РАДИОХИМИЯ/RADIOCHEMISTRY

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОРБЦИИ МИКРОКОЛИЧЕСТВ ПЛУТОНИЯ-239 СОРБЕНТОМ MNO_2–ТАЦ

Научная статья

Куляшова Е.Н.[1], Семенищев В.С.[2, *]
[2] ORCID : 0000-0002-5269-2294;
[1, 2] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (v.s.semenishchev[at]urfu.ru)

Аннотация

Работа посвящена изучению сорбции микроколичеств Pu-239 на тонкослойном неорганическом сорбенте MnO_2-ТАЦ. Показано, что для Pu^{4+} была характерна классическая S-образная зависимость степени сорбции от pH, при этом максимум сорбции близкий к 100% достигается при pH > 5. Напротив, сорбция Pu^{3+} была низкой (2 – 5%) практически во всем интервале pH, несколько возрастая до 25% при pH = 1,6. В соответствии с ранее полученными данными сорбционное поведение Pu^{4+} было сходным с поведением Ra^{2+} и UO_2^{2+}, а поведение Pu^{3+} – напротив было близко к поведению Th^{4+}. Наиболее вероятно, полученные результаты можно объяснить частичным окислением плутония в процессе сорбции на сорбенте MnO_2-ТАЦ, что косвенно подтверждается значениями стандартных ОВ потенциалов для марганца и плутония. Путем математической обработки полученных альфа-спектров плутония-239 на сорбенте MnO_2-ТАЦ были оценены коэффициенты диффузии плутония в диоксиде марганца: $6{,}6\cdot10^{-18}$ м^2/с для Pu^{3+}, $2{,}6\cdot10^{-18}$ м^2/с для Pu^{4+} при сорбции из раствора с pH = 4 и $1{,}2\cdot10^{-18}$ м^2/с для Pu^{4+} при сорбции из раствора с pH = 8. Полученные значения коэффициентов диффузии соответствуют зернограничной диффузии плутония в поровом пространстве сорбента.

Ключевые слова: плутоний-239, диоксид марганца, сорбция, диффузия.

A STUDY OF PLUTONIUM-239 MICROQUANTITIES SORPTION BY MNO_2-TAC SORBENT

Research article

Kulyashova Y.N.[1], Semenishchev V.S.[2, *]
[2] ORCID : 0000-0002-5269-2294;
[1, 2] Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (v.s.semenishchev[at]urfu.ru)

Abstract

The work is dedicated to the study of sorption of microquantities of Pu-239 on thin-layer inorganic sorbent MnO_2-TAC. It was shown that Pu^{4+} was characterized by a classical S-shaped dependence of the sorption degree on pH, with a sorption maximum close to 100% being reached at pH > 5. On the contrary, the sorption of Pu^{3+} was low (2 - 5%) practically in the whole pH range, slightly increasing up to 25% at pH = 1.6. In accordance with the previously obtained data, the sorption behaviour of Pu^{4+} was similar to that of Ra^{2+} and UO_2^{2+}, while in contrast, the behaviour of Pu^{3+} was close to that of Th^{4+}. Most probably, the obtained results can be explained by partial oxidation of plutonium during sorption on MnO_2-TAC sorbent, which is indirectly confirmed by the values of standard OV potentials for manganese and plutonium. By mathematical processing of the obtained alpha-spectra of plutonium-239 on MnO_2-TAC sorbent the diffusion coefficients of plutonium in manganese dioxide were estimated: $6.6\cdot10^{-18}$ m^2/s for Pu^{3+}, $2.6\cdot10^{-18}$ m^2/s for Pu^{4+} during sorption from solution with pH = 4 and $1.2\cdot10^{-18}$ m^2/s for Pu^{4+} during sorption from solution with pH = 8. The obtained values of diffusion coefficients correspond to grain boundary diffusion of plutonium in the pore space of the sorbent.

Keywords: plutonium-239, manganese dioxide, sorption, diffusion.

Введение

Диоксид марганца – один из известных сорбционно-активных материалов для извлечения широкого круга катионов из водных сред. Среди наиболее распространенных связующих агентов или матриц для диоксида марганца можно выделить SiO_2 [1], [2], активированный уголь [3], альгинатные материалы [4], метилметакрилат [5], пенополиуретан [6], волокнистые материалы [7], [8], ионообменные смолы [9], а также плоские пленки [10]. Тонкослойные плоские сорбенты на основе MnO_2, нанесенного на полимерные пленки, могут быть использованы для анализа изотопов радия в водных пробах. Главным достоинством таких сорбентов является возможность прямого альфа-спектрометрического измерения изотопов радия в плоском сорбенте непосредственно после сорбционного выделения. Из коммерчески доступных материалов известны сорбенты Ra-NucFilm disk швейцарского производства на основе полиамидных дисков качестве материалов-носителей [11]. В работе [12] описан метод синтеза ряда тонкослойных сорбентов на основе диоксида марганца на различных плоских полимерных носителях, таких как полиэтилен и триацетатцеллюлоза. По сравнению с сорбционными дисками Ra-NucFilm disk описанные в этой работе сорбенты MnO_2-ПЭ обладают сходными сорбционными характеристиками, но несколько лучшим энергетическим разрешением: ШППВ радия-224 составляет ~ 60 – 80 кэВ для Ra-NucFilm disk и ~ 40 – 60 кэВ для MnO_2-ПЭ. В случае сорбента MnO_2-ТАЦ было показано, что с ростом времени сорбции заметно ухудшается энергетическое разрешение получаемых альфа-спектров, что было объяснено диффузией альфа-излучателей вглубь сорбента [13].

