

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 541.183+553.551.4+628.54

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-4-302-312>

Поступило в редакцию 22.07.2026

Received 22.07.2026

И. Л. Шашкова, Н. В. Китикова, член-корреспондент А. И. Иванец*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь
ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь***АДСОРБЦИОННЫЕ И СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА КАРБОНАТНЫХ
И ФОСФАТНЫХ СОРБЕНТОВ В ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ
Cs⁺, Sr²⁺, Co²⁺-СОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРАХ**

Аннотация. Представлены результаты исследования очистки трехкомпонентных растворов, содержащих ионы Cs⁺, Sr²⁺, Co²⁺, карбонатными и фосфатными сорбентами, полученными из природного доломита путем термической активации при 800 °С (Д-800), фосфатированием (ФД) и фосфатированием с последующей модификацией солями цирконии (ФД-Zr). Изучена селективность и эффективность сорбентов в трехкомпонентном растворе, в том числе при последовательном применении в несколько стадий. Установлено, что синтезированные сорбенты обладают различной селективностью к ионам Cs⁺, Sr²⁺, Co²⁺. Карбонатные и фосфатные сорбенты Д-800 и ФД в трехкомпонентной смеси селективно сорбируют ионы двухвалентных металлов Sr²⁺ и Co²⁺. ФД-Zr не проявляет селективности ни к одному из ионов. Ряды эффективности сорбции к изученным ионам для Д-800: Co > Sr, для сорбента ФД: Co > Sr >> Cs и для ФД-Zr: Co > Sr > Cs. Установлено, что наиболее эффективная очистка трехкомпонентного раствора (степень извлечения ~98–100 %) достигается путем комбинации карбонатных и фосфатных сорбентов на разных стадиях очистки. После комбинированной трехстадийной очистки раствора остаточные концентрации ионов Co²⁺ ниже предела обнаружения, а ионов Sr²⁺ и Cs⁺ составляют 0,02 и 0,31 мг/л соответственно.

Ключевые слова: неорганические сорбенты, доломит термообработанный, фосфаты Ca–Mg, фосфаты Zr–Ca–Mg, кобальт, стронций, цезий, адсорбция, многостадийная очистка

Для цитирования. Шашкова, И. Л. Адсорбционные и селективные свойства карбонатных и фосфатных сорбентов в трехкомпонентных Cs⁺, Sr²⁺, Co²⁺-содержащих растворах / И. Л. Шашкова, Н. В. Китикова, А. И. Иванец // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 4. – С. 302–312. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-4-302-312>

Irina L. Shashkova, Natalja V. Kitikova, Corresponding Member Andrei I. Ivanets*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***ADSORPTION AND SELECTIVE PROPERTIES OF CARBONATE AND PHOSPHATE SORBENTS
IN THREE-COMPONENT Cs⁺, Sr²⁺, Co²⁺-CONTAINING SOLUTIONS**

Abstract. This paper presents the results of a study on the purification of three-component solutions containing Cs⁺, Sr²⁺, and Co²⁺ ions using carbonate and phosphate sorbents obtained from natural dolomite by thermal activation at 800 °C (D-800), phosphating (PD), and phosphating followed by modification with zirconyl salts (PD-Zr). The selectivity and efficiency of sorbents in a three-component solution were studied, including sequential application in multiple stages. It was found that the synthesized sorbents exhibit varying selectivity for Cs⁺, Sr²⁺, and Co²⁺ ions. Carbonate and phosphate sorbents D-800 and PD selectively sorb divalent metal ions Sr²⁺ and Co²⁺ in a three-component mixture. PD-Zr exhibits no selectivity for any of the ions. The sorption efficiency for the studied ions is as follows: for D-800: Co > Sr, for PD: Co > Sr >> Cs, and for PD-Zr: Co > Sr > Cs. It was found that the most effective purification of a three-component solution (recovery rate of ~98–100 %) is achieved by combining carbonate and phosphate sorbents at different purification stages. After a combined

three-stage purification of the solution, residual concentrations of Co^{2+} ions are below the detection limit, while those of Sr^{2+} and Cs^+ ions are 0.02 and 0.31 mg/L, respectively.

Keywords: inorganic sorbents, heat-treated dolomite, Ca–Mg phosphates, Zr–Ca–Mg phosphates, cobalt, strontium, cesium, adsorption, multi-stage purification

For citation. Shashkova I. L., Kitikova N. V., Ivanets A. I. Adsorption and selective properties of carbonate and phosphate sorbents in three-component Cs^+ , Sr^{2+} , Co^{2+} -containing solutions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 4, pp. 302–312 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-4-302-312>

Введение. Ионы Cs^+ , Sr^{2+} и Co^{2+} являются стабильными аналогами наиболее распространенных радионуклидов, одновременно присутствующих в жидких радиоактивных отходах и обеспечивающих основную дозовую активность. Поэтому изучение очистки как однокомпонентных растворов, содержащих ионы Co^{2+} [1–3], Sr^{2+} [4; 5] и Cs^+ [6–8], так и многокомпонентных в различных сочетаниях [9–12] является предметом повышенного интереса. При этом используются различные сорбенты, ионообменные смолы, а также неорганические иониты, в частности природные и синтетические цеолиты и глины, оксидные и фосфатные сорбенты. Большинство рассмотренных сорбентов не обладает выраженной селективностью к ионам Cs^+ , Sr^{2+} , Co^{2+} , но различаются по эффективности их поглощения. По эффективности извлечения глинистыми, оксидными и фосфатными сорбентами ионы располагаются в ряд $\text{Co}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Cs}^+$, а на цеолитах – $\text{Cs}^+ > \text{Sr}^{2+} > \text{Co}^{2+}$. По отношению к ионам Cs^+ наибольшую селективность проявляют ферроцианидные сорбенты [6; 7], а также фосфаты циркония и титана [8; 13]. Селективными свойствами к ионам Sr^{2+} обладают оксиды марганца определенной структуры [4]. Ионы Co^{2+} могут быть извлечены различными методами [2], а среди сорбентов высокой эффективностью обладают цеолиты, оксиды металлов и другие соединения [1]. Селективные сорбенты дорогостоящие, их достаточно сложно синтезировать, а, например, ферроцианидные обладают свойствами, затрудняющими их применение без носителя [7]. Поглощение ионов уменьшается в смеси, в сравнении с однокомпонентными растворами, а также в присутствии фоновых электролитов [10]. На глинистых сорбентах, а также модифицированном фосфатами монтмориллоните и на ионообменной смоле присутствие как Co, так и Cs оказывает сильное влияние на сорбцию Sr^{2+} . В то же время присутствие Sr оказывает незначительное влияние на сорбцию Co глинистыми почвами. Присутствие в растворе Co и Sr препятствует сорбции Cs практически всеми перечисленными выше сорбентами широкого спектра действия [10] по причине преимущественного поглощения Co.

