

ОЧИСТКА ВОД, ЗАГРЯЗНЁННЫХ РАДИОАКТИВНЫМ ЙОДОМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕОЛИТА

Аннотация: В работе исследована эффективность природного цеолита и его модифицированных форм для удаления стабильного изотопа йода (^{127}I) из водных растворов. Природный цеолит модифицирован ионами серебра (Ag^+) и меди (Cu^{2+}) методом ионного обмена. Структура и химический состав модифицированных образцов изучены с использованием рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), рентгенографии (XRD) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM-EDX).

Результаты кинетических экспериментов показали, что Cu -модифицированный цеолит быстрее достигает сорбционного равновесия по сравнению с Ag -модифицированным аналогом. Время достижения равновесия для Cu -модифицированного цеолита составило приблизительно 30,5 часов, тогда как для Ag -модифицированного образца – около 36,0 часов. Степень удаления йода из водных растворов в обоих случаях была высокой и составила 99,4% для Cu -модифицированного цеолита и 99,1% для Ag -модифицированного.

Анализ изотерм сорбции показал, что данные лучше всего описываются моделью Ленгмюра с коэффициентом детерминации (R^2) более 0,98. При этом расчётная максимальная сорбционная ёмкость модифицированных цеолитов оказалась выше, чем у природного цеолита.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность и экологическую безопасность металломоодифицированных цеолитов в качестве сорбентов для удаления йодсодержащих загрязнений из водных растворов. Особое практическое значение имеет Cu -модификация, которая демонстрирует улучшенную кинетику сорбции, что делает её перспективной для применения в технологиях очистки воды.

Ключевые слова: удаление радионуклидов, адсорбция йода, модифицированный цеолит, наночастицы серебра, ионы меди, очистка воды.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проблема очистки водных систем от радиоактивного йода становится всё более актуальной. Это связано с его высокой радиотоксичностью, значительной подвижностью в окружающей среде и выраженным негативным воздействием на здоровье человека [1-2]. В связи с этим активно исследуются различные материалы для удаления йода из воды, среди которых особое внимание привлекают цеолиты – как природные, так и модифицированные.

Цеолиты представляют собой алюмосиликатные минералы с высокоразвитой пористой структурой, значительной удельной поверхностью и высокой ионообменной ёмкостью. Эти свойства делают их эффективными адсорбентами и ионообменниками, что позволяет использовать их для очистки воды от различных загрязнений, включая радионуклиды [3]. Природные цеолиты широко распространены и обладают низкой стоимостью, что делает их привлекательными для практического применения в водоподготовке.

Для повышения селективности и сорбционной активности цеолитов проводится их химическая модификация. Исследования показывают, что введение катионов переходных металлов, таких как железо, медь или цинк, существенно увеличивает ёмкость цеолитов по отношению к ионам тяжёлых металлов и радионуклидов [4-6]. Это расширяет возможности их использования для дезактивации сточных вод и очистки радиоактивно загрязнённых источников.

Для селективного удаления йода из воды перспективными являются ионно-обменные стратегии, включающие использование ионов серебра (Ag^+) и меди (Cu^{2+}). Серебро обладает высоким сродством к йодид-ионам (I^-) благодаря образованию малорастворимых соединений, таких как AgI . Медь также может использоваться для удаления йода, но она часто

обеспечивает более быстрый массообмен и устойчивость к сопутствующим ионам, таким как хлорид-ионы (Cl^-) [7].

Цеолиты демонстрируют высокую эффективность в отношении широкого спектра радионуклидов, включая цезий (Cs^+) и стронций (Sr^{2+}). Клиноптилолит и морденит – два наиболее изученных цеолита – традиционно используются для удаления этих радионуклидов из воды благодаря своей избирательности [8]. Для удаления йодид-ионов наиболее эффективными являются цеолиты, модифицированные катионами серебра (Ag^+) или меди (Cu^{2+}). Эти материалы показывают высокие степени удаления йода в различных экспериментальных условиях, включая пакетные и колонные эксперименты, что делает их перспективными для промышленного применения [9].

