания ^{225}Ac сорбентом Т-5(100) в нейтральной среде растворов NH_4Cl вполне удовлетворяет выбранной схеме получения ^{213}Bi , требующей длительного пропускания больших количеств раствора для непрерывного вымывания ^{221}Fr .

В то же время довольно странным выглядит результат накопления ^{213}Bi в сорбенте Т-35 (таблица, рис. 3): уменьшение длины материнской колонки с Т-5(100) в два раза и увеличение скорости движения раствора в три раза практически не приводит к увеличению выхода ^{213}Bi — он остается на уровне 50%. Поскольку висмут в нейтральных средах хорошо адсорбируется на неорганических сорбентах типа Т-5 и Т-3, можно предположить, что в сорбенте, образовавшись из ^{221}Fr , ^{213}Bi практически не движется — где образовался, там и остался. Тогда объяснение накоплению ^{213}Bi в сорбенте Т-35 следует искать в поведении ^{221}Fr в сорбенте Т-5(100).

Вымывание ^{221}Fr из колонки с сорбентом Т-5(100), содержащим ^{225}Ac . Для оценки степени вымывания ^{221}Fr , через колонку с сорбентом, содержащим ^{225}Ac , пропускали с заданной скоростью раствор NH_4Cl различной концентрации и собирали элюат порциями, в которых сразу после отбора измеряли активность ^{221}Fr . В первых порциях наблюдали выход в элюат преимущественно ^{221}Fr , находившегося к началу элюирования в подвижном равновесии с ^{225}Ac и обычно вымывае-

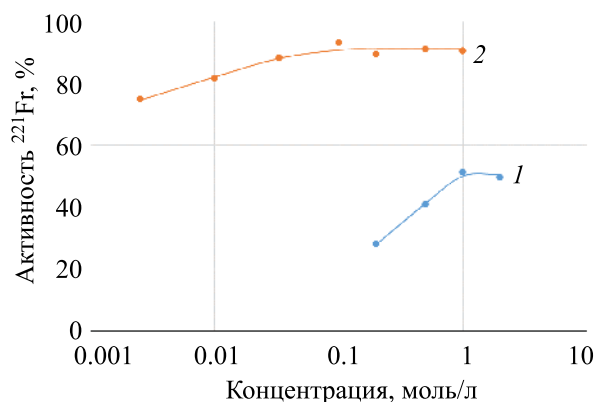


Рис. 8. Активность ^{221}Fr , извлекаемого растворами NH_4Cl из колонок с сорбентами (1) Т-5(100) (длинная колонка) и (2) Actinide Resin, содержащими ^{225}Ac .

мого небольшим объемом раствора (болюсом). В следующих порциях регистрировали только ^{221}Fr , образующийся и смываемый непосредственно в ходе элюирования.

На рис. 8 представлены данные по общему количеству ^{221}Fr , извлекаемого из колонок с сорбентами Т-5(100) (длинная колонка) и Actinide Resin, при пропускании через них растворов NH_4Cl различной концентрации. Скорость движения раствора составляла 1 мл/мин. Значения активности ^{221}Fr в порции приводили на момент окончания элюирования $A_2^i(t_e)$, суммировали активности всех порций и делили на равновесную активность ^{221}Fr (A_2^0), находившуюся в колонке к моменту начала элюирования: $\frac{\sum A_2^i(t_e)}{A_2^0}$ — эту величину (в %) откладывали по оси ординат.

Графики на рис. 8 показывают, что из сорбента Actinide Resin, начиная с концентрации NH_4Cl 0.1 моль/л, извлекали более 90% ^{221}Fr . Из длинной колонки с сорбентом Т-5(100) извлекали не более 50% ^{221}Fr , причем кривая выходит на плато, и увеличение концентрации NH_4Cl с 1 до 2 моль/л не приводит к возрастанию количества извлекаемого ^{221}Fr .

На рис. 9 показаны зависимости общего количества ^{221}Fr , извлекаемого из длинной колонки с сорбентом Т-5(100), от скорости движения растворов NH_4Cl разных концентраций.

