

А.Г. Сламгожа¹, Ш.Т. Султахан², Г.У. Байташева³,
 К. Тоштай¹, Н.А. Ахметов⁴, К.Т. Тастанбек^{1,4},
 Н.Ш. Акимбеков^{1,4}, Ж.Т. Тауанов^{1,4*}

¹ Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

² Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

³ Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

⁴ Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНИТЕЛЯ ЦЕФТРИАКСОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА

В статье рассмотрена очистка воды от фармацевтических препаратов (цефтриаксона) путем сорбции модифицированным природным цеолитом. Модификация цеолита была проведена на поверхности активным веществом (цетилtrimетиламмоний бромид или ЦТАБ) с разными концентрациями. В исследовании применения природного цеолита для очистки сточных вод от фармацевтических веществ было установлено, что степень адсорбции достигает 97,3% для цефтриаксона, при начальной концентрации 50 мг/л. Изотермы адсорбции соответствовали модели Ленгмюра, что подтверждает высокую эффективность цеолита в очистке воды от фармацевтических загрязнителей и его потенциал для промышленного применения. Результаты исследования подтверждают перспективность применения природных цеолитов в системах очистки воды.

Ключевые слова: природный цеолит, модифицированный цеолит, фармацевтическое вещество, изотерма адсорбции, кинетика адсорбции, очистка воды.

A.G. Slamgozha¹, S.T. Sultakhan², G.U. Baitasheva³, K. Toshtay¹,
 N.A. Akhmetov⁴, K.T. Tastambek^{1,4}, N.S. Akimbekov^{1,4}, Z.T. Tauanov^{1,4*}

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

² Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

³ Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

⁴ Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

Water purification from pharmaceutical contaminant ceftriaxone using modified natural zeolite

The article discusses the purification of water from pharmaceutical preparations (ceftriaxone) by sorption with a modified natural zeolite. The zeolite was modified with a surfactant (cetyltrimethylammonium bromide or CTAB) with different concentrations. In a study of the use of natural zeolite for wastewater treatment from pharmaceutical substances, it was found that the degree of adsorption reaches 97.3% for ceftriaxone, at an initial concentration of 50 mg/l. The adsorption isotherms corresponded to the Langmuir model, which confirms the high efficiency of zeolite in water purification from pharmaceutical pollutants and its potential for industrial applications. The results of the study confirm the prospects of using natural zeolites in water purification systems.

Key words: natural zeolite, modified zeolite, pharmaceutical substance, adsorption isotherm, adsorption kinetics, water purification.

А.Г. Сламгожа¹, Ш.Т. Султахан², Г.У. Байташева³, К. Тоштай¹,
Н.А. Ахметов⁴, К.Т. Тастанбек^{1,4}, Н.Ш. Акимбеков^{1,4}, Ж.Т. Тауанов^{1,4*}

¹ Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

² «Satbayev University», Алматы, Қазақстан

³ Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

⁴ Қожа Ахмет Ясави атындағы Халықаралық Қазақ-Түрк Университеті, Туркестан, Қазақстан

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

Модификацияланған табиги цеолитті пайдалана отырып, цефтриаксонның фармацевтикалық ластауышынан суды тазарту

Мақалада өзгерілген табиги цеолитпен сорбциялау арқылы суды фармацевтикалық ластауышлардан (цефтриаксоннан) тазарту қарастырылған. Цеолиттің модификациясы әр түрлі концентрациядағы беттік белсенді затпен (цетилtrimетиламмоний бромиді немесе ЦТАБ) жүргізілді. Ағынды суларды фармацевтикалық заттардан тазарту үшін табиги цеолитті қолдануды зерттеуде адсорбция дәрежесі Цефтриаксон үшін 97,3% – ға жететіні анықталды, бастапқы концентрациясы 50 мг/л. Адсорбция изотермалары Ленгмюр моделіне сәйкес келді, бұл цеолиттің суды фармацевтикалық ластауыш заттардан тазартудағы жоғары тиімділігін және оның өнеркәсіптік қолдану әлеуетін растайды. Зерттеу нәтижелері суды тазарту жүйелерінде табиги цеолиттерді қолдану болашақ мүмкіндіктерін растайды.