Современные подходы к синтезу и модификации цеолитов направлены на создание устойчивых и экономически обоснованных решений для водоочистки. Развитие технологий позволяет не только улучшать адсорбционные свойства цеолитов, но и интегрировать их с другими методами очистки, такими как катализ и баромембранные процессы. Это расширяет функциональность материалов и повышает качество очищенной воды [10].

Интеграция природных и модифицированных цеолитов в существующие схемы водоподготовки является перспективным направлением, которое позволяет сочетать высокую эффективность, технологическую совместимость и экологическую безопасность. Совершенствование методов модификации и управление структурно-химическими параметрами цеолитов создают основу для разработки новых поколений сорбентов, способных надёжно защищать окружающую среду и здоровье населения от последствий радионуклидного загрязнения [11-12].

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы исследования: Природный цеолит Шанханайского месторождения (Жетисуская область, Казахстан) представлен преимущественно клиноптилолитом, образованным в туфах риолит-дацитового состава пермской Жальгызашской формации. Минерал обладает развитой пористой структурой с каналами и полостями, что обеспечивает высокую катионообменную способность и селективную адсорбцию катионов. Химический состав включает Si, Al и O с примесью Na, K, Ca, Mg и Fe, при среднем мольном соотношении Si/Al около 2,9-3,0.

Для проведения экспериментов использовались следующие реактивы: хлорид натрия (NaCl), чистота 99,5 % (AR, CAS 7647-14-5, производитель Meyer); нитрат серебра (AgNO_3), аналитически чистый, ГОСТ 1277-75 (Лабсорфарма ЖШС); нитрат меди (II) ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), аналитически чистый (ЧДА, ГОСТ 4166-76); йод (I_2), реактивный (ТОО «Лабимпэкс»); йодид калия (KI), реактивный (Reakhim); дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72). Все реактивы применялись без дополнительной очистки.

2.1 Модификация природного цеолита наночастицами серебра

Для повышения сорбционных свойств первичных природных цеолитов часто используется их модификация различными химическими реагентами. Полученный природный цеолит проходит модификацию, состоящую из двух этапов. На первом этапе природный цеолит обрабатывают хлоридом натрия с образованием соединения типа Na-цеолит. Эта модификация способствует образованию эффективных ионных связей в процессе последующего образования комплекса с наночастицами серебра и закреплению наночастиц в поверхностных порах цеолита.

На первом этапе проводилась модификация: 10 г природного цеолита взвешивали и помещали в приготовленный 1 М раствор NaCl . Для приготовления раствора NaCl с помощью аналитических весов было измерено 5,844 г хлорида натрия, который затем полностью растворили в 100 мл дистиллированной воды. В раствор помещали образец природного цеолита и проводили модификацию NZ-Na путем обмена катионами Na^+ . В процессе модификации значение pH раствора контролировалось универсальным индикатором, и когда pH достигал уровня 7, модифицированный образец природного цеолита сушили при 150 °C в течение 24 часов.

На втором этапе готовили 0,1 М раствор AgNO_3 , полученный раствор смешивали с соединением NZ-Na. Образец хранился в тёмном месте в течение 24 часов, что позволило избежать фотодеструкции ионов серебра и ускорить процесс образования наночастиц Ag^0 . После завершения реакции образовавшийся комплекс $\text{Ag}^0\text{@NZ}$ высушивали и готовили к использованию в качестве конечного продукта.

В процессе модификации восстановление ионов Ag^+ до металлических наночастиц Ag^0 происходило за счёт взаимодействия сорбированных ионов серебра с гидроксильными группами и дефектами структуры цеолита, а также под действием термической обработки при 150°C . Это обеспечивало равномерное закрепление наночастиц Ag^0 в пористой матрице природного цеолита, что впоследствии подтверждено результатами XRD и СЭМ-ЭДХ анализа.

2.2 Модификация природного цеолита с наночастицами меди

Приготовили 1 М раствор нитрата меди (II) и добавляют в него природный цеолит массой 10 г. С целью модификации природного цеолита полученного раствора перемешивали на скорости 300 об/мин и при температуре 40°C с помощью магнитного миксера в течение 24 часа. После завершения процесса модификации, образец сушили при 150°C в течение 12 часов для стабилизации структуры полученного материала и удаления остаточной влаги.