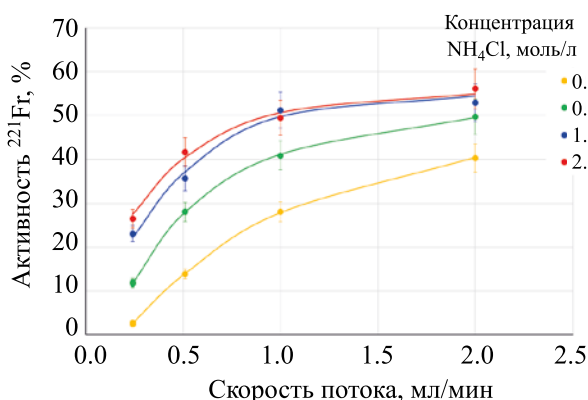


Рис. 9. Активность ^{221}Fr , извлекаемого из колонки с сорбентом Т-5(100), в зависимости от скорости движения растворов NH_4Cl различных концентраций.

Из рис. 9 видно: при низких скоростях движения раствора доля извлекаемого ^{221}Fr растет линейно с увеличением скорости потока, а при высоких скоростях рост заметно замедляется. Для растворов NH_4Cl с концентрациями 1 и 2 моль/л удвоение скорости раствора с 1 до 2 мл/мин практически не приводит к росту доли вымываемого ^{221}Fr , которая едва преодолевает отметку 50%. Тот факт, что мы собираем около половины ^{221}Fr , означает, что другая половина не успевает выйти из материнской колонки и распадается в ^{213}Bi , там же и остающийся.

Интересно сравнить, насколько отличаются количества ^{221}Fr , извлекаемые из колонок с сорбентом Т-5(100) разной длины (рис. 10).

Оказывается, при низких скоростях пропускания раствора из короткой колонки с Т-5(100) можно собрать заметно больше ^{221}Fr . Однако с ростом скорости разница в количестве извлекаемого ^{221}Fr между длинной и короткой колонками сходится на нет.

Таким образом, полученные результаты показали необходимость дальнейшего детального изучения отмеченных закономерностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытаны прямоточная и циркулирующая схемы $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора, состоящего из последовательно соединенных хроматографических колонок, заполненных неорганическими сорбентами двух типов. В качестве первого сорбента для удерживания ^{225}Ac использовали Т-5(100) на основе гидратированного диоксида титана. Второй

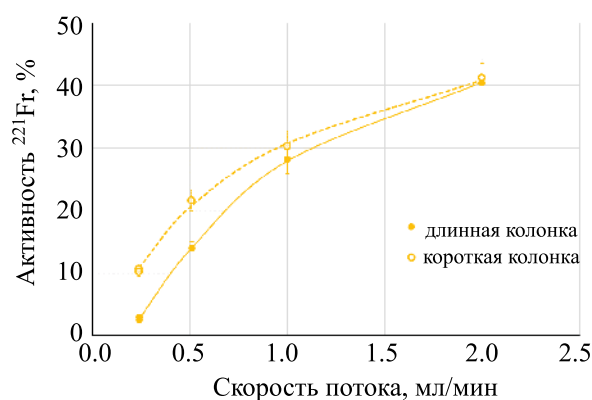


Рис. 10. Активности ^{221}Fr , извлекаемые из колонок с сорбентом Т-5(100) разной длины. Концентрация раствора NH_4Cl 0.2 моль/л.

сорбент, использованный для сорбции ^{221}Fr , представлял собой гидроксид циркония, модифицированный ферроцианидом никеля-калия (Т-35). Получение ^{213}Bi состояло из двух стадий. Сначала из первого сорбента вымывали ^{221}Fr и адсорбировали его на втором сорбенте, где происходил распад ^{221}Fr и накопление ^{213}Bi . Далее накопленный ^{213}Bi смывали со второго сорбента раствором 1 моль/л HCl . Циркулирующая схема генератора является более компактной и технологичной.

Изучена зависимость распределения ^{225}Ac в колонке с Т-5(100) от объема пропущенного через колонку элюента – раствора NH_4Cl . Степень удерживания ^{225}Ac сорбентом Т-5(100) в нейтральной среде растворов NH_4Cl вполне удовлетворяет выбранной схеме получения ^{213}Bi , требующей длительного пропускания больших количеств раствора для непрерывного вымывания ^{221}Fr .