В научной литературе имеются довольно ограниченные данные по сорбции плутония (VI) [14] на диоксиде марганца, которые были получены только на гранулированных формах композитных сорбентов, содержащих диоксид марганца. В данной работе была изучена сорбция плутония-239 на тонкослойном сорбенте MnO_2-ТАЦ, а также описана диффузия плутония вглубь слоя сорбента в процессе сорбции.

Экспериментальная часть

В качестве источника Pu-239 был использован имевшийся на кафедре образцовый раствор Pu-239 в 2М HNO_3 с удельной активностью 1060 Бк/мл. Дата производства – 1 декабря 1994 года. Для определения радионуклидной чистоты плутония-239 был измерен альфа-спектр 20-мкл аликвоты раствора (рис. 2.6), высушенной на латунной кювете.

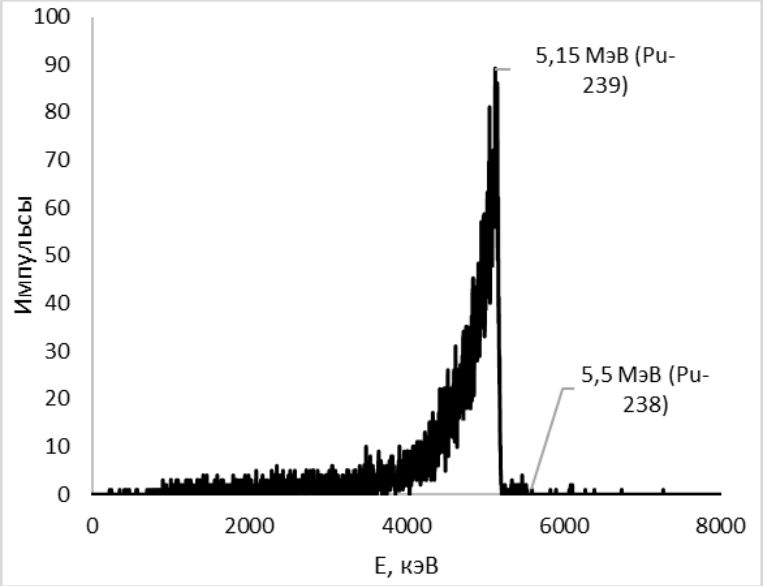

Рисунок 1 - Альфа-спектр 20 мкл образцового раствора плутония, высушенного на латунной кювете
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.1

Альфа-спектр показал, что в препарате присутствует примесь Pu-238, вклад которого в удельную активность препарата составляет 0,7%. В экспериментах по сорбции плутония на MnO_2-ТАЦ активность плутония-239 составляла не более 15 Бк. На основании этого было рассчитано, что масса плутония в сорбционных экспериментах не превышала 6,6 нг. Поскольку Pu-238 имеет значительно меньший период полураспада, чем Pu-239, и, как следствие, меньшую массу 1 Бк, вклад Pu-238 в суммарную массу плутония на поверхности образцов тонкослойных сорбентов можно было не учитывать.

Исследования по сорбции проводили на тонкослойном сорбенте MnO_2–ТАЦ, представляющий собой диоксид марганца, нанесенный на пленку из триацетатцеллюлозы. Сорбент MnO_2–ТАЦ был разработан, в первую очередь, для анализа изотопов радия в водных пробах, но поскольку диоксид марганца является неселективным сорбционно-активным материалом, он способен извлекать из раствора другие ионы, особенно ионы тяжелых металлов.

Измерения активности плутония-239 проводили на альфа-спектрометре Мультирад-АС (НПП «Доза», Россия) с кремниевым поверхностно-барьерным полупроводниковым детектором 10 см^2. Паспортные характеристики спектрометра:

- Энергетическое разрешение = 40 кэВ.
- Диапазон энергий для альфа-частиц = 2… 9 МэВ.
- Минимальная определяемая активность = 0,1 Бк.
- Диапазон давления в вакуумной камере = 0,4… 2 мм рт. ст.
- Фоновая скорость счета ≤ 100 импульсов в сутки.

Основные результаты и обсуждение

Плутоний характеризуется наиболее разнообразными химическими свойствами в водных растворах. Согласно [15], в водных растворах он может существовать в пяти различных степенях окисления:

- Pu (III), в форме Pu^{3+},
- Pu (IV), в форме Pu^{4+},
- Pu (V), в форме PuO_2^{+},
- Pu (VI), в форме PuO_2^{2+},
- Pu (VII), в форме PuO_5^{3-}.