Поскольку различные ионы в смеси сильно отличаются по свойствам, трудно достичь полного извлечения всех ионов одним сорбентом из многокомпонентных растворов. Одним из возможных вариантов очистки таких смешанных растворов радионуклидов или ионов тяжелых металлов является использование композиционных сорбентов, состоящих из нескольких компонентов, эффективных (селективных) к различным ионам или группе ионов [10; 14–16], в том числе в варианте многостадийной очистки с использованием на разных стадиях различных сорбентов [10]. В состав смеси сорбентов часто включают карбонаты [14; 16] и фосфаты [10; 15]. При этом практически всеми авторами отмечается повышение эффективности извлечения ионов из многокомпонентных растворов при использовании смеси сорбентов.

Путем термической и химической активации природного доломита нами синтезирован ряд недорогих сорбентов, проявляющих высокую эффективность при извлечении ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ . Композиционный Zr–Ca–Mg фосфатный сорбент поглощает Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ из раствора [11; 13], но глубокое извлечение Cs^+ и Sr^{2+} достигается после удаления кобальта. Ca–Mg фосфатные и карбонатные сорбенты хорошо сорбируют ионы Co и Sr в однокомпонентных растворах [3; 5], в то время как поглощение ими ионов Cs^+ из раствора существенно ниже. Их сорбционная активность в многокомпонентных растворах не изучена. В литературе имеются единичные данные о применении смеси адсорбентов для извлечения радионуклидов трансурановых элементов [17], а также катионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ из раствора и показана высокая эффективность сочетания цеолита с биогенным апатитом и алюминийсодержащими промышленными отходами [10].

Цель работы – исследование адсорбционных и селективных свойств карбонатных и фосфатных сорбентов из природного доломита в процессе очистки трехкомпонентных растворов от ионов Co^{2+} , Sr^{2+} , Cs^+ , в том числе используя многостадийную очистку карбонатными и фосфатными сорбентами в различных комбинациях и концентрациях.

Материалы и методы исследования. Сорбенты для исследования получали из природного доломитового щебня месторождения Руба (Витебская область, Республика Беларусь). Получение термически активированного при 800 °С доломита (Д-800), его фосфатированной модификации (ФД) и композиционного сорбента Zr–Ca–Mg (ФД-Zr) описано в наших предыдущих работах [3; 11]. При проведении циклической очистки на различных этапах использовали как однокомпонентные сорбенты, так и смеси ФД с Д-800 в соотношении 1 : 1.

Фазовый состав синтезированных сорбентов и продуктов сорбции определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре D8 Advanced (Bruker, Германия) с использованием CuK_α излучения (диапазон 2Θ 5–70°). Химический состав образцов определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S8 TIGER Series 2 (Bruker, Германия). Для проведения анализа образец спрессовывали в таблетку диаметром 4,0 см под давлением 0,25 МПа.

Адсорбцию ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ проводили из трехкомпонентных растворов, содержащих эквимольные концентрации каждого из ионов – около 0,11 ммоль/л (Co^{2+} , $C_0 = 6,55$ мг/л; Sr^{2+} , $C_0 = 9,82$ мг/л; Cs^+ , $C_0 = 14,95$ мг/л). Для приготовления модельных растворов использовали химические реактивы $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ (чда), $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (чда), CsCl (хч).

Изучение очистки растворов от ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ проводили методом статической адсорбции при температуре 20 °С. В зависимости от условий эксперимента навеску сорбента массой 0,025–0,080 г помещали в раствор объемом 20–60 мл и при постоянном перемешивании на орбитальном шейкере PSU 20iBiosan (200 об/мин) выдерживали в течение 24 ч. После каждого цикла очистки осадок отделяли от фильтрата на бумажном фильтре, отбирали определенный объем фильтрата, в том числе на параллельные опыты, и к нему прибавляли свежую порцию сорбента, масса которой зависела от заданного значения V/m . Фильтраты после каждого этапа очистки анализировали на остаточное содержание ионов металлов и pH растворов.

Очистку трехкомпонентных растворов проводили в одну стадию каждым из сорбентов, а также в две и три стадии, варьируя применяемые сорбенты на различных этапах и соотношение V/m , мл/г (или концентрацию сорбента, г/л). В первой серии экспериментов (№ 1–5) проводили одно- и двухстадийную очистку с одинаковой концентрацией сорбентов (1 г/л) на первой и второй стадии различными сорбентами. Во второй серии экспериментов (№ 7–12) на первом этапе также концентрация сорбентов составляла 1 г/л. На второй стадии использовали только сорбент ФД-Zr, увеличивая его количество в 2 и 4 раза, т. е. до 2 и 4 г/л. Таким образом, на первом этапе во всех случаях значение V/m составляло 1000 мл/г, а на втором – 500 и 250 мл/г соответственно. По сумме двух этапов концентрация составила 3 и 5 г/л. Дополнительно был проведен эксперимент № 6 с максимальными навесками сорбентов, при которых в одно- и трехкомпонентных растворах сорбентом ФД-Zr была достигнута максимальная степень очистки [11].

В третьей серии опытов проводили трехстадийную очистку с использованием на первой стадии сорбентов ФД и смеси ФД + Д-800, а на второй и третьей – ФД-Zr (№ 13–16). В этих опытах суммарная концентрация сорбентов составила 4 и 5 г/л. Для сравнения был проведен также дополнительный опыт № 17, аналогичный опыту № 16, но в одну стадию.

Для проведения РФА продуктов сорбции процесс проводили из трехкомпонентного раствора, в котором концентрация каждого из катионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ составляла по 64 ммоль/л.

Сорбцию металла оценивали по степени извлечения ионов α (%), которую рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{C_0 - C}{C_0} 100,$$

где C_0 и C (мг/л) – исходная и остаточная концентрация ионов металлов в фильтрате после сорбции.

Концентрацию ионов металлов в исходных растворах и фильтратах определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой EXPEC 6500. pH измеряли при помощи pH-метра pH-150M (Беларусь) с использованием комбинированного электрода.

Для расчетов брали среднее арифметическое двух параллельных опытов.