Түйін сөздер: табиги цеолит, модификацияланған цеолит, фармацевтикалық зат, адсорбция изотермасы, адсорбция кинетикасы, суды тазарту

1. Введение

Развитие фармацевтической промышленности вызванный растущим мировым спросом на лекарства, непреднамеренно привел к серьезной экологической проблеме: сбросу сточных вод фармацевтических предприятий. Сточные воды фармацевтических предприятий содержат сложную смесь активных фармацевтических веществ, органические загрязнители, токсичные тяжелые металлы и различные другие химические добавки, многие из которых являются стойкими и устойчивыми к традиционным методам очистки сточных вод [1]. Согласно литературным данным [2,3] в бытовых сточных водах Казахстана обнаружены различные группы фармацевтических веществ и их метаболиты, а также остатки средств личной гигиены, стероиды и другие соединения. Среди них присутствуют такие препараты, как антибиотики (тетрациклин, цефтриаксон, сульфаметоксазол, сульфаниламид), противовоспалительные и обезболивающие препараты (ибупрофен, диклофенак, ацетилсалicyловая кислота, парацетамол). Эти вещества широко используются и востребованы как в Казахстане, так и во многих других странах [4].

Антибиотики широко используются для профилактики и лечения инфекционных заболеваний животных и человека. На протяжении нескольких десятилетий все более широкое

применение антибиотиков продолжается благодаря их способности лечить различные заболевания, в основном бактериальные инфекционные заболевания. Из-за постоянного попадания антибиотиков в окружающую среду водные и почвенные организмы подвергаются хроническому воздействию этих препаратов. Более того, поскольку они активны в очень низких концентрациях, они оказывают токсическое воздействие на организмы, и при их совместном применении с другими лекарственными средствами и ксенобиотическими соединениями возникает синергетический эффект. Поэтому существует острая необходимость в инновационных и эффективных технологиях очистки, которые могут эффективно удалять эти загрязняющие вещества.

Для удаления этих компонентов в рамках очистки воды и сточных вод были использованы различные методы, такие как ионный обмен, осаждение, мембранный фильтрация, химическое осаждение и адсорбция, которая является одним из лучших методов удаления токсичных веществ с использованием адсорбента. Одним из наиболее распространенных способов удаления загрязняющих веществ из сточных вод является адсорбция. Этот метод используется для устранения загрязняющих веществ в сточных водах благодаря своей простоте, высокой эффективности и экономичности. Среди материалов, используемых

в процессе адсорбции, активированный уголь, природный цеолит или синтетический цеолит, наноматериалы [5].

Один из наиболее распространенных природных сорбентов используется природные цеолиты. Из-за своей большой площади поверхности и суммарного отрицательного заряда в структуре каналов цеолиты могут адсорбировать загрязняющие вещества, такие как пестициды и тяжелые металлы. Природные цеолиты, как правило, имеют отрицательно заряженную поверхность. Чтобы иметь возможность адсорбировать молекулы лекарственных средств крайне важно заменить отрицательный заряд на подходящий (положительно заряженная поверхность для адсорбции). Модификация природного цеолита катионными поверхностно-активными веществами (ПАВ), такими как гексадецилtrimетиламмонийбромид (HDTMA, ЦТАБ) или бензалкония хлорид, заменяет катионы (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) на органические катионы ПАВ. Более того, цеолиты, модифицированные катионным поверхностно-активным веществом на основе HDTMA, были стабильны при высокой ионной силе и широком диапазоне pH среды [6,7].

В этом исследовании была проведена модификация поверхности цеолита с использованием поверхностно-активного вещества ЦТАБ, чтобы природный цеолит мог адсорбировать молекулы цефтриаксона. Молекулы цефтриаксона лучше адсорбируются на цеолитах, модифицированных катионным поверхностно-активным веществом ЦТАБ. Была проведена оценка адсорбционных свойств цефтриаксона на природном цеолите, модифицированном поверхностно-активным веществом, и проведено сравнение с адсорбционными свойствами без модификации поверхностно-активным веществом ЦТАБ.

Были изучены их структурные и морфологические особенности с описанием полученных материалов современными аналитическими методами, такими как рентгеноструктурный анализ (PCA), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Это исследование позволяет оценить потенциал природного цеолита, расширить области их применения и создать новые композитные материалы.

Данная работа посвящена изучению адсорбционных свойств природного цеолита при удалении антибиотиков из водных растворов. Задачей исследования является оценка эффективности природного цеолита и с модифицированным цеолитом при адсорбции цефтриаксона. Это исследование оценивает эффективность и потенциал природного цеолита в очистке воды, учитывая его высокие адсорбционные свойства и практическую значимость для современных задач сфере химии и экологии. Благодаря уникальной структуре и возможности целенаправленной модификации функциональных характеристик, цеолит представляет перспективный материал для удаления фармацевтических загрязнителей из воды.

2. Материалы и методы исследования

2.1 Материалы. В качестве цеолита использовался природный цеолит (Шанканайское месторождение (Алматинская область, Казахстан), Цефтриаксон натрия (Sigma Aldrich, 99.5%), ЦТАБ (Гексадецилtrimетиламмоний бромид, Sigma Aldrich, $\geq 99\%$), деионизированная вода особой чистоты.