2.3 Приготовления раствора йода (I_2)

Раствор готовили, растворяя 1,00 г молекулярного йода (I_2) и 1,96 г йодида калия (KI) в 1000 мл дистиллированной воде и подвергали ультразвуковой обработке раствора (60°C , 48 часов) для обеспечения полного растворения и равномерного распределения компонентов. Полученный раствор затем используется в качестве стандартной модели в точных и воспроизводимых исследованиях сорбционных свойств изотопа ^{127}I .

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Результаты рентгенофлуоресцентного (XRF) анализа

Для определения элементного состава изученных образцов природного цеолита использовался метод рентгенофлуоресцентной (XRF) спектроскопии. Данный метод позволяет точно определить количественный и качественный состав основных и примесных элементов в поверхностном слое материала. Результаты анализа показали, что в составе природного цеолита (табл. 1) преимущественно преобладают элементы кремния (Si), алюминия (Al), кальция (Ca), калия (K) и железа (Fe), что соответствует природной алюмосиликатной структуре.

Таблица 1 – Рентгенофлуоресцентные результаты

Элементы	Al, мас. %	Si, мас. %	S, мас. %	Fe, мас. %	Ag, мас. %	Cu, мас. %
Природный цеолит	14,94	57,26	2,74	20,36	-	0,057
Ag- модифицированный природным цеолитом	13,07	44,94	0,632	14,46	23,90	0,019
Cu-модифицированный природным цеолитом	13,99	45,68	0,651	9,41	-	27,81

Для природного цеолита, модифицированного серебром (Ag-Z), были зафиксированы сигналы элемента Ag, что подтвердило эффективность процесса модификации. Точно так же присутствие ионов меди (Cu) в природном цеолите, модифицированном медью (Cu-Z), было четко выражено в спектре XRF. Кроме того, в модифицированных образцах наблюдалось уменьшение или смещение относительного количества некоторых исходных элементов, что указывает на протекание процессов ионного обмена или поверхностной адсорбции.

В целом анализ XRF доказал успешное введение ионов металлов при модификации, сохраняя стабильность структуры природного цеолита. Это, несомненно, положительно влияет на способность сорбентов улавливать радионуклиды. Результат элементного состава представлен в таблице 1.

3.2 Результаты рентгенодифракционного анализа (XRD)

Рентгеновская дифракция исходного образца природного цеолита (образца а) подтверждает высокую кристалличность и чистоту алюмосиликатного скелета и четкие определенные отражения при $2\theta = 9,9^\circ, 22,4^\circ, 26,8^\circ, 30,0^\circ$ и $50,6^\circ$. Основываясь на ионах серебра (образец б) модификация, PCA показывает интенсивность профиля пики $2\theta \approx 38,1^\circ, 44,3^\circ$ и $64,4^\circ$, а также отражения (111), (200) и (220) кубические фазы Ag. Основные клиноптилолиты и рефлексы не изменяются и существенно не изменяются по ширине. Эти новые рефлексы ясно показывают образование наночастиц серебра внутри или на поверхности цеолитной структуры.

Образец PCA сохраняет все характерные пиковые положения природного цеолита без образования новых резких линий, указывающих на свободные фазы Cu или CuO .

модифицированного образца меди (образец в). В частности, незначительное расширение основных пиков в области $2\theta = 22^\circ\text{--}30^\circ$, а также наблюдаемое расширение пиков может рассматриваться как первый признак дискретной интеркаляции ионов Cu^{2+} в каналы цеолита (рис. 1).