Результаты и их обсуждение. Одно- и двухстадийная адсорбция при постоянном соотношении $V/m = 1000$ мл/г. Согласно полученным данным, Са–Mg карбонатные и фосфатные сорбенты (Д-800 и ФД) при индивидуальном применении проявляют выраженные селективные свойства к ионам двухвалентных металлов, в большей степени к ионам Co^{2+} , чем к ионам Sr^{2+} (рис. 1, а). При одностадийной сорбции ионы Co^{2+} сорбируются из трехкомпонентного раствора практически полностью обоими сорбентами, а также их смесью. При этом наименьшее значение извлечения получено на ФД, в то время как на двух других образцах происходит полное извлечение. Очевидно также, что присутствие ионов Sr^{2+} и Cs^+ в растворе не оказывает влияния на поглощение ионов Co^{2+} .

Ионы Sr^{2+} в той или иной мере сорбируются всеми сорбентами (рис. 1, а), в меньшей степени также сорбентом ФД и в наибольшей – при использовании смеси сорбентов. Это свидетельствует о том, что смесь сорбентов обладает выраженным синергетическим эффектом, существенно превосходя по эффективности карбонатный и фосфатный сорбенты при индивидуальном применении, в частности это особенно выражено при поглощении ионов Sr^{2+} .

Наименьшая степень извлечения наблюдается в отношении ионов Cs^+ сорбентами ФД и его смесью с Д-800 и нулевая – оксидно-карбонатным сорбентом Д-800.

Соответственно, наименьшие остаточные концентрации в результате одностадийной очистки с помощью Са, Mg-сорбентов Д-800, ФД и ФД + Д-800 достигнуты по ионам Co^{2+} , а наибольшие, практически совпадающие с концентрацией в исходном растворе – по ионам Cs^+ (табл. 1). Концентрации ионов Sr^{2+} существенно снижены, но остаются достаточно высокими.

При использовании композиционного сорбента ФД-Zr для очистки трехкомпонентной смеси в такой же концентрации 1 г/л извлечение всех катионов варьирует в диапазоне от 59,6 % для ионов Cs^+ до 84,7 % для ионов Co^{2+} (рис. 1, а), что указывает на отсутствие выраженной селективности к какому-либо из ионов, с одной стороны, и с другой – на более высокую эффективность сорбента ФД-Zr при адсорбции ионов Sr^{2+} и Cs^+ по сравнению с Са–Mg карбонатными и фосфатными сорбентами. Соответственно остаточная концентрация в растворе после сорбента ФД-Zr в сравнении с сорбентами Д-800 и ФД + Д-800 по ионам Co^{2+} выше, а по ионам Sr^{2+} и Cs^+ ниже (табл. 1).

Увеличение концентрации сорбента ФД в 4 раза приводит к незначительному улучшению результатов очистки по ионам Co^{2+} и Sr^{2+} (табл. 1, опыт 6).

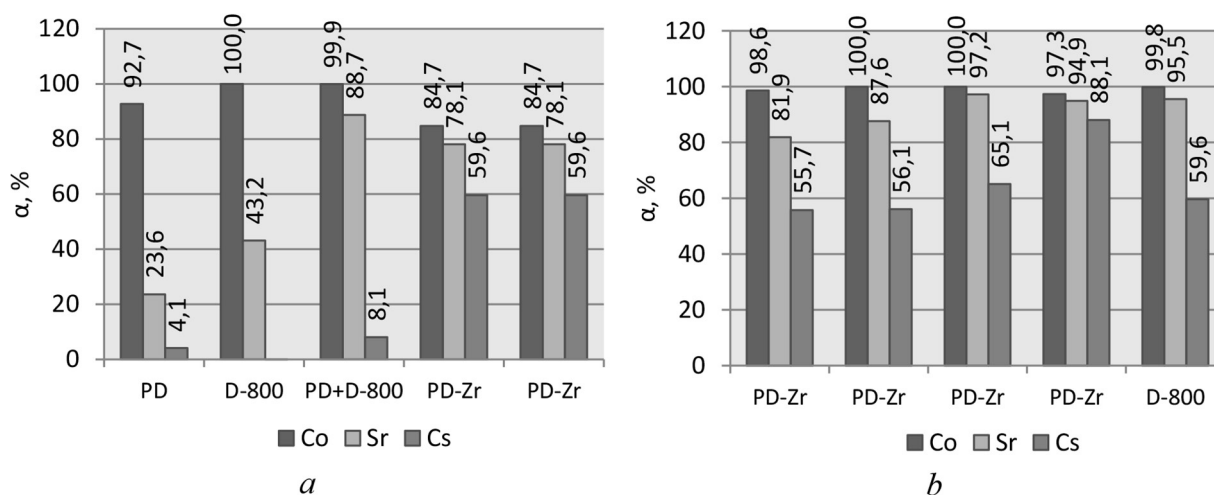


Рис. 1. Степень извлечения ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ при одно- (а) и двухстадийной (б) адсорбции с использованием сорбентов ФД (PD), Д-800 (D-800), смеси (PD + D-800) и ФД-Zr (PD-Zr) при концентрации сорбентов 1 г/л на каждом этапе

Fig. 1. The degree of extraction of Co^{2+} , Sr^{2+} and Cs^+ ions in one- (a) and two-stage (b) adsorption using sorbents PD, D-800, mixtures (PD + D-800) and PD-Zr at a sorbent concentration of 1 g/L at each stage

Т а б л и ц а 1. Равновесные концентрации ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ и pH растворов после одностадийной адсорбции фосфатными и карбонатными сорбентами

Table 1. Equilibrium concentrations of Co^{2+} , Sr^{2+} and Cs^+ ions and pH of solutions after single-stage adsorption by phosphate and carbonate sorbents

№ опыта Experiment number	Сорбент Sorbent	Концентрация сорбента, г/л Sorbent concentration, g/L	Концентрация ионов в растворе, мг/л Concentration of ions in solution, mg/L			pH
			Co^{2+}	Sr^{2+}	Cs^+	
1	ФД	1	0,477	7,50	14,33	7,48
2	Д-800	1	0,003	5,58	14,95	10,65
3	ФД + Д-800	1	0,006	1,11	13,74	9,46
4, 5	ФД-Zr	1	1,031	2,22	6,06	–
6	ФД	4	0,247	6,32	14,70	7,54