Из перечисленных форм PuO_5^{3-} получить наиболее сложно – для этого плутоний окисляют сильными окислителями типа озон в щелочной среде. Характерной особенностью поведения плутония в водных растворах является возможность его существования в нескольких степенях окисления одновременно. Это объясняется близостью его окислительно-восстановительных потенциалов для степеней окисления от +3 до +6, что связано с наличием 5f-

электронов, расположенных на локализованной и делокализованной зоне электронной орбитали. Такое поведение электронов приводит к протеканию следующего комплекса окислительно-восстановительных реакций [16]:

$$3Pu^{4+} + 2H_2O \Leftrightarrow 2Pu^{3+} + PuO_2^{+} + 4H^{+}$$

$$2PuO_2^{+} + 4H^{+} \Leftrightarrow Pu^{4+} + PuO_2^{2+} + 2H_2O$$

$$Pu^{4+} + PuO_2^{+} \Leftrightarrow Pu^{3+} + PuO_2^{2+}$$

В отсутствие окислителей и восстановителей в области pH 5 – 8 в растворе доминирует форма PuO_2^{+}, которая обладает максимальной устойчивостью среди прочих степеней окисления. Тем не менее другие формы плутония также будут присутствовать в растворе, что затруднит интерпретацию данных по сорбции. Наилучшим образом это иллюстрирует схема, приведенная на рис. 2.

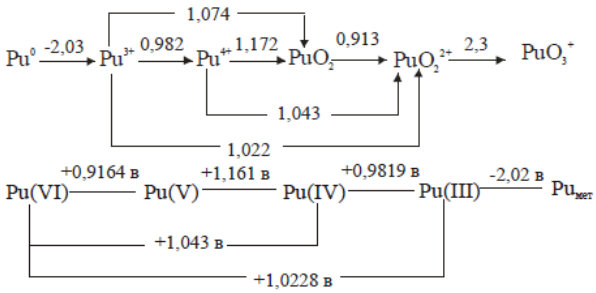

Рисунок 2 - Формальные окислительные потенциалы плутония в 1М $HClO_4$

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.2

Примечание: [16]

Таким образом, для адекватного проведения экспериментов по сорбции было необходимо стабилизировать плутоний в одной из степеней окисления. В наших исследованиях стабилизацию плутония в форме Pu^{3+} осуществляли введением соли Мора и сульфаминовой кислоты. Стабилизацию формы Pu^{4+} в растворе осуществляли введением нитрита натрия. Стабилизацию PuO_2^{+} в широком интервале pH осуществить практически невозможно, а для стабилизации PuO_2^{2+} требуются достаточно сильные окислители (перманганат калия, дихромат калия), которые будут интенсивно взаимодействовать со слоем диоксида марганца на поверхности сорбентов, поэтому данные формы плутония не исследовали.

Первым этапом было изучение влияния pH раствора на сорбцию микроколичеств Pu^{3+} и Pu^{4+} на сорбенте MnO_2–ТАЦ; объем раствора составлял 20 мл, время сорбции – 7 суток. Результаты приведены на рис. 3.

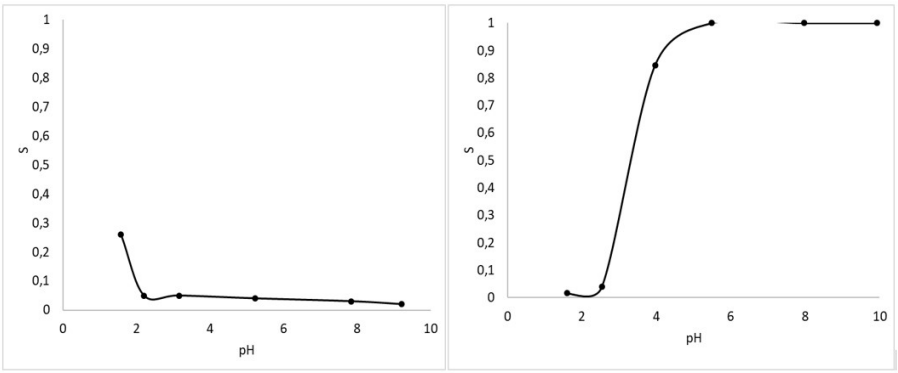

Рисунок 3 - Зависимости степени сорбции Pu^{3+} (а) и Pu^{4+} (б) на сорбенте MnO_2–ТАЦ

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.3

Результаты показали существенные различия кривых зависимости сорбции микроколичеств Pu^{3+} и Pu^{4+} на сорбенте MnO_2-ТАЦ. Для Pu^{4+} характерна классическая S-образная зависимость, при этом максимум сорбции близкий к 100% достигается при pH > 5. Напротив, сорбция Pu^{3+} была низкой (2 – 5%) практически во всем интервале pH, несколько возрастая до 25% при pH = 1,6. Таким образом, сорбционное поведение Pu^{4+} было сходным с поведением радия и урана, а поведение Pu^{3+} – напротив было близко к поведению Th^{4+}. Возможно, что полученные результаты можно объяснить частичным окислением плутония в результате сорбции на сорбенте MnO_2-ТАЦ: стандартный потенциал пары MnO_2 / Mn^{2+} составляет +1,23 В, что достаточно для окисления плутония до степеней окисления +4, +5 и +6. Судя по характеру кривых, вероятно, что при сорбции Pu^{3+} на MnO_2-ТАЦ происходило его окисление до Pu^{4+}, в результате чего ход кривой был аналогичен зависимости, полученной для Th^{4+}. При сорбции Pu^{4+} происходило более

глубокое окисление плутония до PuO_2^+, либо более вероятно – до PuO_2^{2+}, поскольку ранее было показано, что зависимости сорбции NpO_2^+ и UO_2^{2+} от pH имеют классический S-образный вид, как и в случае Pu^{4+}. Более строгие доказательства протекания этих возможных процессов окисления плутония на поверхности слоя диоксида марганца требуют привлечения таких высокотехнологичных методов исследования как EXAFS и XANES, а также проведения экспериментов с большими концентрациями плутония, что невозможно осуществить в условиях нашей лаборатории. Тем не менее, полученные альфа-спектры (рис. 4) и зависимость ШППВ от pH (рис. 5) также косвенно указывают на сложность протекающих при сорбции процессов.