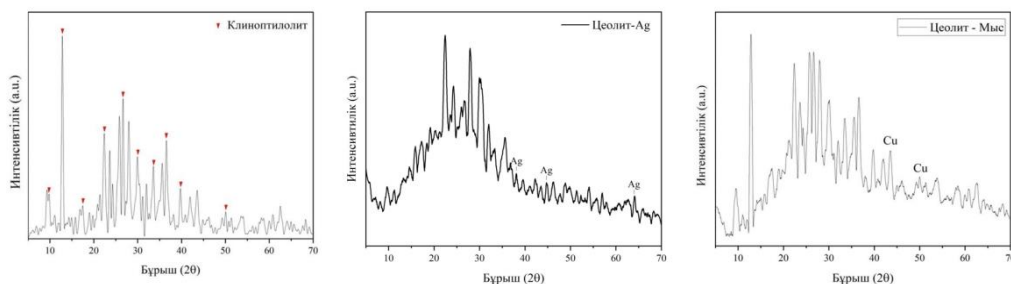


Рисунок 1 – Результаты рентгенодифракционного анализа

3.3 Результаты сканирующей электронной микроскопии с элементным анализом (СЭМ-ЭДХ)

С помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и элементного анализа (ЭДХ) исследовали структуру поверхности и элементный состав чистых и модифицированных образцов природного цеолита, морфология природного и модифицированного цеолита изучалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а элементный состав-методом спектроскопии дисперсии энергии (ЭДХ). На рисунке 2 показано, что природный цеолит обладает развитой пористой структурой с неравномерным распределением частиц. После модификации наночастицами серебра и меди на поверхности природного цеолита наблюдаются морфологические изменения, отражающие фиксацию металлических наночастиц в структуре носителя.

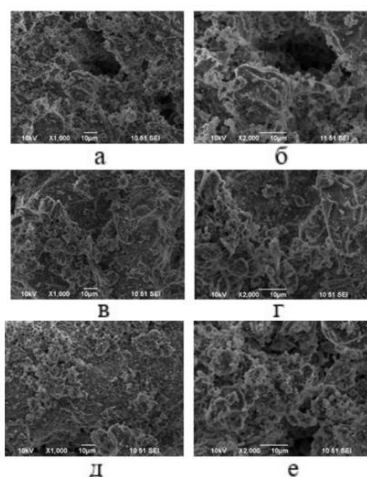


Рисунок 2 – Результаты сканирующей электронной микроскопии

а, б – результаты природного цеолита; в, г – результаты природного цеолита модифицированного наночастицами серебра; д, е – результаты природного цеолита модифицированного наночастицами меди

Результаты анализа ЭДХ (рис. 3) подтверждают наличие в природном цеолите таких основных элементов, как Si, Al и O, что соответствует типичной алюмосиликатной природе материала. Кроме того, в модифицированных образцах четко определены пики Ag и Cu, что указывает на успешное введение соответствующих наночастиц.

Полученные результаты (рис. 2 и 3) показывают, что в результате модификации природного цеолита наночастицами серебра и меди происходят значительные изменения как в морфологической структуре, так и в элементном составе материала. Фиксированное присутствие наночастиц на поверхности и их подтвержденный состав в спектрах указывает на то, что металлические компоненты прочно закреплены в цеолитовой матрице. Такие структурные характеристики позволяют рассматривать модифицированные цеолиты как перспективные материалы для использования в процессах сорбции загрязняющих веществ из водной среды.

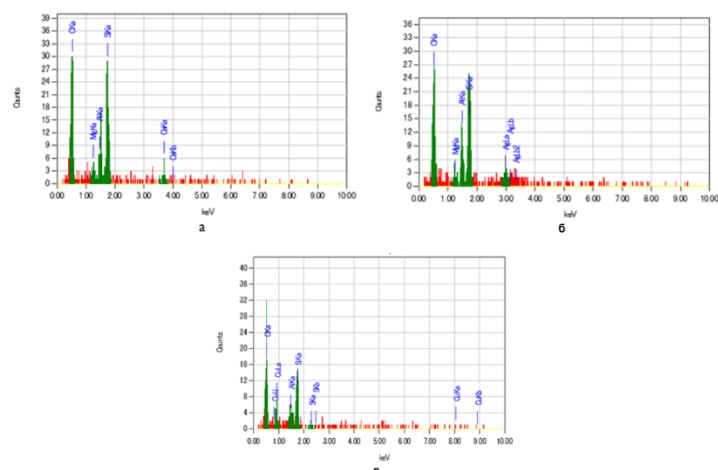


Рисунок 3 – Результаты элементного анализа
а – природный цеолит; б – модифицированный природный цеолит с наночастицами серебра;
в – модифицированный природный цеолит с наночастицами меди

3.4 Результаты кинетического исследования

Результаты кинетического исследования позволили относительно оценить сорбционную активность модифицированных цеолитов (природный цеолит-Ag и природного цеолит-Cu). Было замечено, что эффективность удаления изначально интенсивно росла с увеличением времени, достигая равновесного состояния через определенный промежуток времени.