Для характеристизации цеолита использовался метод рентгенофазового анализа (РФА) с использованием дифракционной системы MPD XCEL-221 при параметрах 30 кВ и 10 мА, применяя излучение $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,540056 \text{ \AA}$) со скоростью сканирования 0,02 °/с в диапазоне 20° от 10° до 70°.

2.2 Модификация цеолита. Модификация природного цеолита проводилась следующим образом: 25 грамм природного цеолита помещалась в 250 мл раствора ЦТАБ и перемешивался со скоростью 200 об/мин при температуре 30 °C в течение 48 часов. После для удаления избытка остатков ЦТАБ цеолит промывали дистиллированной водой 5 раз. Модификация проводилась с концентрациями 10, 20, 30 mM ЦТАБ. Для определения оптимального условия для модификации цеолита, были проведены опыты по определению максимальной сорбционной емкости удаления цефтриаксона из водного раствора (рис. 1).

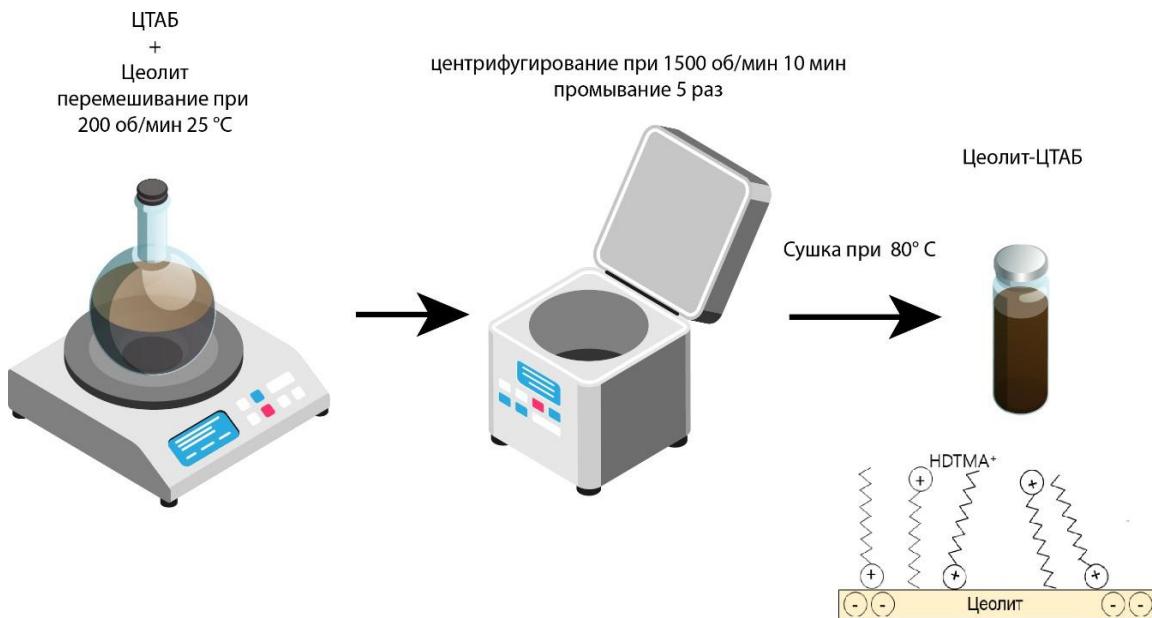


Рисунок 1 – Схематическая диаграмма модификации природного цеолита

2.3 Изотерма адсорбции. В этой работе были проведены периодические эксперименты для определения степени адсорбции цефтриаксона. Для этого бралось 100 мг адсорбента размером 0,63 мм, который был помещен в 10 мл в раствор цефтриаксона. В каждую пробирку

добавляли 10 мл раствора цефтриаксона с концентрацией 5, 10, 20, 30 и 40 мг/л. Растворы

перемешивались на орбитальном шейкере со скоростью 350 об/мин в течение 24 часов для полного достижения равновесия изотермы. Образцы затем количество определялся с помощью УФ-спектрофотометра при длине волны 272 нм [8].

Сорбционная емкость q_e (мг/г) адсорбата было рассчитано с помощью уравнения (1) и эффективность удаления (%) уравнением (2):

$$q_e = \frac{(C_{00} - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

$$\%Y = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

где, q_e (мг/г) – равновесная сорбционная емкость вещества, C_0 и C_e (мг/л) – начальная и равновесная концентрация вещества соответственно, V (мл) – общий объем раствора, а m (г) – масса используемого сорбента.