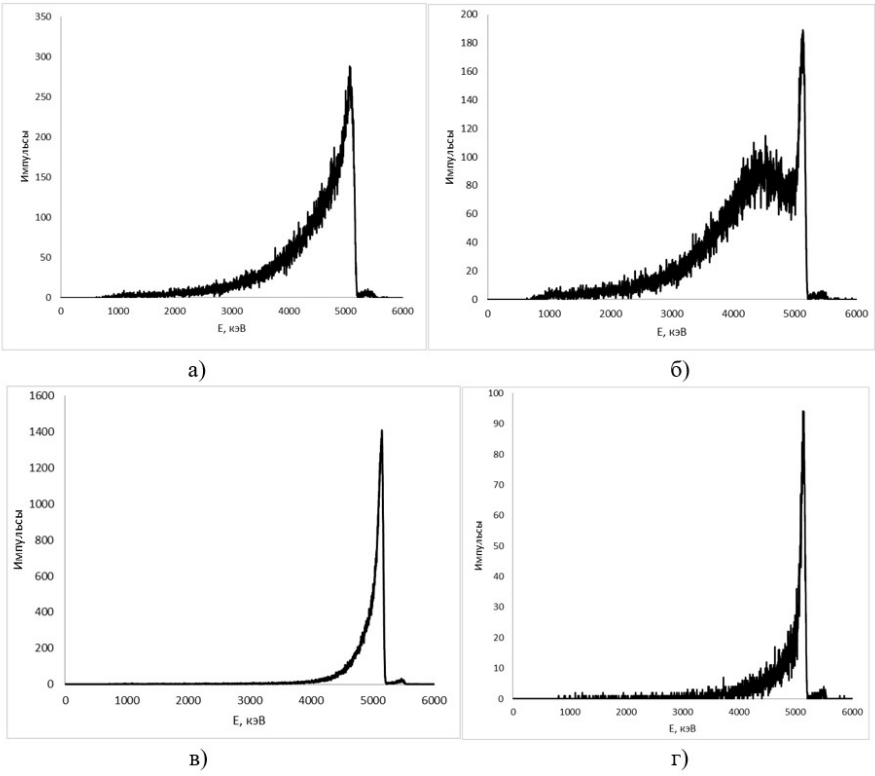

Рисунок 4 - Альфа-спектры сорбента MnO_2–ТАЦ после сорбции Pu^{4+}, время сорбции – 1 неделя
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.4

Примечание: а) из растворов с pH = 4; б) из растворов с pH = 5,5; в) из растворов с pH = 8; г) из растворов с pH = 10

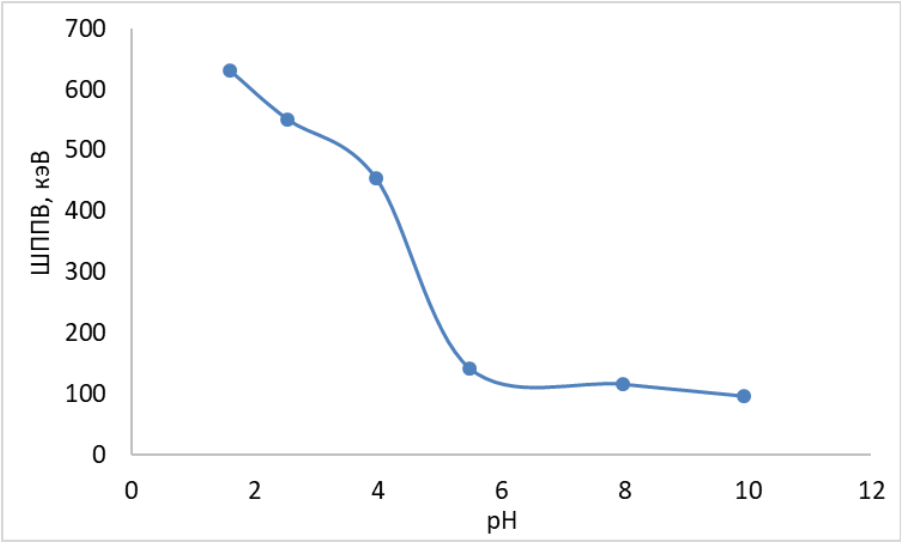

Рисунок 5 - ШППВ альфа-пиков Pu-239 в зависимости от pH раствора
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.5

Видно, что, несмотря на практически одинаковую степень сорбции плутония (80 – 98%), вид альфа-спектров сорбента MnO_2–ТАЦ после сорбции Pu^{4+} из растворов с разным значением pH сильно отличался. При pH = 8 – 10 пики плутония имели хорошее разрешение, однако с ростом кислотности раствора величина ШППВ сильно увеличивалась, что прямо указывает на снижение подвижности плутония в слое сорбента MnO_2–ТАЦ с ростом pH. Наиболее вероятно, что этот феномен связан с гидролизом плутония: с ростом pH растет устойчивость гидроксокомплексов, обладающих большим размером, что снижает диффузию плутония вглубь слоя диоксида марганца. Поворотной точкой в данном процессе является pH ~ 5,5: вид альфа-спектра указывает на наличие двух адсорбированных форм плутония с различной подвижностью. При этом характер полученных альфа-спектров косвенно подтверждает предположение об окислении плутония в результате сорбции, т.к. pH начала гидролиза (~ 5,5) существенно ближе к таковому для UO_2^{2+}, чем к Th^{4+}, для которого интенсивное протекание гидролиза характерно уже при pH ~ 1.