Согласно полученным данным, модифицированный цеолит на основе меди проявлял высокую активность в процессе сорбции: достигал равновесного состояния за 30,5 часа и имел максимальную эффективность удаления 99,4%. Хотя процесс сорбции природного цеолита, модифицированного серебром, замедлился и достиг равновесия за 36,0 часов, его эффективность удаления также была зафиксирована около 99,1%.

При сравнительном рассмотрении было обнаружено, что оба сорбента обладают высокими адсорбционными свойствами. Однако было замечено, что цеолит, модифицированный ионами меди, реагирует кинетически быстрее и достигает равновесия раньше, что может быть связано с более высокой доступностью его сорбционной поверхности и повышенной ионообменной способностью (рис. 4).

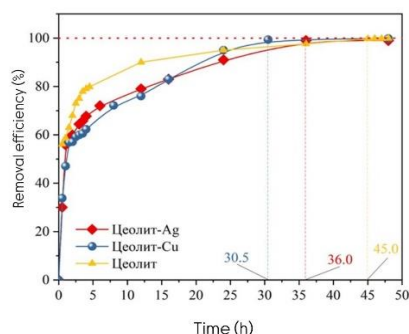


Рисунок 4 – Кривые кинетики адсорбции на цеолите и его модифицированных формах (Cu, Ag)

3.5 Результаты изотермических исследований

Изотермическое исследование сорбции йода проводилось при комнатной температуре (25°C) с целью определения равновесных характеристик процесса, изучения сорбционной способности природного и модифицированного цеолита. Эксперименты проводились при различных начальных концентрациях йода, постоянной массе сорбента и объеме раствора до достижения равновесного состояния. Концентрация остаточного йода определялась спектрофотометрически. На основе полученных данных были созданы сорбционные изотермы, показывающие зависимость равновесной концентрации (C_e) от количества сорбированного вещества (q_e).

Изотермические модели Лангмюра и Фрейндлиха использовались для анализа экспериментальных данных. По результатам построены графики в координатах линейных уравнений моделей (рис. 5): аппроксимация данных показала, что модель Лангмюра лучше описывает сорбционное поведение модифицированного цеолита, что подтверждается высоким коэффициентом детерминации ($R_2 > 0,98$). Это указывает на мономолекулярный характер сорбции и неоднородность активных центров на поверхности сорбента. Расчет максимальной сорбционной емкости (q_m) подтвердил, что модифицированный цеолит обладает значительно более высокой сорбционной способностью по сравнению с естественным цеолитом из-за увеличения количества доступных сорбционных центров после введения ионов меди.

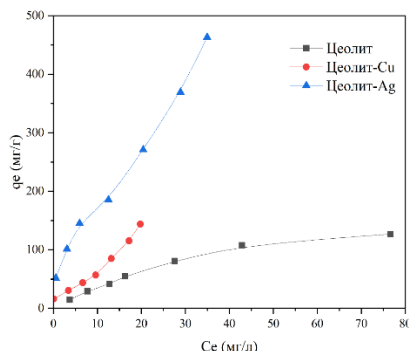


Рисунок 5 – Изотермы адсорбции на цеолите и модифицированных цеолитах (Cu, Ag)

Модель Фрейндлиха также использовалась для описания природы сорбции и показала хорошие результаты, особенно для естественного цеолита. Значения показателя $1/n$ находились в диапазоне 0,3-0,7, что указывает на благоприятные условия сорбции и наличие участков с разной энергией связи.

Таким образом, построенные графики и рассчитанные параметры подтверждают, что модифицированный цеолит является эффективным сорбентом для удаления йода при 25°C.