Сорбент ФД-Zr – единственный из изученных сорбентов характеризуется существенным поглощением ионов Cs^+ . Поэтому для увеличения степени извлечения ионов Sr^{2+} и Cs^+ мы провели дополнительную, вторую, стадию очистки растворов, полученных после очистки всеми сорбентами (рис. 1, а) с помощью Zr-содержащего сорбента. Анализ результатов после второй стадии сорбции показывает, что степень извлечения ионов Cs^+ в опытах 1–3 заметно возросла при одновременном более глубоком удалении ионов Co^{2+} , в результате чего степень извлечения этих катионов во всех опытах достигает 99–100 %, в том числе и при использовании ФД (рис. 1, б). Это свидетельствует о том, что в опыте 1 ФД-Zr поглощает дополнительно около 6 % ионов Co^{2+} . При двухстадийной очистке также существенно возросло удаление ионов Sr^{2+} с максимальным значением в опыте 3 при использовании наиболее эффективной смеси ФД + Д-800 на первой стадии. В частности, поглощение ионов Sr^{2+} Zr-содержащим сорбентом на второй стадии составило соответственно 58,3, 44,5 и 8,5 % после использования на первой стадии сорбентов ФД, Д-800 и ФД + Д-800. Хотя более полной общей очистке способствует более глубокое извлечение ионов Sr^{2+} на первой стадии, однако и в случае высоких остаточных концентраций, как в опыте 1 (табл. 1), применение сорбента ФД-Zr также очень эффективно. Интересно отметить, что после двухстадийной очистки одним и тем же сорбентом широкого спектра действия ФД-Zr (опыт 4) степень извлечения ионов Co^{2+} и Sr^{2+} ниже, чем после очистки двумя разными сорбентами (на первой стадии Са–Mg сорбентом, а на второй Zr-содержащим), но извлечение ионов Cs^+ выше. Изменение порядка использования дуплета сорбентов, в частности Д-800 и ФД-Zr, показало близкие результаты, но несколько более глубокая очистка наблюдается при использовании ФД-Zr на первой стадии, а Д-800 на второй (опыты 2 и 5). Остаточные концентрации ионов в фильтрате после двух стадий очистки закономерно уменьшаются от 1-го опыта к 3-му по всем катионам (табл. 2).

Для лучшего из опытов с использованием ФД + Д-800 достигается полное извлечение ионов Co^{2+} . Ряды селективности к изученным ионам при одно- и двухстадийной очистке выглядят следующим образом: для Д-800 – $\text{Co} > \text{Sr}$, для ФД – $\text{Co} > \text{Sr} \gg \text{Cs}$ и ФД-Zr – $\text{Co} > \text{Sr} > \text{Cs}$.

Ранее проведенные исследования показали также, что поглощение ионов Cs^+ из раствора сорбентом ФД-Zr имеет свои специфические особенности. Наиболее эффективно при однократной очистке поглощение ионов Cs^+ , в отличие от других ионов, наблюдается при более высоких дозах сорбента [11]. При 4–8-кратном увеличении навески ФД-Zr, т. е. при концентрации сорбента 4–8 г/л, степень извлечения достигает максимального значения и составляет для ионов Cs^+ 93–97 %, а Sr^{2+} и Co^{2+} – 89–91 %. Но действительно глубокой очистки от ионов Cs^+ можно достичь только при циклической очистке малыми дозами сорбента.

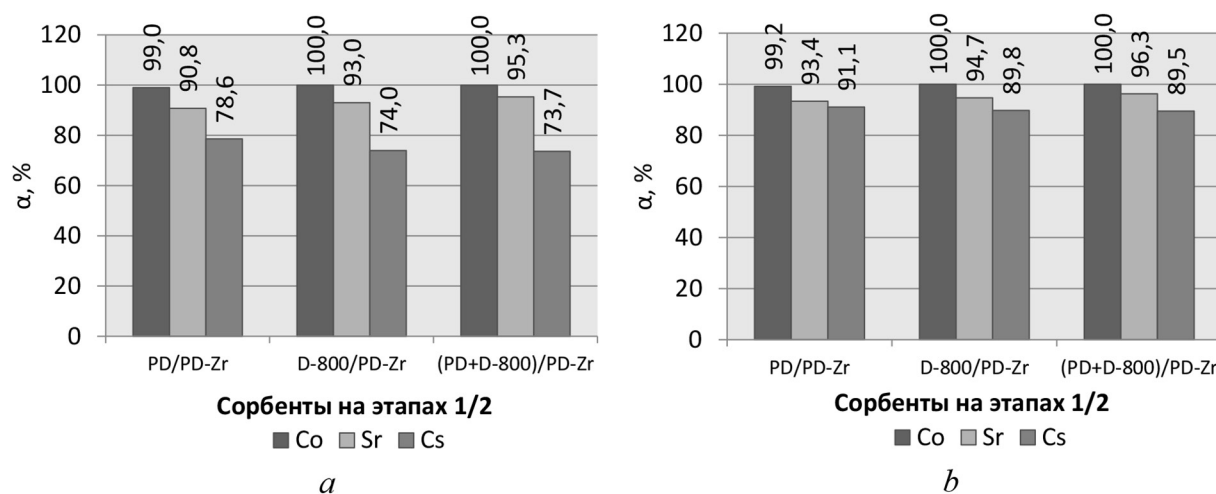
С учетом особенностей поглощения ионов Cs^+ композиционным сорбентом мы провели двухстадийную очистку, увеличив дозу ФД-Zr на второй стадии очистки в 2 и 4 раза (табл. 2, опыты 7–12), а также мультициклическую очистку, увеличив количество стадий очистки до 3, используя малые дозы сорбента ФД-Zr.