троверности экспериментальных данных и изучения адсорбционного поведения на однородных и гетерогенных поверхностях. Линейный тип изотермы Ленгмюра выражается в уравнении (2):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L} + \frac{C_e}{q_{max}}, \quad (2)$$

где, C_e (мг/л) – равновесная концентрация в водной фазе, q_e и q_{max} (мг/г) – равновесная и максимальная разрушающая способность, а K_L (л/мг) – постоянная Ленгмюра.

Линейный тип изотермы Фрейндлиха выражается в (3) уравнении.

$$\ln \frac{q_e}{q_{max}} = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

где, C_e (мг/л) и q_e (мг/г) – адсорбционная способность равновесных концентраций, а n

Исследование сорбционных характеристик делались моделями адсорбционной изотермы Ленгмюра и Фрейндлиха, для оценки дос-

(безразмерные) и K_F -константы Фрейндлиха [5].

3. Результаты и обсуждение

3.1 Анализ образцов с использованием рентгеноструктурный анализа. Анализ XRD показал, что цеолит состоит из в основном из клиноптиолита является основным минералом в образце и имеет небольшой состав морденита. На рис. 2 представлены результаты рентгеноструктурного анализа цеолитного материала,

который использовался для определения химического состава. XRD картина цеолитового материала свидетельствует о существовании цеолита типа клиноптилолита. Индексы Миллера

клиноптилолитов типов (-131), (-421), (-222), (151) и (-602) можно определить по пикам при $2\theta = 22,8^\circ, 26^\circ, 30,1, 32,67^\circ$ и $44,2$ на основании карточек №JCPDS 00-025-1349 и 01-079-1460.

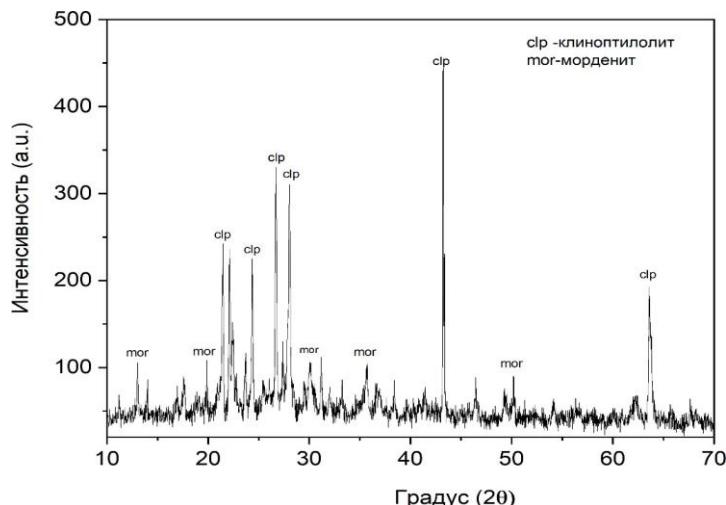


Рисунок 2 – Спектры рентгеноструктурного анализа природного цеолита

На таблице 1 представлена подробный анализ характеристик природного цеолита, основным компонентом которого является клиноптилолит. Массовая доля которого варьируется от 50 до 84%. Тем самым основная

доля материала состоит из цеолита. Материал имеет твердость 4,5 по шкале Мооса, что указывает на его умеренную прочность, что дает возможность устойчивость к механическим воздействиям.

Таблица 1 – Основные физико-химические показатели природного цеолита

No.	Показатель	Характеристики
1.	Массовая доля цеолита, (%)	50-84
2.	Минеральная форма цеолита	клиноптилолит
3.	Твердость Моосу	4.5
4.	Химический состав (%): SiO ₂ Al ₂ O ₃ TiO ₂ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅ H ₂ O	60-74 14-15 0.070-0.700 1.400-5.830 0.067-0.199 0-2.120 0.130-6.400 0.610-5.450 0.660-4.030 0.012-0.173 0-4.090
5.	Соотношение SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.00-5.28

Соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ указывает на умеренное количество алюминия (Al) и преобладает кремний (Si), это соотношение характерно для цеолитов с устойчивой кристаллической решеткой. Алюминий создает в структуре отрицательные заряды, которые компенсируются катионами и Функциональные группы цефтриаксона (например, карбоксильная и амино группы) могут образовывать водородные связи с поверхностью цеолита.

3.2 Исследование морфологии с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергетической дисперсионной спектроскопии. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) показывает, что природный цеолит

имеет относительно гладкую поверхность с пористыми структурами. После модификации цеолита изображения СЭМ показывают значительное увеличение шероховатости поверхности и образование новых пор (Рис. 3). Модифицированный цеолит демонстрирует структурные изменения, такие как образование больших пор и трещин, что свидетельствует об улучшении его адсорбционных свойств. Если модификация включает добавление активных компонентов, можно наблюдать распространение новых функциональных групп или наночастиц. Эти изменения указывают на эффективность модифицированного цеолита в процессах адсорбции по сравнению с натуральным цеолитом.