Также были получены кинетические кривые сорбции Pu^{4+} при различных температурах раствора (рис. 6, 7). Объем раствора составлял 20 мл, pH = 6.

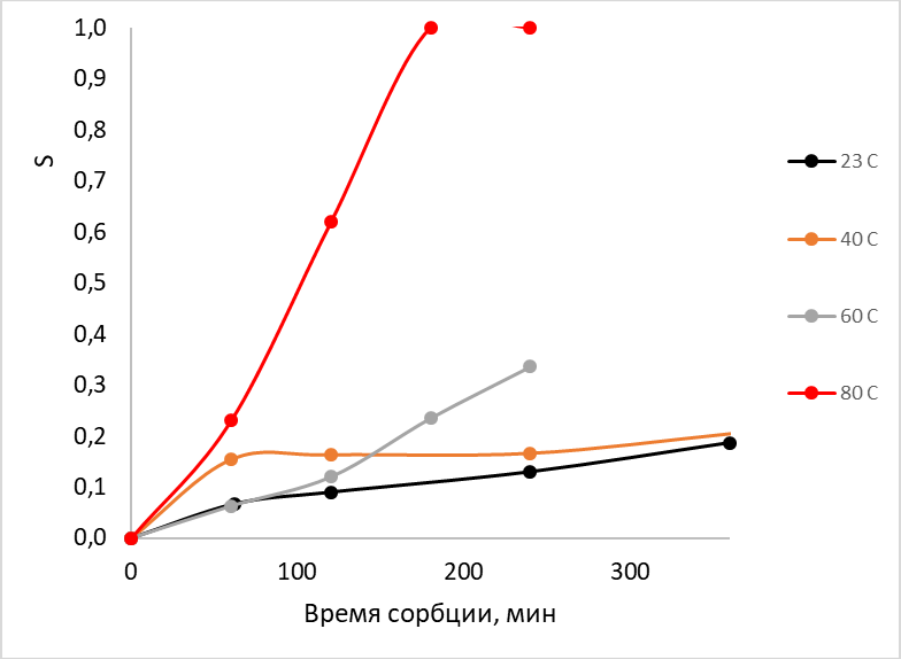

Рисунок 6 - Кинетические кривые сорбции Pu^{4+} на сорбенте MnO_2–ТАЦ при различных температурах раствора

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.6

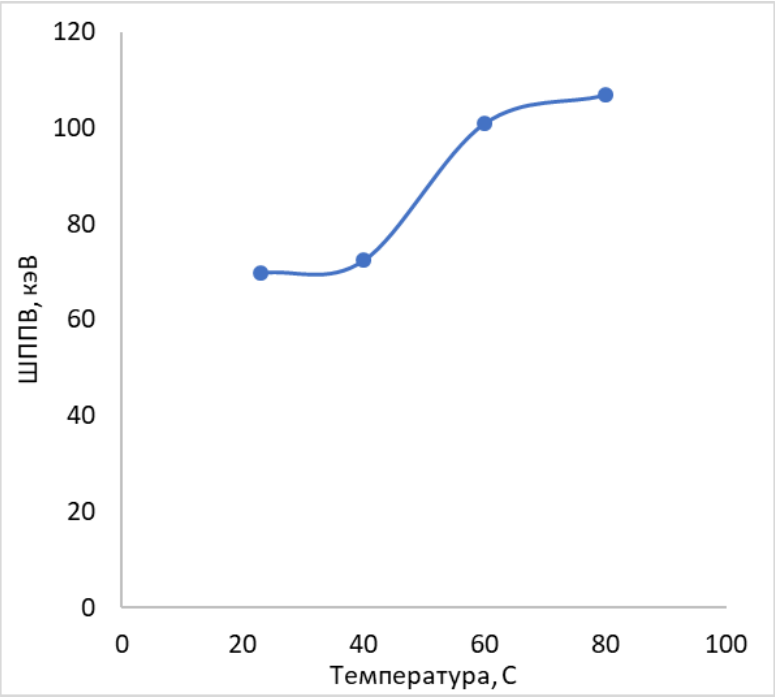

Рисунок 7 - Зависимость ШППВ пика Pu-239 от температуры для времени сорбции 4 часа
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.7

Как и следовало ожидать, скорость сорбции плутония заметно росла с ростом температуры, причем особенно сильный рост наблюдался при 80 ºС – уже за 3 часа достигалась практически 100% сорбция. Величина ШППВ также возрастала с увеличением температуры раствора, что говорит об ускорении диффузии плутония вглубь сорбента MnO_2–ТАЦ.