Таблица 2. Равновесные концентрации ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ и pH растворов после двухстадийной адсорбции фосфатными и карбонатными сорбентамиTable 2. Equilibrium concentrations of Co^{2+} , Sr^{2+} and Cs^+ ions and pH of solutions after two-stage adsorption by phosphate and carbonate sorbents

№ опыта Experiment number	Сорбент Sorbent	Концентрация сорбентов на разных этапах, г/л Concentration of sorbents at different stages, g/L	Концентрация ионов в растворе, мг/л Concentration of ions in solution, mg/L			pH
			Co^{2+}	Sr^{2+}	Cs^+	
1	ФД + ФД-Zr	1 + 1	0,092	1,78	6,62	6,91
2	Д-800 + ФД-Zr	1 + 1	0,002	1,22	6,56	7,22
3	(ФД + Д-800) + ФД-Zr	1 + 1	0,002	0,27	5,22	7,16
4	ФД-Zr + ФД-Zr	1 + 1	0,180	0,52	1,79	–
5	ФД-Zr + Д-800	1 + 1	0,013	0,46	6,06	–
6	ФД + ФД-Zr	4 + 4	0,022	0,42	1,17	6,56
7	ФД + ФД-Zr	1 + 2	0,068	0,91	3,13	6,65
8	ФД + ФД-Zr	1 + 4	0,056	0,65	1,30	6,36
9	Д-800 + ФД-Zr	1 + 2	0,001	0,68	3,80	6,73
10	Д-800 + ФД-Zr	1 + 4	0,001	0,52	1,50	6,39
11	(ФД + Д-800) + ФД-Zr	1 + 2	0,001	0,46	3,85	6,81
12	(ФД + Д-800) + ФД-Zr	1 + 4	0,002	0,36	1,53	6,47

Как видно из рис. 2, увеличение навески Zr-содержащего сорбента на второй стадии при использовании сорбента ФД на первой стадии (опыты 7, 8) приводит к значительному росту извлечения ионов Sr^{2+} (на 8,9 и 11,5 %) и особенно ионов Cs^+ (на 22,8 и 35,3 %). Соответствующий рост степени извлечения ионов Sr^{2+} сорбентом Д-800 на первой стадии очистки (опыты 9, 10) составляет 5,4–7,1 %, а ионов Cs^+ – 17,9–33,7 %. При использовании смеси ФД + Д-800 на первой стадии очистки (опыты 11, 12) увеличение навески ФД-Zr на второй стадии привело к аналогичным результатам. С увеличением концентрации ФД-Zr степень извлечения по каждому из ионов выравнивается за счет уменьшения разницы в зависимости от используемых сорбентов на первой стадии.

Соответственно, после двухстадийной очистки в этих условиях остаточные концентрации по катионам Sr^{2+} и особенно по Cs^+ уменьшились многократно, достигая минимальных значений 0,36 и 1,30 мг/л (табл. 2). Однако существенное снижение содержания катионов в фильтрате

Рис. 2. Степень извлечения ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ при дозе сорбента ФД-Zr на втором этапе очистки 2 (a) и 4 г/л (b)Fig. 2. The degree of extraction of Co^{2+} , Sr^{2+} and Cs^+ ions at a dose of PD-Zr sorbent at the second stage of purification of 2 (a) and 4 g/L (b)

с увеличением концентрации сорбента наблюдается только по ионам Cs^+ . Увеличение концентрации сорбента до 4 г/л на обеих стадиях очистки, в частности при использовании ФД (опыт 6), при безусловном росте степени очистки по ионам Co^{2+} до 96 % уже на первом этапе и извлечения ионов Cs^+ до 92 % на втором этапе, не обеспечивает полной очистки от всех катионов (Co^{2+} 99,7 %, Sr^{2+} 95,7 %) и поэтому нецелесообразно. Таким образом, лучшие результаты при двухстадийной очистке достигаются при увеличении навески на второй стадии до 4 г/л и при использовании на первой стадии карбонатного или смешанного карбонатно-фосфатного сорбента. Суммарный расход сорбента при этом составляет 5 г/л или 5 кг на 1 т очищаемого раствора, что позволяет получить максимальный результат очистки – извлечение 100 % ионов Co^{2+} , 96 % Sr^{2+} и 90 % Cs^+ .

Трехстадийная адсорбция при варьируемой дозе сорбента на разных этапах. Несмотря на низкие степени извлечения всех ионов на первой стадии сорбентом ФД две последовательные обработки сорбентом ФД-Zr (опыт 13) позволили увеличить извлечение ионов Sr^{2+} и Cs^+ до 97,1 и 95,6 %, а при увеличении навески ФД-Zr на третьей стадии очистки (опыт 14) – до 98,0 % по обоим ионам (рис. 3, а).

При использовании на первом этапе смеси ФД + Д-800 получены высокие степени очистки по ионам Co^{2+} и Sr^{2+} уже на первом этапе (рис. 3, б), а после третьего они достигли значений 99 и 95,0 % (опыт 15) и 99,3 и 98,0 % (опыт 16) по ионам Sr^{2+} и Cs^+ соответственно. Во всех рассмотренных случаях степень извлечения ионов Co^{2+} близка к 100 %. Таким образом, наиболее глубокая очистка трехкомпонентной смеси от ионов Cs^+ достигнута при трехстадийной адсорбции с использованием на 1-м этапе смеси ФД + Д-800 и Zr-содержащего сорбента на 2- и 3-м этапах в количестве 2 г/л. При этом суммарный расход сорбента составляет 5 г/л при низких значениях остаточных концентраций (табл. 3).

Аналогичные результаты дает также использование ФД на первой стадии по такой схеме (1 г + 2 г + 2 г), особенно по удалению ионов Cs^+ . Преимущество трехстадийной очистки наглядно демонстрирует опыт 17, проведенный в одну стадию таким же количеством сорбентов как в опыте 16, когда степень извлечения ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ не превышает 95,6 % (рис. 3, в). Полученные данные хорошо согласуются с нашим предыдущим исследованием [11], согласно которому при многостадийной очистке с внесением ФД-Zr в 4 этапа по 25 % на каждом этапе может быть достигнута глубокая степень очистки трехкомпонентного раствора от ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ (до 98,0–100,0 %) при концентрации сорбента 4 г/л, в то время как при одностадийной очистке даже двукратным количеством ФД-Zr очистка не превышает 90,0–91,0 % по ионам Co^{2+} и Sr^{2+} и 97,0 % по Cs^+ . При этом трехступенчатая очистка карбонатно-фосфатными сорбентами