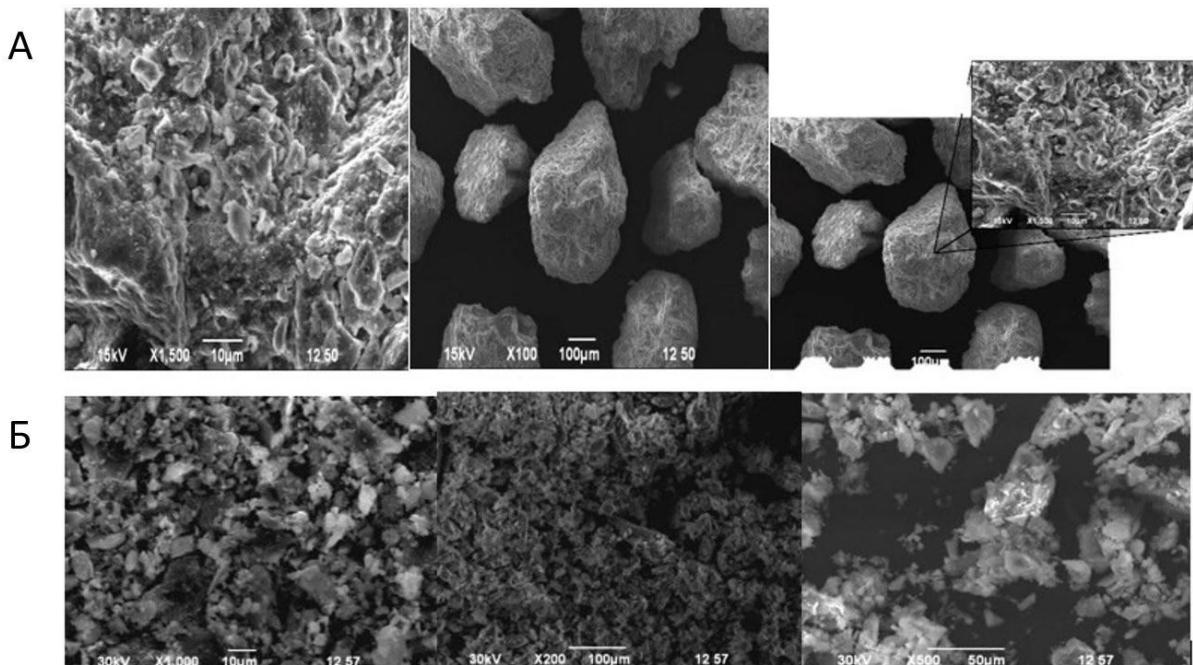


Рисунок 3 – СЭМ изображения природного(А) и модифицированного(В) цеолита

3.3 Исследование адсорбционных свойств материалов. Сорбцию проводили при $\text{pH} = 7$ и при комнатной температуре перемешиванием при 200 об/мин. Изменения q_e в зависимости от C_e были проанализированы с помощью изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха, которые представлены на рисунках 4-6. Параметры подгонки для обеих изотерм приведены в таблице 2. Данные о сорбции хорошо соответствуют по модели Ленгмюра ($R^2 > 0.90$). Значения N всех сорбентов

в равновесном состоянии находились в диапазоне 0,30–0,73, что свидетельствовало о высокой нелинейности и благоприятности процесса сорбции. Коэффициенты корреляции (R^2) моделей Лангрюра были выше, чем у модели Фрейндлиха, что свидетельствует о монослойном механизме адсорбции. Максимальная сорбционная емкость близка к экспериментальному значению. Поэтому, исходя из средних значений обеих моделей, исследованных для всех

образцов, модель Ленгмюра считается более приемлемой. Изотерма Ленгмюра предполагает монослойный характер процесса адсорбции.

Модель предполагает, что скорости адсорбции и десорбции уравновешены и что все активные центры на поверхности адсорбента одинаковы.