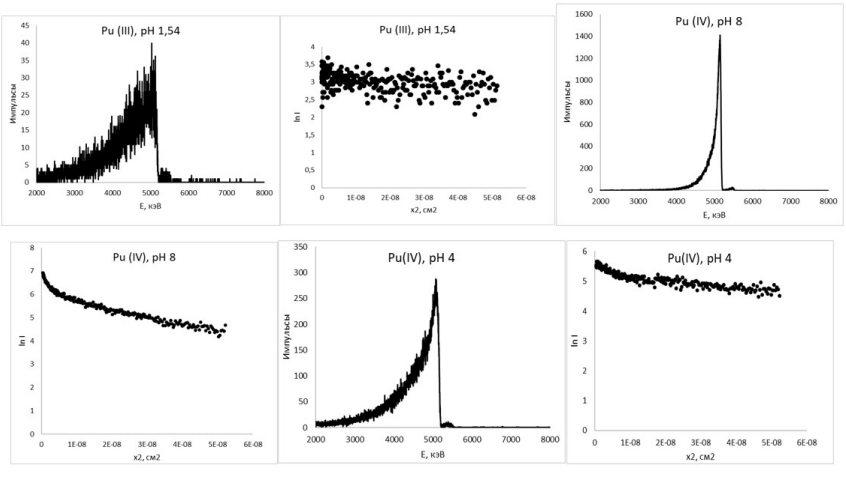

Рисунок 8 - Альфа-спектры плутония-239 на сорбенте MnO_2-ТАЦ, полученные при различных условиях, и результаты их линеаризации (время сорбции – 7 суток)
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.169.8

Ранее в статье [17] авторами была показана принципиальная возможность оценки коэффициентов диффузии альфа-излучателей в плоских образцах путем математической обработки полученных альфа-спектров. Теоретическое обоснование метода основано на том, что для альфа-частиц характера прямолинейная траектория полета, при этом, проходя через вещество, частицы совершает десятки тысяч соударений, постепенно теряя энергию. Поэтому, зная линейные потери энергии альфа-частиц в твердом теле и фактически зарегистрированную энергию альфа-частицы от известного альфа-излучателя, можно оценить потери энергии для конкретной альфа-частицы и, следовательно, глубину, с которой она была испущена. Альфа-спектр, в свою очередь, дает распределение количества альфа-излучателя по глубине слоя плоского образца, что дает возможность оценить скорость диффузии при известном времени сорбции.

Для получения данных по диффузии плутония были взяты три наиболее интересных альфа-спектра:

1) спектр MnO_2-ТАЦ после сорбции Pu^{3+} из раствора с pH = 1,56 при времени сорбции 1 неделя (наиболее информативный спектр, полученный для трехвалентного плутония);

2) спектр MnO_2-ТАЦ после сорбции Pu^{4+} из раствора с pH = 8 при времени сорбции 1 неделя (соответствует сорбции гидролизованных форм плутония (IV));

3) спектр MnO_2-ТАЦ после сорбции Pu^{4+} из раствора с pH = 4 при времени сорбции 1 неделя (соответствует сорбции негидролизованных форм плутония (IV))

По результатам линейной обработки полученных кривых (см. рис. 8) было рассчитано, что коэффициенты диффузии составляют: 6,6·10-18 м^2/с для Pu^{3+}, 2,6·10-18 м2/с для Pu^{4+} при сорбции из раствора с pH = 4 и 1,2·10-18 м^2/с для Pu^{4+}. Ранее было высказано предположение об окислении плутония диоксидом марганца в процессе сорбции с Pu^{3+} до Pu^{4+} и с Pu^{4+} до PuO^{2+} либо PuO_2^{2+}. Полученные значения коэффициентов диффузии вполне согласуются с этим предположением. Поскольку ионный радиус, непосредственно влияющий на подвижность ионов, уменьшается с ростом положительного заряда катиона, радиус Pu^{4+} должен быть существенно меньше, чем радиус PuO^{2+} и PuO_2^{2+}, что хорошо соотносится с резким увеличением коэффициента диффузии для сорбированного Pu^{3+} по сравнению с сорбированным Pu^{4+}. В случае сорбции Pu^{4+} снижение диффузии при увеличении pH раствора хорошо объясняется гидролизом плутония в слабокислой и нейтральной среде.

Заключение

В работе была изучена сорбция плутония-239 на тонкослойном неорганическом сорбенте MnO_2-ТАЦ. Показано, что для Pu^{4+} была характерна классическая S-образная зависимость степени сорбции от pH, при этом максимум сорбции близкий к 100% достигается при pH > 5. Напротив, сорбция Pu^{3+} была низкой (2 – 5%) практически во всем интервале pH, несколько возрастая до 25% при pH = 1,6. В соответствии с ранее полученными данными сорбционное поведение Pu^{4+} было сходным с поведением Ra^{2+} и UO_2^{2+}, а поведение Pu^{3+} – напротив было близко к поведению Th^{4+}. Наиболее вероятно, полученные результаты можно объяснить частичным окислением плутония в процессе сорбции на сорбенте MnO_2-ТАЦ, что косвенно подтверждается значениями стандартных ОВ потенциалов для марганца и плутония. Путем математической обработки полученных альфа-спектров плутония-239 на сорбенте MnO_2-ТАЦ были оценены коэффициенты диффузии плутония в диоксиде марганца: $6{,}6\cdot10^{-18}$ м^2/с для Pu^{3+}, $2{,}6\cdot10^{-18}$ м^2/с для Pu^{4+} при сорбции из раствора с pH = 4 и $1{,}2\cdot10^{-18}$ м^2/с для Pu^{4+}. Результаты по диффузии плутония в пределах порядка величины близки к ранее полученным результатам для других альфа-излучателей, таких как уран-233, радий-223, нептуний-237, торий-230. Полученные значения коэффициентов диффузии соответствуют зернограничной диффузии плутония в поровом пространстве сорбента.