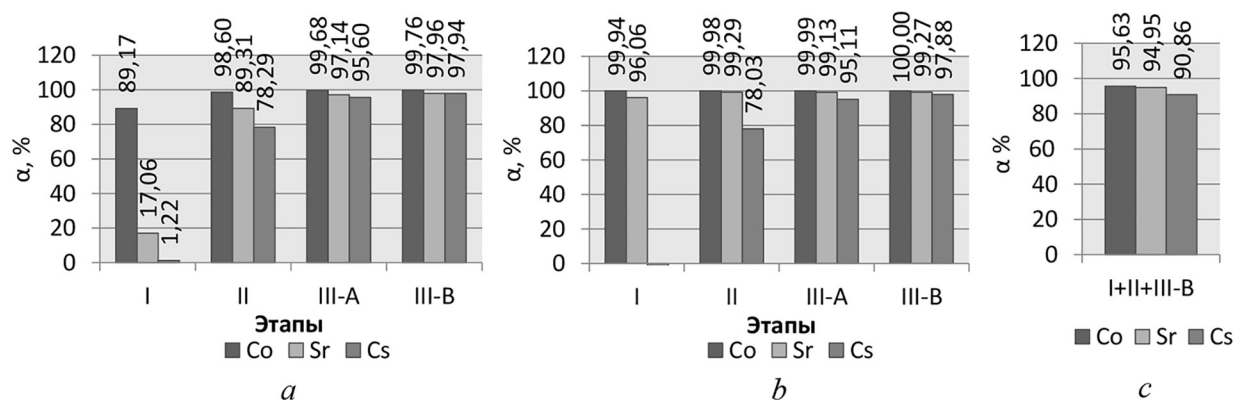


Рис. 3. Степень извлечения ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ при трехстадийной адсорбции с использованием на первом этапе сорбентов ФД (а) и смеси ФД + Д-800 (б) и концентрации сорбента на третьем этапе 1 (III-A) и 2 г/л (III-B) и одностадийной адсорбции с суммарной дозой сорбентов (в)

Fig. 3. The degree of extraction of Co^{2+} , Sr^{2+} and Cs^+ ions in three-stage adsorption using PD sorbents (a) and a mixture of PD + D-800 (b) at the first stage and a sorbent concentration at the third stage of 1 (III-A) and 2 g/L (III-B) and one-stage adsorption with a total dose of sorbents (c)

обеспечивает более полное извлечение ионов Co^{2+} и Sr^{2+} при практически таком же извлечении ионов Cs^+ и более низких значениях остаточных концентраций ионов Co^{2+} и Sr^{2+} . Преимущество многостадийной очистки раствора заключается в обновлении поверхности адсорбента при внесении свежей дозы в раствор с меньшей концентрацией.

Т а б л и ц а 3. Равновесные концентрации ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ после трехстадийной циклической адсорбции фосфатными и карбонатными сорбентами

Table 3. Equilibrium concentrations of Co^{2+} , Sr^{2+} and Cs^+ ions after three-stage cyclic adsorption by phosphate and carbonate sorbents

№ опыта Experiment number	Сорбент Sorbent	Концентрация сорбентов на разных этапах, г/л Concentration of sorbents at different stages, g/L	Концентрация ионов в растворе после адсорбции, мг/л Concentration of ions in solution after adsorption, mg/L		
			Co^{2+}	Sr^{2+}	Cs^+
13	ФД + ФД-Zr + ФД-Zr	1 + 2 + 1	0,021	0,282	0,647
14	ФД + ФД-Zr + ФД-Zr	1 + 2 + 2	0,016	0,202	0,303
15	(ФД + Д-800) + ФД-Zr + ФД-Zr	1 + 2 + 1	0,001	0,086	0,720
16	(ФД + Д-800) + ФД-Zr + ФД-Zr	1 + 2 + 2	0,000	0,072	0,311
17	(ФД + Д-800) + ФД-Zr + ФД-Zr	5	0,296	0,511	1,372

Селективность. Карбонатный и фосфатный сорбенты, используемые на первом этапе очистки раствора, поглощают ионы двухвалентных металлов по хемосорбционному механизму, т. е. вступают с карбонатами и фосфатами в химическое взаимодействие с образованием менее растворимых соединений. Наблюдаемая эффективность поглощения связана с кислотно-основными свойствами сорбентов и растворимостью образуемых соединений. Так, карбонатный сорбент Д-800 обладает выраженными щелочными свойствами в сравнении с фосфатным ФД (табл. 1, 2). Согласно литературным данным [3] при взаимодействии Д-800 с ионами Co^{2+} образуется $\text{Co}(\text{OH})_2$ с $\text{PP} = 5,9 \cdot 10^{-15}$ [18]. В составе продуктов взаимодействия Д-800 с ионами Sr^{2+} , исходя из значений PP , может быть SrCO_3 с $\text{PP} = 5,6 \cdot 10^{-10}$, образующийся в карбонатсодержащей среде [5], так как $\text{Sr}(\text{OH})_2$ имеет значения PP выше, чем у составляющих компонентов исходного сорбента и по этой причине его образование маловероятно.

Фосфатированный доломит образует согласно ранее проведенным исследованиям при взаимодействии с ионами Co^{2+} двойной фосфат кобальта $\text{Co}_7(\text{PO}_4)_2(\text{HPO}_4)_4$ [19]. В зависимости от концентрации раствора может образоваться средний фосфат $\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ с $\text{PP} 2,1 \cdot 10^{-35}$ [18]. Понятно в связи с этим увеличение поглощения ионов Co^{2+} смесью Д-800 + ФД в сравнении как с ФД, так и с Д-800. Образованию среднего фосфата кобальта при взаимодействии с ФД благоприятствует присутствие щелочного реагента (табл. 1, 2). При использовании в качестве сорбента смеси ФД + Д-800 условия также благоприятствуют образованию менее растворимой средней соли – $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$ с $\text{PP} 4,0 \cdot 10^{-28}$ [18].

Данные РФА образцов после взаимодействия с трехкомпонентным раствором подтверждают ранее полученные показатели (рис. 4). Так, в составе

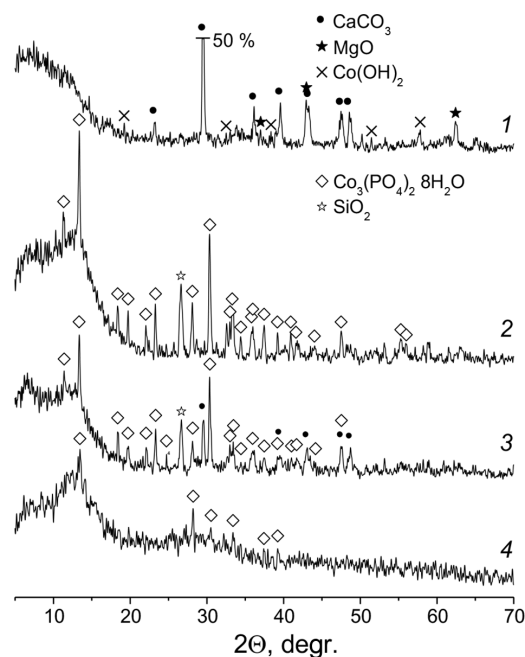


Рис. 4. Рентгенограммы продуктов сорбции ионов Co^{2+} , Sr^{2+} и Cs^+ из трехкомпонентного раствора при их эквимольной концентрации (64 ммоль/л) сорбентами Д-800 (1), ФД (2), Д-800 + ФД (3) и ФД-Zr (4)