Степень накопления ^{213}Bi в сорбенте Т-35 изучена в зависимости от скорости пропускания элюента и от длины материнской колонки с Т-5(100). Обнаружено, что выход ^{213}Bi в сорбенте Т-35 не зависит от длины материнской колонки, значения выхода растут с 42 до 52% при увеличении скорости потока элюента от 0.53 до 2.7 мл/мин. Вместе с ^{213}Bi в сорбенте Т-35 накапливалось небольшое количество ^{225}Ac , вымываемого из материнской колонки. Содержание ^{225}Ac находилось в пределах 0.02–0.11% от активности ^{225}Ac на материнской колонке.

^{213}Bi , накопленный в колонке с Т-35, смывали раствором 1 моль/л HCl . В первом миллилитре элюата извлекали около половины от накоплен-

ного количества, а выход в 10 мл достигал 96%. Вместе с ^{213}Bi в элюат попадало около трех четвертей ^{225}Ac , адсорбируемого в колонке с Т-35. Для уменьшения примеси ^{225}Ac элюат ^{213}Bi можно пропускать через небольшую дополнительную колонку с Actinide Resin.

Изучена эффективность элюирования ^{221}Fr из колонки, содержащей ^{225}Ac . Получены данные по общему количеству извлекаемого ^{221}Fr в зависимости от типа сорбента [Т-5(100) и Actinide Resin], скорости пропускания растворов NH_4Cl разных концентраций и длины материнской колонки, заполненной сорбентом Т-5(100). Обнаружено, что из колонки с Т-5(100) можно вымыть около 50% ^{221}Fr , причем с ростом концентрации NH_4Cl и скорости потока элюента зависимость извлекаемого ^{221}Fr выходит на плато.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научному руководителю работ Б.Л. Жуйкову за постоянный интерес к работе, всяческую ее поддержку и правку рукописи статьи.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИЯИ РАН (Соглашение с Минобрнауки N 14.621.21.0014, уникальный идентификатор работ RFMEF162117X0014).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morgenstern A., Bruchertseifer F., Apostolidis C.* // *Curr. Radiopharm.* 2011. Vol. 4. P. 2955.
2. *Ермолаев С.В., Скасырская А.К.* // *Радиохимия.* 2019. Т. 61, № 1. С. 41.
3. *Шарыгин Л.М.* Термостойкие неорганические сорбенты. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 300 с.
4. *Денисов Е.И., Бетенеков Н.Д.* // *Радиохимия.* 2018. Т. 60, № 4. С. 332.
5. *Бетенеков Н.Д., Денисов Е.И., Васильев А.Н., Ермолаев С.В., Жуйков Б.Л.* // *Радиохимия.* 2019. Т. 61, № 2. С. 159.
6. *Воронина А.В., Семенищев В.С., Ноговицына Е.В., Бетенеков Н.Д.* // *Радиохимия.* 2012. Т. 54, № 1. С. 66.
7. *Voronina A.V., Semenishchev V.S., Nogovitsyna E.V., Betenekov N.D.* // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2013. Vol. 298. P. 67.
8. *Жуйков Б.Л., Калмыков С.Н., Ермолаев С.В., Алиев Р.А., Коханюк В.М., Матушко В.Л., Тананаев И.Г., Мясоедов Б.Ф.* // *Радиохимия.* 2011. Т. 53, № 1. С. 66.
9. *Ermolaev S.V., Zhuikov B.L., Kokhanyuk V.M., Matushko V.L., Kalmykov S.N., Aliev R.A., Tananaev I.G., Myasoedov B.F.* // *Radiochim. Acta.* 2012. Vol. 100. P. 223.
10. *Aliev R.A., Ermolaev S.V., Vasiliev A.N., Ostapenko V.S., Lapshina E.V., Zhuikov B.L., Zakharov N.V., Pozdeev V.V., Kokhanyuk V.M., Myasoedov B.F., Kalmykov S.N.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2014. Vol. 32, N 5. P. 468.
11. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, USA. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
12. *Бетенеков Н.Д., Букланов Г.В., Ипатов Е.Г., Короткин Ю.С.* // *Радиохимия.* 1991. Т. 33, № 5. С. 163.