Сравнение полученных данных показывает, что, оба модификаторы (Ag и Cu) значительно повышают сорбционную активность цеолита по сравнению с исходным материалом, образец, модифицированный Cu, демонстрирует лучшую кинетику и быстрее достигает равновесия. Модифицированный медью цеолит считается наиболее перспективным для реального применения в системах очистки воды. А также использование меди экономически более целесообразно, так как она значительно дешевле и доступнее, чем серебро.

Заключение

В данной работе была изучена сорбционная емкость йодиде ионов на примере стабильного изотопа ^{127}I из водных растворов с помощью природного цеолита и его модифицированных форм. Основное внимание было уделено влиянию модифицирующих добавок (ионов меди и серебра) на сорбционные характеристики природного цеолита.

Эффективность модификации без изменения кристаллической структуры исходного цеолита была подтверждена XRD, XRF и SEM-EDX методами. Методом XRF было определено содержание модификаторов: 27,81 % Cu и 23,90 % Ag, что свидетельствует о высокой степени насыщения сорбентов. После модификации СЭМ и ЭДС показали заметные изменения в морфологии поверхности, а также увеличение количества активных сорбционных центров.

Сравнительные сорбционные эксперименты показали, что природный цеолит обладает ограниченной эффективностью, тогда как модифицированные образцы существенно превосходят его по всем ключевым параметрам. Преимущество Cu-модифицированного цеолита было продемонстрировано кинетическими исследованиями: время достижения равновесия составило приблизительно 30,5 часов, что на 14,5 часов меньше, чем у природного образца (приблизительно 45 часов), и на 5,5 часов меньше, чем у Ag модифицированного цеолита- (приблизительно 36 часов). При добавлении меди это свидетельствует об улучшенной кинетике ионного обмена.

Согласно результатам изотермических исследований, оба модифицированных сорбента обладают значительно более высокой сорбционной емкостью, чем исходный

материал. В то же время, самые высокие показатели были отмечены для Ag модифицированного цеолита; тем не менее, скорость сорбции модифицированного медью цеолита была наиболее существенным практическим преимуществом.

Таким образом, основываясь на результатах исследования, Cu-модифицированный цеолит является наиболее перспективным из исследованных образцов. Он сочетает в себе улучшенные кинетические характеристики, высокую эффективность удаления йода и структурную стабильность, что делает его предпочтительным материалом для практического использования в системах очистки загрязненной воды.

Список литературы

1. Carbon adsorbents for the uptake of radioactive iodine from contaminated water effluents: A systematic review / M. Kunarbekova et al // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 67. – Art. 106174. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.106174>.
2. Комплексный метод очистки микропластика в воде с использованием сорбентов / И.О. Сапаргали и др. // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – С. 412-420. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-51](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-51).
3. Highly efficient iodide adsorption from medical radioactive wastewater by strong alkaline anion exchange fiber / Z. Liao et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 12, № 1. – Art. 111783. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111783>.
4. Alotaibi A. Modification of clinoptilolite as a robust adsorbent for highly-efficient removal of thorium(IV) from aqueous solutions / A. Alotaibi, A. Ismail // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19, № 21. – Art. 13774. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113774>.
5. Cesium selectivity of natural zeolites (clinoptilolite, mordenite) in aqueous systems / H. Taira et al // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2017.
6. Modifying natural zeolites to improve heavy metal adsorption / E. Kuldeyev et al // Water. – 2023. – Vol. 15, № 12. – Art. 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>.
7. Natural zeolites in water treatment – how effective is their use / J. Margeta et al // Water Treatment. – 2013. <https://doi.org/10.5772/50738>.
8. Removal of radioactive iodine and cesium in water purification / S. Kitada et al // Desalination and Water Treatment. – 2015. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.923205>.
9. Highly efficient removal of radioactive iodine anions by nano-silver modified activated carbon fiber X. Chen et al // Applied Surface Science. – 2024. – Vol. 643. – Art. 158644. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2023.158644>.
10. Capture of iodine and organic iodides using silica zeolites and the semiconductor behaviour of iodine in a silica zeolite / T.C.T. Pham et al // Energy & Environmental Science. – 2016. <https://doi.org/10.1039/c5ee02843d>.
11. Davis M.E. Zeolites from a materials chemistry perspective / M.E. Davis // Chemistry of Materials. – 2013. <https://doi.org/10.1021/cm401914u>.
12. Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals / E.H. Borai et al // Journal of Hazardous Materials. – 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.033>.