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of the sorption products of Co^{2+} , Sr^{2+} and Cs^+ ions from a three-component solution at their equimolar concentration (64 mmol/L) by sorbents D-800 (1), PD (2), D-800 + PD (3) and PD-Zr (4)

сорбента Д-800 после сорбции наблюдаются слабые рефлексы $\text{Co}(\text{OH})_2$. Для всех фосфатсодержащих сорбентов, включая смесь Д-800 + ФД, вследствие их высокой селективности в отношении ионов Co^{2+} в продуктах сорбции присутствуют интенсивные рефлексы только $\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

Закключение. Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о том, что карбонатные и фосфатные сорбенты обладают различной селективностью к ионам Cs^+ , Sr^{2+} и Co^{2+} . Карбонатные и фосфатные сорбенты (Д-800 и ФД) в трехкомпонентной смеси селективно сорбируют ионы двухвалентных металлов Sr^{2+} , Co^{2+} . ФД-Zr не проявляет селективности ни к одному из ионов. Ряды эффективности сорбции к изученным ионам для Д-800 – $\text{Co} > \text{Sr}$, для сорбента ФД – $\text{Co} > \text{Sr} \gg \text{Cs}$, и для ФД-Zr – $\text{Co} > \text{Sr} > \text{Cs}$. Установлено, что наиболее эффективная очистка трехкомпонентного раствора (степень извлечения 98,0–100,0 %) достигается путем комбинации карбонатных и фосфатных сорбентов на разных стадиях очистки. Остаточные концентрации ионов Co^{2+} , Sr^{2+} , Cs^+ в растворе после комбинированной трехстадийной очистки составляют 0,0 (ниже предела обнаружения), 0,02 и 0,31 мг/л соответственно.

Благодарности. Работа выполнена по программе ГПНИ (грант № 2.1.07).

Acknowledgments. This work was carried out under the State Program for Scientific Research (grant no. 2.1.07).

Список использованных источников

1. Opportunities and constraints of using the innovative adsorbents for the removal of cobalt(II) from wastewater: A review / M. A. Islam, D. W. Morton, B. B. Johnson [et al.] // *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. – 2018. – Vol. 10. – P. 435–456. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.10.003>
2. Recent progress in advanced functional materials for adsorption and removal of cobalt from industrial and radioactive effluents / M. Rethinasabapathy, S. M. Ghoreishian, C. H. Kwak [et al.] // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2025. – Vol. 527. – Art. 216401. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216401>
3. Извлечение ионов $\text{Co}(\text{II})$ из водных растворов термически активированным доломитом / А. И. Иванец, И. Л. Шашкова, Н. В. Китикова, Н. В. Дроздова // *Журнал прикладной химии*. – 2014. – Т. 87, № 3. – С. 303–308.
4. Facile synthesis of nanolayered manganese oxide for the efficient and selective removal of strontium(II) from nuclear wastewater / F. Wang, Q. Zheng, W. Tai [et al.] // *Advanced Science*. – 2025. – Vol. 12, N 30. – Art. e17776. <https://doi.org/10.1002/advs.202417776>
5. Efficient removal of strontium from simulated radioactive wastewater by using mechanically modified dolomite as a novel environment-friendly adsorbent / B. Liu, S. Yu, Q. Zhang [et al.] // *Acta Microscopica*. – 2019. – Vol. 28, N 3. – P. 455–466.
6. Wang, J. Removal of cesium ions from aqueous solutions using various separation technologies / J. Wang, S. Zhuang // *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 18. – P. 231–269. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09499-9>
7. Wang, J. Metal hexacyanoferrates-based adsorbents for cesium removal / J. Wang, S. Zhuang, Y. Liu // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2018. – Vol. 374. – P. 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.07.014>
8. Removal of trace radioactive Cs^+ by zirconium titanium phosphate: From bench-scale to pilot-scale / Y. Wu, J. Chen, Z. Liu [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10, N 4. – Art. 108073. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108073>
9. Physical and chemical regularities of cesium and strontium recovery from the seawater by sorbents of various types / N. A. Bezgin, I. I. Dovhyi, E. A. Tokar, I. G. Tananaev // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2021. – Vol. 330. – P. 1101–1111. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08027-w>
10. Study of simultaneous radionuclide sorption by mixture design methodology / M. Z. Šljivić-Ivanović, I. D. Smičiklas, S. D. Dimović [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2015. – Vol. 54, N 44. – P. 11212–11221. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03448>
11. Single- and multi-stage Cs^+ , Sr^{2+} , Co^{2+} ions adsorption by Zr–Ca–Mg phosphate sorbent from single- and multi-component aqueous solutions / N. Kitikova, I. Shashkova, A. Ivanets, A. Dzikaya // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2025. – Vol. 334. – P. 8713–8726. <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10578-1>
12. Efficiency of bentonite in removing cesium, strontium, cobalt and uranium ions from aqueous solution: encapsulation with alginate for column application / R. A. Abou-Lilah, H. E. Rizk, M. A. Elshorbagy [et al.] // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 2022. – Vol. 102, N 12. – P. 2913–2936. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1761348>
13. Facile synthesis of calcium magnesium zirconium phosphate adsorbents transformed into $\text{MZr}_4\text{P}_6\text{O}_{24}$ (M: Ca, Mg) ceramic matrix for radionuclides immobilization / A. Ivanets, I. Shashkova, N. Kitikova [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 272. – Art. 118912. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118912>
14. Preliminary investigation of mixed adsorbents for the removal of copper and methylene blue from aqueous solutions / A. B. Albadarin, J. Mo, Y. Glocheux [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 255. – P. 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.029>

15. Strategic selection of an optimal sorbent mixture for in-situ remediation of heavy metal contaminated sediments: framework and case study / Y. W. Chiang, R. M. Santos, K. Ghyselbrecht [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2012. – Vol. 105. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.037>
16. Mixture of CaCO_3 polymorphs serves as best adsorbent of heavy metals in quadruple system / R. V. Devi, V. V. Nair, P. Sathyamoorthy, M. Doble // *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. – 2022. – Vol. 26, N 1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000651](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000651)
17. Radioactive wastewater treatment using a mixture of TANNIX sorbent and VARION mixed bed ion exchange resin / G. Patzay, P. Tilky, J. Schunk [et al.] // *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*. – 2006. – Vol. 2, N 4. – P. 328–341. <https://doi.org/10.1504/ijnest.2006.011716>
18. Lange's Handbook of Chemistry / ed. J. G. Speight. – 16th ed. – New York, 2004.
19. Non-apatite Ca–Mg phosphate sorbent for removal of toxic metal ions from aqueous solutions / A. I. Ivanets, V. Srivastava, N. V. Kitikova [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2017. – Vol. 5, N 4. – P. 2010–2017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.03.041>