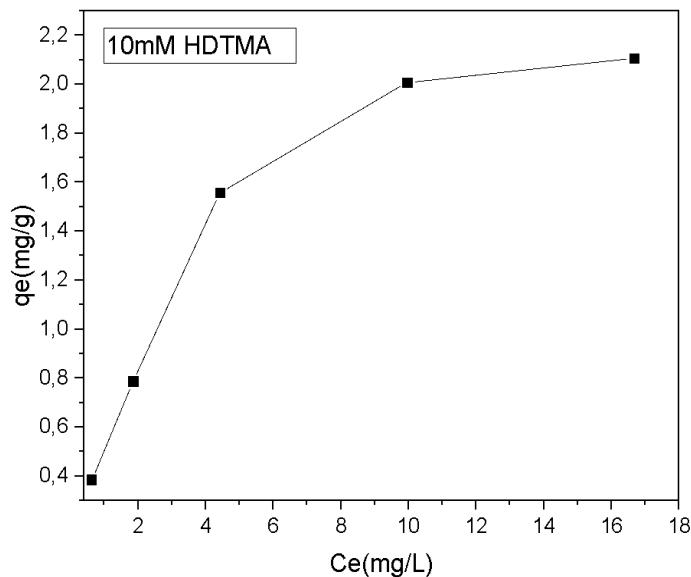


Рисунок 4 – Сорбционная изотерма цефтриаксона с модифицированным цеолитом ЦТАБ с раствором 10 мМ

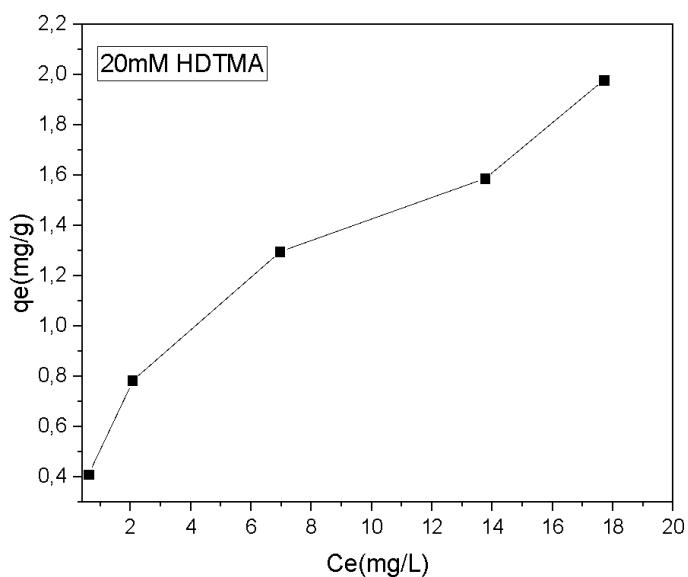


Рисунок 5 – Сорбционная изотерма цефтриаксона с модифицированным цеолитом ЦТАБ с раствором 20 мМ

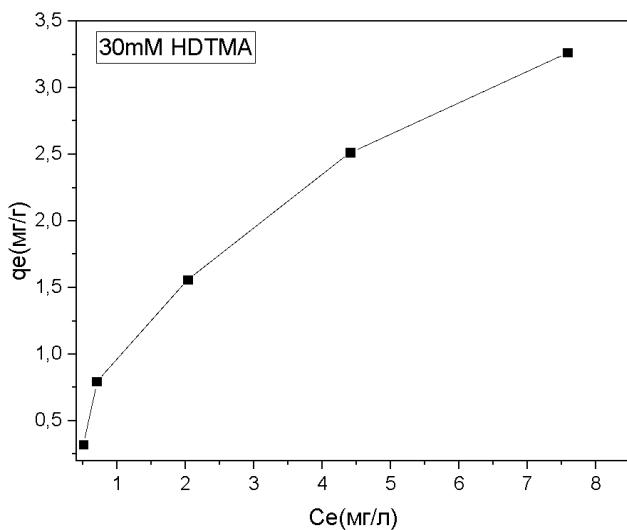


Рисунок 6 – Сорбционная изотерма цефтриаксона с модифицированным цеолитом ЦТАБ с раствором 30 мМ

Результаты расчетов по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха указаны в таблице 2.

Для определения эффективности удаления сорбентов сорбенты помещались в раствор цефтриаксона с концентрацией 50 мг/л и измерялись в отрезке времени.

Сорбция цефтриаксона (Рис. 7) идет с высокой интенсивностью на первые 15 мин сорбции, далее эффективность удаления повышается 1-2%. Что свидетельствует о том, что поглощение идет только на поверхности сорбента и дальнейшие сорбции в микропорах не происходит.