Финансирование

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части госзадания, проект № FEUZ-2023-0013.

Funding

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the basic part of the state task, project no. FEUZ-2023-0013.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Иванец А.И. Сорбция ионов стронция мезопористым оксидом марганца типа OMS-2 / А.И. Иванец, Л.Л. Кацошвили, П.В. Кривошапкин [и др.]. // Радиохимия. — Т. 59. — № 3. — 2017. — С. 230-236.

2. White D.A. Synthesis of a Manganese Dioxide Silica Hydrous Composite and Its Properties as a Sorption Material for Strontium / W.D. White, R. Labayru // Industrial & Engineering Chemistry Research. — Vol. 30. — 1991. — P. 207-210.

3. Kamran U. Chemically Modified Activated Carbon Decorated with MnO2 Nanocomposites for Improving Lithium Adsorption and Recovery from Aqueous Media / U. Kamran, Y.-J. Heo, J. W. Lee [et al.]. // Journal of Alloys and Compounds. — Vol. 794. — 2019. — P. 425-434

4. Shima J. Sustainable Removal of Pernicious Arsenic and Cadmium by a Novel Composite of MnO2 Impregnated Alginate Beads: A cost-effective approach for wastewater treatment / J. Shima, M. Kumar, S. Mukherjee [et al.]. // Journal of Environmental Management. — Vol. 234. — 2019. — P. 8-20.

5. Valsala T.P. Separation of Strontium from Low Level Radioactive Waste Solutions Using Hydrous Manganese Dioxide Composite Materials / T.P. Valsala, A. Joseph, N.L. Sonar [et al.]. // Journal of Nuclear Materials. — Vol. 404. — 2010. — P. 138-143.

6. Rao S.V.S. Treatment of Liquid Wastes Using Composite Resins / S.V.S. Rao, A.G.S. Mani, S. Karua [et al.] // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 307. — 2016. — P. 463-469.

7. Велешко А.Н. Сорбция радионуклидов композитными материалами на основе природного биополимера Микотон из растворов / А.Н. Велешко, С.А. Кулюхин, И.Е. Велешко [и др.]. // Радиохимия. — Т. 50. — № 5. — 2008. — С. 439-445.

8. Yang Z. Preparation of BSA Surface Imprinted Manganese Dioxide-loaded Tubular Carbon Fibers with Excellent Specific Rebinding to Target Protein / Z. Yang, J. Chen, K. Yang [et al.]. // Journal of Colloid and Interface Science. — Vol. 570. — 2020. — P. 182-196.

9. Zuba I. Application of MnO2 Resin and Dowex 1X8 Manganese Dioxide Impregnated Resin for the Separation of Chromium from Biological Samples / I. Zuba, H. Polkowska-Motrenko // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 322. — 2019. — P. 969-974.

10. Karamanis D. Determination of 226Ra in Aqueous Solutions via Sorption on Thin Films and α-spectrometry / D. Karamanis, K. G. Ioannides, K. C. Stamoulis // Analytica Chimica Acta. — Vol. 573-574. — 2006. — P. 319-327.

11. Ra-NucFilm Disc. — URL: https://www.triskem-international.com/scripts/files/59bd7516ebe5f0.12161231/ft_nucfilmdiscs_en_151210.pdf (accessed: 15.02.2022)

12. Семенищев В.С. Изучение закономерностей осаждения тонких сорбционно-активных пленок диоксида марганца на различных полимерных носителях / В.С. Семенищев, В.Ю. Оглезнева, С.М. Титова [и др.]. // Сорбционные и хроматографические процессы. — Т. 21. — № 3. — 2021. — С. 380-390.

13. Semenishchev V.S. The Study of Radium and Polonium Sorption by a Thin-layer MnO2-CTA Sorbent / V.S. Semenishchev, L.A. Tomashova, S.M. Titova [et al.]. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 327(2). — 2021. — P. 997-1003.

14. Reilly S.D. Plutonium (VI) Sorption to Manganese Dioxide / S.D. Reilly, W.K. Myers, S.A. Stout [et al.]. // AIP Conference Proceedings. — Vol. 673. — 2003. — P. 375.

15. Каца Дж. Химия актиноидов: в 3-х т. Т. 2 / Дж. Каца; под ред. Г. Сиборга, Л. Морсса. — М. Мир: 1991. — 573 с.

16. Бекман И.Н. Плутоний: Учебное пособие / И.Н. Бекман. — М.: МГУ, 2009. — URL: http://profbeckman.narod.ru/PlutonSS.htm (дата обращения: 19.02.2022)

17. Semenishchev V.S. A New Method for Evaluation of Diffusion Coefficients of Alpha Emitters via Mathematical Treatment of Alpha Spectra / V.S. Semenishchev, E.V. Polyakov, E.N. Kulyashova [et al.]. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 332(1). — 2023. — P. 153-165.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ivanec A.I. Sorbciya ionov stronciya mezoporistym oksidom marganca tipa OMS-2 [Sorption of Strontium Ions with Mesoporous Manganese oOxide of the OMS-2 Type] / A.I. Ivanec, L.L. Kacoshvili, P.V. Krivoshapkin [et al.]. // Radiohimiya [Radiochemistry]. — V. 59. — № 3. — 2017. — P. 230-236 [in Russian].