References

1. Islam M. A., Morton D. W., Johnson B. B., Pramanik B. K., Mainali B., Angove M. J. Opportunities and constraints of using the innovative adsorbents for the removal of cobalt(II) from wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 2018, vol. 10, pp. 435–456. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.10.003>
2. Rethinasabapathy M., Ghoreishian S. M., Kwak C. H., Han Y.-K., Roh C., Huh Y. S. Recent progress in advanced functional materials for adsorption and removal of cobalt from industrial and radioactive effluents. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, vol. 527, art. 216401. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216401>
3. Ivanets A. I., Shashkova I. L., Kitikova N. V., Drozdova N. V. Extraction of Co(II) ions from aqueous solutions with thermally activated dolomite. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, vol. 87, no. 3, pp. 270–275. <https://doi.org/10.1134/s1070427214030045>
4. Wang F., Zheng Q., Tai W., Wu Q., Li X., Wu Y., Zheng N., Ning S., Zeng D., Watabe H., Wu Y., Li H., Wei Y., Yin X. Facile synthesis of nanolayered manganese oxide for the efficient and selective removal of strontium(II) from nuclear wastewater. *Advanced Science*, 2025, vol. 12, no. 30, art. e17776. <https://doi.org/10.1002/advs.202417776>
5. Liu B., Yu S., Zhang Q., Ye Y., Qu J., Liu X., Hou L. A. Efficient removal of strontium from simulated radioactive wastewater by using mechanically modified dolomite as a novel environment-friendly adsorbent. *Acta Microscopica*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 455–466.
6. Wang J., Zhuang S. Removal of cesium ions from aqueous solutions using various separation technologies. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2019, vol. 18, pp. 231–269. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09499-9>
7. Wang J., Zhuang S., Liu Y. Metal hexacyanoferrates-based adsorbents for cesium removal. *Coordination Chemistry Reviews*, 2018, vol. 374, pp. 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.07.014>
8. Wu Y., Chen J., Liu Z., Na P., Zhang Z. Removal of trace radioactive Cs^+ by zirconium titanium phosphate: From bench-scale to pilot-scale. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, no. 4, art. 108073. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108073>
9. Bezhin N. A., Dovhyi I. I., Tokar E. A., Tananaev I. G. Physical and chemical regularities of cesium and strontium recovery from the seawater by sorbents of various types. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, vol. 330, pp. 1101–1111. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08027-w>
10. Šljivić-Ivanović M. Z., Smičiklas I. D., Dimović S. D., Jović M. D., Dojčinović B. P. Study of simultaneous radionuclide sorption by mixture design methodology. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, vol. 54, no. 44, pp. 11212–11221. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03448>
11. Kitikova N., Shashkova I., Ivanets A., Dzikaya A. Single- and multi-stage Cs^+ , Sr^{2+} , Co^{2+} ions adsorption by Zr–Ca–Mg phosphate sorbent from single- and multi-component aqueous solutions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2025, vol. 334, pp. 8713–8726. <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10578-1>
12. Abou-Lilah R. A., Rizk H. E., Elshorbagy M. A., Gamal A. M., Ali A. M., Badawy N. A. Efficiency of bentonite in removing cesium, strontium, cobalt and uranium ions from aqueous solution: encapsulation with alginate for column application. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, vol. 102, no. 12, pp. 2913–2936. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1761348>
13. Ivanets A., Shashkova I., Kitikova N., Radkevich A., Venhlinkaya E., Dzikaya A., Trukhanov A. V., Sillanpää M. Facile synthesis of calcium magnesium zirconium phosphate adsorbents transformed into $\text{MZr}_4\text{P}_6\text{O}_{24}$ (M: Ca, Mg) ceramic matrix for radionuclides immobilization. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 272, art. 118912. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118912>
14. Albadarin A. B., Mo J., Glocheux Y., Allen S., Walker G., Mangwandi C. Preliminary investigation of mixed adsorbents for the removal of copper and methylene blue from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 2014, vol. 255, pp. 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.029>
15. Chiang Y. W., Santos R. M., Ghyselbrecht K., Cappuyns V., Martens J. A., Swennen R., Van Gerven T., Meesschaert B. Strategic selection of an optimal sorbent mixture for in-situ remediation of heavy metal contaminated sediments: framework and case study. *Journal of Environmental Management*, 2012, vol. 105, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.037>
16. Devi R. V., Nair V. V., Sathyamoorthy P., Doble M. Mixture of CaCO_3 polymorphs serves as best adsorbent of heavy metals in quadruple system. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2022, vol. 26, no. 1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000651](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000651)

17. Patzay G., Tilky P., Schunk J., Pinter T., Feil F., Hamaguchi K., Weiser L. Radioactive wastewater treatment using a mixture of TANNIX sorbent and VARION mixed bed ion exchange resin. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, 2006, vol. 2, no. 4, pp. 328–341. <https://doi.org/10.1504/ijnest.2006.011716>
18. Speight J. G., ed. *Lange's Handbook of Chemistry*. 16th ed., New York, 2004.
19. Ivanets A. I., Srivastava V., Kitikova N. V., Shashkova I. L., Sillanpää M. Non-apatite Ca–Mg phosphate sorbent for removal of toxic metal ions from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 2010–2017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.03.041>

Информация об авторах

Шашкова Ирина Лукинична – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. E-mail: shashkova@igic.bas-net.by. ORCID: 0000-0002-3448-7887.

Китикова Наталья Владиленовна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. E-mail: kitikova@igic.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-5608-773X.

Иванец Андрей Иванович – член-корреспондент, д-р хим. наук, профессор, научный руководитель лаборатории. E-mail: andreiiivanets@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-3053-317X.

Information about the authors

Shashkova Irina L. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. E-mail: shashkova@igic.bas-net.by. ORCID: 0000-0002-3448-7887.

Kitikova Natalja V. – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. E-mail: kitikova@igic.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-5608-773X.

Ivanets Andrei I. – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Professor, Science Head of the Laboratory. E-mail: andreiiivanets@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-3053-317X.