References

1. Carbon adsorbents for the uptake of radioactive iodine from contaminated water effluents: A systematic review / M. Kunarbekova et al // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 67. – Art. 106174. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.106174>. (In English).
2. Kompleksnyi metod ochistki mikroplastika v vode s ispol'zovaniem sorbentov / I.O. Sapargali i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – S. 412-420. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-51](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-51). (In Russian).
3. Highly efficient iodide adsorption from medical radioactive wastewater by strong alkaline anion exchange fiber / Z. Liao et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 12, № 1. – Art. 111783. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111783>. (In English).
4. Alotaibi A. Modification of clinoptilolite as a robust adsorbent for highly-efficient removal of thorium(IV) from aqueous solutions / A. Alotaibi, A. Ismail // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19, № 21. – Art. 13774. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113774>. (In English).

5. Cesium selectivity of natural zeolites (clinoptilolite, mordenite) in aqueous systems / H. Taira et al // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2017. (In English).
6. Modifying natural zeolites to improve heavy metal adsorption / E. Kuldeyev et al // Water. – 2023. – Vol. 15, № 12. – Art. 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>. (In English).
7. Natural zeolites in water treatment – how effective is their use / J. Margeta et al // Water Treatment. – 2013. <https://doi.org/10.5772/50738>. (In English).
8. Removal of radioactive iodine and cesium in water purification / S. Kitada et al // Desalination and Water Treatment. – 2015. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.923205>. (In English).
9. Highly efficient removal of radioactive iodine anions by nano-silver modified activated carbon fiber X. Chen et al // Applied Surface Science. – 2024. – Vol. 643. – Art. 158644. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2023.158644>. (In English).
10. Capture of iodine and organic iodides using silica zeolites and the semiconductor behaviour of iodine in a silica zeolite / T.C.T. Pham et al // Energy & Environmental Science. – 2016. <https://doi.org/10.1039/c5ee02843d>. (In English).
11. Davis M.E. Zeolites from a materials chemistry perspective / M.E. Davis // Chemistry of Materials. – 2013. <https://doi.org/10.1021/cm401914u>. (In English).
12. Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals / E.H. Borai et al // Journal of Hazardous Materials. – 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.033>. (In English).

Благодарность: Авторы выражают благодарность Министерству высшего образования и науки Республики Казахстан, выделившему грантовый проект ИРН:BR27199301 «Разработка климатически-нейтральных новых материалов, передовых технологий и методов для защиты окружающей среды от антропогенных загрязнений и изменения климата.»

А.А. Каныкешова, И.О. Сапаргали*, Л.Н. Сеймуханова, К.С. Бексейтова, С. Азат

¹Satbayev University,

050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22

*e-mail: sapargali.i@mail.ru

ТАБИҒИ ЖӘНЕ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ЦЕОЛИТТІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, РАДИОАКТИВТІ ЙОДПЕН ЛАСТАНҒАН СУЛАРДЫ ТАЗАРТУ

Зерттеуде табиғи цеолит пен оның модификацияланған түрлерінің су ерітінділерінен йодтың тұрақты изотопын (^{127}I) жою тиімділігі қарастырылды. Табиғи цеолит күміс (Ag^+) және мыс (Cu^{2+}) иондарымен ионалмасу әдісі арқылы модификацияланды. Модификацияланған үлгілердің құрылысы мен химиялық құрамы рентгенфлуоресценттік талдау (XRF), рентгендік дифракция (XRD) және энергия-дисперсиялық рентгендік талдауы бар сканерлейтін электрондық микроскопия (SEM-EDX) тәсілдерімен зерттелді.

Кинетикалық тәжірибелер нәтижелері Cu -модификацияланған цеолиттің сорбциялық тепе-теңдікке Ag -модификацияланған үлгіге қарағанда жылдамырақ жететінін көрсетті. Cu -модификацияланған цеолит үшін тепе-теңдікке жету уақыты шамамен 30,5 сағатты, ал Ag -модификацияланған үлгі үшін шамамен 36,0 сағатты құрады. Су ерітінділерінен йодты жою дәрежесі екі жағдайда да жоғары болды: Cu -модификация үшін 99,4% және Ag -модификация үшін 99,1%.

Сорбция изотермаларын талдау деректердің Ленгмюр моделіне жақсы сәйкес келетінін ($R^2 > 0,98$) көрсетті. Бұл ретте модификацияланған цеолиттердің есептелген максималды сорбциялық сыйымдылығы табиғи цеолитке қарағанда жоғары болды.

Алынған нәтижелер металмен модификацияланған цеолиттердің су ерітінділерінен йодқұрамды ластаушыларды жою үшін тиімді әрі экологиялық қауіпсіз сорбенттер екенін растайды. Cu -модификациясы сорбцияның жылдамдығын арттырып, су тазарту жүйелеріне енгізуге аса қолайлы екенін көрсетті.

Түйін сөздер: радионуклидтерді жою, модификацияланған цеолит, йод адсорбциясы, күміс нанобөлшектері, мыс иондары, суды тазарту.

A.A. Kanykeshova, I.O. Sapargali*, K.S. Bexeitova, S. Azat

Satbayev University,

050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev street, 22

*e-mail: sapargali.i@mail.ru

PURIFICATION OF WATER CONTAMINATED WITH RADIOACTIVE IODINE USING NATURAL AND MODIFIED ZEOLITE

The study evaluated the performance of natural zeolite and its modified forms for removing the stable iodine isotope (^{127}I) from aqueous solutions. The natural zeolite was modified with silver (Ag^+) and copper (Cu^{2+}) ions via an ion-exchange method. The structure and chemical composition of the modified samples were characterized by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray analysis (SEM-EDX).

Kinetic experiments showed that the Cu-modified zeolite reached sorption equilibrium faster than its Ag-modified counterpart. The time to equilibrium was approximately 30.5 h for the Cu-modified zeolite and about 36.0 h for the Ag-modified sample. In both cases, iodine removal from aqueous solutions was high: 99.4% for the Cu-modified zeolite and 99.1% for the Ag-modified zeolite.

Analysis of the adsorption isotherms indicated that the data were best described by the Langmuir model, with a coefficient of determination $R^2 > 0.98$. The calculated maximum sorption capacity of the modified zeolites exceeded that of the natural zeolite.

These results confirm that metal-modified zeolites are highly effective and environmentally safe sorbents for the removal of iodine-containing contaminants from water. Of particular practical interest is the Cu modification, which exhibits improved sorption kinetics and is therefore promising for water treatment technologies.

Key words: radionuclide removal, modified zeolite, iodine adsorption, silver nanoparticles, copper ions, water purification.

Авторлар туралы мәліметтер

Акерке Алмасқызы Қаныкешова – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6517-6933>.

Инабат Омирузакқызы Сапарғали* – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Лаура Нурланқызы Сеймуханова – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1438-6568>.

Қалампыр Сунакбаевна Бексейтова – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, философия докторы; e-mail: bekalsu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5014-9407>.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының жетекшісі; e-mail: seytghan.azat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3858-9477>.

Сведения об авторах

Акерке Алмасқызы Қаныкешова – Сәтбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6517-6933>.

Инабат Омирузакқызы Сапарғали* – Сәтбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Лаура Нурланқызы Сеймуханова – Сәтбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1438-6568>.

Қалампыр Сунакбаевна Бексейтова – Сәтбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, доктор философии; e-mail: bekalsu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5014-9407>.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Сәтбаев Университет, руководитель лаборатории инженерного профиля; e-mail: seytghan.azat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3858-9477>.

Information about the authors

Akerke Almaskyzy Kanykeshova – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6517-6933>.

Inabat Omiruzakkyzy Sapargali* – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Laura Nurlanovna Seimukhanova – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1438-6568>.

Kalampyr Sunakbaevna Bexeitova – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: bekalsu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5014-9407>.

Seitkhan Azat – Satbayev University, Head of the Engineering Laboratory; e-mail: seytghan.azat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3858-9477>.

Поступила в редакцию 11.06.2025

Поступила после доработки 20.10.2025

Принята к публикации 21.10.2025