2. White D.A. Synthesis of a Manganese Dioxide Silica Hydrous Composite and Its Properties as a Sorption Material for Strontium / W.D. White, R. Labayru // Industrial & Engineering Chemistry Research. — Vol. 30. — 1991. — P. 207-210.

3. Kamran U. Chemically Modified Activated Carbon Decorated with MnO2 Nanocomposites for Improving Lithium Adsorption and Recovery from Aqueous Media / U. Kamran, Y.-J. Heo, J. W. Lee [et al.]. // Journal of Alloys and Compounds. — Vol. 794. — 2019. — P. 425-434

4. Shima J. Sustainable Removal of Pernicious Arsenic and Cadmium by a Novel Composite of MnO2 Impregnated Alginate Beads: A cost-effective approach for wastewater treatment / J. Shima, M. Kumar, S. Mukherjee [et al.]. // Journal of Environmental Management. — Vol. 234. — 2019. — P. 8-20.

5. Valsala T.P. Separation of Strontium from Low Level Radioactive Waste Solutions Using Hydrous Manganese Dioxide Composite Materials / T.P. Valsala, A. Joseph, N.L. Sonar [et al.]. // Journal of Nuclear Materials. — Vol. 404. — 2010. — P. 138-143.

6. Rao S.V.S. Treatment of Liquid Wastes Using Composite Resins / S.V.S. Rao, A.G.S. Mani, S. Karua [et al.] // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 307. — 2016. — P. 463-469.

7. Veleshko A.N. Sorbciya radionuklidov kompozitnymi materialami na osnove prirodnogo biopolimera Mikoton iz rastvorov [Sorption of Radionuclides by Composite Materials Based on the Natural Biopolymer Mycotone from Solutions] / A.N. Veleshko, S.A. Kulyuhin, I.E. Veleshko [et al.]. // Radiohimiya [Radiochemistry]. — V. 50. — № 5. — 2008. — P. 439-445 [in Russian].

8. Yang Z. Preparation of BSA Surface Imprinted Manganese Dioxide-loaded Tubular Carbon Fibers with Excellent Specific Rebinding to Target Protein / Z. Yang, J. Chen, K. Yang [et al.]. // Journal of Colloid and Interface Science. — Vol. 570. — 2020. — P. 182-196.

9. Zuba I. Application of MnO2 Resin and Dowex 1X8 Manganese Dioxide Impregnated Resin for the Separation of Chromium from Biological Samples / I. Zuba, H. Polkowska-Motrenko // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 322. — 2019. — P. 969-974.

10. Karamanis D. Determination of 226Ra in Aqueous Solutions via Sorption on Thin Films and α-spectrometry / D. Karamanis, K. G. Ioannides, K. C. Stamoulis // Analytica Chimica Acta. — Vol. 573-574. — 2006. — P. 319-327.

11. Ra-NucFilm Disc. — URL: https://www.triskem-international.com/scripts/files/59bd7516ebe5f0.12161231/ft_nucfilmdiscs_en_151210.pdf (accessed: 15.02.2022)

12. Semenishchev V.S. Izuchenie zakonomernostej osazhdeniya tonkih sorbcionno-aktivnyh plenok dioksida marganca na razlichnyh polimernyh nositelyah [Study of the Regularities of the Discussion of Thin Sorption-active Films of Manganese Dioxide on Vvarious Polymer Carriers] / V.S. Semenishchev, V.YU. Oglezneva, S.M. Titova [et al.]. // Sorbcionnye i hromatograficheskie process [Sorption and Chromatographic Processes]. — V. 21. — № 3. — 2021. — P. 380-390 [in Russian].

13. Semenishchev V.S. The Study of Radium and Polonium Sorption by a Thin-layer MnO2-CTA Sorbent / V.S. Semenishchev, L.A. Tomashova, S.M. Titova [et al.]. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 327(2). — 2021. — P. 997-1003.

14. Reilly S.D. Plutonium (VI) Sorption to Manganese Dioxide / S.D. Reilly, W.K. Myers, S.A. Stout [et al.]. // AIP Conference Proceedings. — Vol. 673. — 2003. — P. 375.

15. Kaca Dzh. Himiya aktinoidov: v 3-h t. T. 2 [Chemistry of Actinoids: in 3 vols. 2 vol.] / Dzh. Kaca; ed. by G. Siborga, L. Morssa. — M. Mir: 1991. — 573 p. [in Russian]

16. Bekman I.N. Plutonij: Uchebnoe posobie [Plutonium: A textbook] / I.N. Bekman. — M.: MSU, 2009. — URL: http://profbeckman.narod.ru/PlutonSS.htm (accessed: 19.02.2022) [in Russian]

17. Semenishchev V.S. A New Method for Evaluation of Diffusion Coefficients of Alpha Emitters via Mathematical Treatment of Alpha Spectra / V.S. Semenishchev, E.V. Polyakov, E.N. Kulyashova [et al.]. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — Vol. 332(1). — 2023. — P. 153-165.