Таблица 2 – Параметры модели для сорбции цефтриаксона

Сорбент	Модель Ленгмюра			Модель Фрейндлиха		
	q _{max} мг/г	K _L	R ²	N	K _F	R ²
Природный цеолит	0,0173	0,1834	0,9114	0,6194	0,5354	0,8559
10 мМ ЦТАБ	3,5323	0,1862	0,9696	0,4614	2,6660	0,8373
20 мМ ЦТАБ	4,2918	0,1605	0,8895	0,3078	3,8082	0,8547
30 мМ ЦТАБ	2,5670	0,2979	0,9055	0,7397	2,8445	0,9029

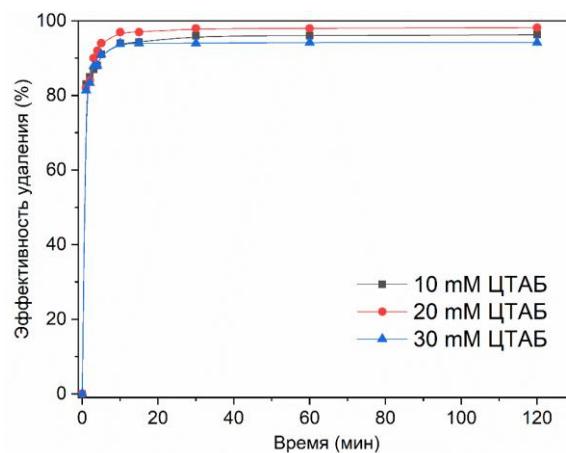


Рисунок 7 – Эффективность удаления цефтриаксона модифицированным цеолитом

Заключение

В данной работе был исследован сорбционные свойства природного цеолита Шанканайского месторождения (Алматинская область, Казахстан) и его модифицированных форм для удаления цефтриаксона из водных растворов. Адсорбент модифицированный с 20 мМ ЦТАБом показал наибольшие сорбционные свойства с эффективностью удаления 97,3% за 15 мин сорбции и 93% для 30ММ, 95% для 10 мМ. Также были изучены физико-химические свойства минерала. Рентгенофазовый анализ подтвердил, что клиноптилолит являлся основной минеральной фазой цеолита, а сканирующая электронная микроскопия показывала рост шероховатости поверхности и пористости после модификации. Экспериментальные изотермы адсорбции хорошо соответствуют модели Ленгмюра с коэффициентом детерминации более 0,90, что указывает на монослоинный

механизм сорбции. Основными механизмами взаимодействия цефтриаксона с модифицированными цеолитами являются электростатические силы, гидрофобные взаимодействия и межмолекулярные связи водородом. Есть несколько перспективных направлений для дальнейшего исследования с целью повышения эффективности: анализ влияния размера частиц цеолита; исследование влияния условий модификации; исследование опции восстановления сорбента.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, BR24992814 «Развитие инновационных технологий и создание современной инфраструктуры для устойчивого развития Южно-Казахстанской области».

Литература

1. Ortúzar, M., Esterhuizen, M., Olicón-Hernández, D. R., González-López, J., & Aranda, E. (2022). Pharmaceutical pollution in aquatic environments: A concise review of environmental impacts and bioremediation systems. *Frontiers in Microbiology*, 13, 869332. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.869332>
2. Kamal, A., Satayeva, A., Aubakirova, B., & others. (2023). Medical substances in environmental systems of the Central Asia region. *Engineering Science*. Retrieved January 31, 2025, from <https://www.espubisher.com/journals/articledetails/978>
3. Aubakirova, B., Beisenova, R., & Boxall, A. B. (2017). Prioritization of pharmaceuticals based on risks to aquatic environments in Kazakhstan. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(5), 832–839. <https://doi.org/10.1002/ieam.1946>
4. Kamgang Djoko, F. H., Fotsop, C. G., Kamgang Youbi, G., Nwanonenyi, S. C., Oguzie, E. E., & Madu, A. (2024). Efficient removal of pharmaceutical contaminant in wastewater using low-cost zeolite 4A derived from kaolin: Experimental and theoretical studies. *Materials Chemistry and Physics*, 315, 128994. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128994>
5. Patel, M., Kumar, R., Kishor, K., Mlsna, T., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2019). Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: Chemistry, occurrence, effects, and removal methods. *Chemical Reviews*, 119(6), 3510–3673. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299>
6. Naimah, K., Harjono, H., Jumaeri, J., & Kadarwati, S. (2021). Performance of HDTMA-Br-modified Indonesian zeolite as a drug carrier candidate for diclofenac sodium. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 24(3), 91–100. <https://doi.org/10.14710/jksa.24.3.91-100>
7. Gaw, E. A. P., & Nuñez, J. A. P. (2024). Development of HDTMA-modified Philippine natural zeolite (PNZ) for sulfamethoxazole adsorption. *Materials Research Express*, 11(11), 115505. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad13e9>
8. Ijaz, I., Bukhari, A., Nazir, A., Gilani, E., Zain, H., Shaheen, A., et al. (2025). Synthesis of MoBTx@SF@PA composite for efficient and rapid adsorption of indomethacin and ceftriaxone: Unveiling exceptional adsorption performance and potential mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 361, 131591. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131591>

References

1. Ortúzar, M., Esterhuizen, M., Olicón-Hernández, D. R., González-López, J., & Aranda, E. (2022). Pharmaceutical pollution in aquatic environments: A concise review of environmental impacts and bioremediation systems. *Frontiers in Microbiology*, 13, 869332. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.869332>
2. Kamal, A., Satayeva, A., Aubakirova, B., & others. (2023). Medical substances in environmental systems of the Central Asia region. *Engineering Science*. Retrieved January 31, 2025, from <https://www.espubisher.com/journals/articledetails/978>
3. Aubakirova, B., Beisenova, R., & Boxall, A. B. (2017). Prioritization of pharmaceuticals based on risks to aquatic environments in Kazakhstan. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(5), 832–839. <https://doi.org/10.1002/ieam.1946>

4. Kamgang Djoko, F. H., Fotsop, C. G., Kamgang Youbi, G., Nwanonenyi, S. C., Oguzie, E. E., & Madu, A. (2024). Efficient removal of pharmaceutical contaminant in wastewater using low-cost zeolite 4A derived from kaolin: Experimental and theoretical studies. *Materials Chemistry and Physics*, 315, 128994. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128994>
5. Patel, M., Kumar, R., Kishor, K., Misra, T., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2019). Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: Chemistry, occurrence, effects, and removal methods. *Chemical Reviews*, 119(6), 3510–3673. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299>
6. Naimah, K., Harjono, H., Jumaeri, J., & Kadarwati, S. (2021). Performance of HDTMA-Br-modified Indonesian zeolite as a drug carrier candidate for diclofenac sodium. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 24(3), 91–100. <https://doi.org/10.14710/jksa.24.3.91-100>
7. Gaw, E. A. P., & Nuñez, J. A. P. (2024). Development of HDTMA-modified Philippine natural zeolite (PNZ) for sulfamethoxazole adsorption. *Materials Research Express*, 11(11), 115505. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad13e9>
8. Ijaz, I., Bukhari, A., Nazir, A., Gilani, E., Zain, H., Shaheen, A., et al. (2025). Synthesis of MoBTx@SF@PA composite for efficient and rapid adsorption of indomethacin and ceftriaxone: Unveiling exceptional adsorption performance and potential mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 361, 131591. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131591>

Сведения об авторах:

Аружан Сламгожа Галымжанкызы – магистрант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, кафедра «Химической физики и материаловедения», e-mail: arutuan43@gmail.com.

Шынгысхан Султахан Темирханулы – магистр технических наук, научный сотрудник Сатпаев университета, e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com.

Байтасева Гаухар Умирзалиева – к. с.-х. н., доцент, директор Института естествознания, Казахский национальный женский педагогический университет, e-mail: baytasheva.gauhar@qyzpu.edu.kz.

Кайнаубек Тоштай – PhD, доцент, кафедра «Физическая химия, катализ и нефтехимия», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, e-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz.

Нурлан Абдурахманович Ахметов – PhD, директор, НИИ Экологии, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, e-mail: nurlan.akhmetov@ayu.edu.kz.

Куаныш Талгатович Тастамбек – PhD, директор, НИИ Устойчивости экологии и биоресурсов, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, e-mail: kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz.

Акимбеков Нуралы Шардарбекович – PhD, профессор НИИ «Устойчивости экологии и биоресурсов» КазНУ им. аль-Фараби, e-mail: akimbeknur@gmail.com.

Жандос Турегулович Тауанов – PhD, ассоциированный профессор-исследователь, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz.

Information about the authors

Aruzhan Slamgozha – Master's student, Department of Chemical Physics and Materials Science, Al-Farabi Kazakh National University, e-mail: arutuan43@gmail.com

Shynggyskhan Sultakhan – Master of Technical Sciences, Researcher, Satbayev University, e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com

Gauhar Baytasheva – Associate Professor, Director of the Institute of Natural Sciences, Kazakh National Women's Pedagogical University, e-mail: baytasheva.gauhar@qyzpu.edu.kz

Toshtay Kainaubek – PhD, associate professor, department of «Physical Chemistry, Catalysis and Petrochemistry», Al-Farabi Kazakh National University, e-mail: kainaubek.toshtay@kaznu.kz

Nurlan Akhmetov – PhD, director, SRI Ecology, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, e-mail: nurlan.akhmetov@ayu.edu.kz

Kuanysh Tastambek – PhD, director, SRI Sustainability of ecology and bioresources, Al-Farabi Kazakh National University, e-mail: kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz

Akimbekov Nuraly – PhD, Professor, Research Institute of “Sustainability of Ecology and Bioresources” of Al-Farabi Kazakh National University, email: akimbeknur@gmail.com.

Zhandos Tauanov – PhD, associate professor-researcher, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz