

Сравнительное исследование адсорбционных свойств оксида кремния при удалении органических загрязнителей и тяжелых металлов

Г.Е. Ергазиева^{1,2*}, Л.К. Мылтыкбаева^{1,2}, І. Қуаныш^{1,3}, А.М. Асылхан²,
Ж.А. Назарбаева², Н.В. Идрисов^{4,5}, А. Баратов^{4,5}, Д. Есенкелдина^{4,5}, С. Капан^{4,5}

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

³Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, Алматы, Казахстан

⁴Satbaev university, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

⁵Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан

ARTICLE INFO

Получено
09.02.2026

Получено в исправленном
виде
30.03.2026

Принято
07.04.2026

Ключевые слова:

оксид кремния;
адсорбция;
ионы меди;
ароматические
углеводороды;
селективность;
пористая структура

АННОТАЦИЯ

Удаление смешанных загрязнений (ионы тяжелых металлов и ароматические углеводороды) из водных систем требует разработки эффективных и селективных адсорбентов. В настоящей работе проведено сравнительное исследование адсорбционных свойств оксида кремния различной степени чистоты (80% и 100%) в отношении ионов Cu^{2+} и ароматических углеводородов (бензол, этилбензол, м, п-ксилолы). Исследована кинетика адсорбции, пористая структура материалов охарактеризована методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота. Результаты выявили парадоксальное превосходство технического оксида кремния (80%) над высокочистым образцом (100%) при адсорбции ионов меди, максимальная степень сорбции составила 36,90% против 32,37%, время достижения равновесия – 10 мин против 30 мин. Для ароматических углеводородов наблюдается обратная тенденция: высокочистый SiO_2 проявляет высокую селективность к адсорбции бензола, степень удаления возрастает от 17 до 79% за 40 мин с одновременной десорбцией более объемных молекул. Анализ пористой структуры выявил снижение объема микропор в 4,75 раза и кардинальное перераспределение мезопор при очистке, исчезновение пика при 5-10 нм и появление нового максимума при 40-60 нм. Кинетика адсорбции бензола на техническом SiO_2 описывается моделью псевдо-второго порядка ($R^2 = 0,992$), что указывает на хемосорбционный механизм. Установлена взаимосвязь между архитектурой пор и селективностью адсорбции: технический SiO_2 с развитой микропористостью и узким распределением мезопор (5-10 нм) эффективен для быстрого удаления ионов металлов, высокочистый SiO_2 с полимодальным распределением мезопор (20-100 нм) обеспечивает молекулярно-ситовую селективность для органических соединений. Полученные результаты позволяют оптимизировать выбор адсорбента в зависимости от типа загрязнителя и открывают возможности для экономически эффективного дизайна адсорбционных материалов без дополнительной очистки исходного сырья.

1. Введение

Загрязнение водных ресурсов токсичными соединениями представляет собой одну из наиболее критических проблем экологической безопасности в современном мире. Промышленные сточные воды содержат опасные вещества, включая ионы тяжелых металлов (кадмий, свинец, медь и др.) и летучие органические соединения

(бензол, толуол, ксилол), которые легко попадают в экосистему и пищевую цепь через сельскохозяйственный сток, промышленные выбросы и коммунальные сбросы [1-4]. Эти загрязнители являются потенциально канцерогенными и мутагенными веществами, даже при низких концентрациях в водных системах они представляют серьезную угрозу для здоровья человека и окружающей среды [5-7].

*Corresponding author: G.E. Ergazieva; E-mail address: ergazieva_g@mail.ru

Традиционные методы очистки воды, такие как окисление, ионный обмен, обратный осмос и диализ, обладают существенными ограничениями с точки зрения экономической эффективности и функциональности [8-11]. Адсорбционные методы в последние годы завоевали международное признание благодаря своей простоте в эксплуатации, высокой эффективности, экономичности и способности удалять широкий спектр загрязнителей как органической, так и неорганической природы [12-14].

Сорбенты на основе оксида кремния привлекли значительное внимание исследователей и практиков в последние два десятилетия как перспективные материалы для удаления загрязнителей из водных и газовых потоков [15-18]. Диоксид кремния обладает уникальным сочетанием физико-химических свойств, таких как высокая удельная поверхность, развитая система микро- и мезопор, химическая и термическая стабильность, а также возможность функционализации поверхности [19, 20].

Зеленый синтез наночастиц SiO_2 из биомассы (рисовая шелуха, бамбуковые листья, багасса, кукурузная солома) представляет собой экологически безопасный и экономически эффективный способ получения высокофункциональных адсорбентов [21, 22]. Такие материалы демонстрируют адсорбционную емкость 150-200 мг/г и обеспечивают удаление более 95% различных токсичных веществ из воды с возможностью повторного использования адсорбента в течение более пяти циклов [23, 24].

Параллельное удаление ионов тяжелых металлов и органических соединений из одного раствора является актуальной задачей, однако взаимодействия между различными типами загрязнителей на поверхности адсорбента остаются недостаточно изученными. Необходимость комплексного использования сорбентов на основе оксида кремния для совместной очистки вод от смешанных загрязнений, а также разработка новых материалов с повышенной емкостью и селективностью остаются открытыми исследовательскими вопросами.

Настоящая работа посвящена изучению адсорбционных свойств сорбентов на основе оксида кремния в отношении ионов меди, органических соединений (бензол, этилбензол, м,п-ксилолы) и оценке эффективности удаления этих загрязнителей.

2. Материалы и методы

2.1. Определение концентрации ионов меди и свинца методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии

Содержание ионов Cu^{2+} в исходных растворах и растворах после сорбционной обработки определяли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе PerkinElmer AAnalyst 200. Анализ проводили при рабочей длине волны 324,75 нм, соответствующей максимуму поглощения атомной меди. Щель спектрометра была установлена в диапазоне 2,7/0,8 мм, что обеспечивало необходимое разрешение при сохранении интенсивности аналитического сигнала. Атомизацию образцов осуществляли в воздушно-ацетиленовом пламени при расходе воздуха 10,00 л/мин и ацетилена 2,50 л/мин. Перед проведением анализа выполняли калибровку прибора по стандартным растворам сульфата меди с концентрациями 2 мг/л, 4 мг/л и 10 мг/л. Для оценки эффективности сорбции измеряли абсорбцию исходного раствора Cu^{2+} с начальной концентрацией $C_0 = 10$ мг/л и растворов после сорбционной обработки.

2.2. Определение концентрации органических соединений

Определение исходных концентраций органических соединений, а также их концентраций после сорбционной обработки проводили на газовом хроматографе ХРОМОС-1000 в следующем рабочем режиме: температура термостата колонки программировалась от 35 °С до 295 °С со скоростью 10 °С/мин, температура испарителя составляла 250 °С, температура детектора – 300 °С, расход водорода через колонку – 80 мл/мин, расход воздуха – 250 мл/мин. Подготовку проб на начальном этапе проводили в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды, при температуре воздуха (20 ± 10) °С. В соответствии с указанным стандартом были приготовлены исходный раствор органических соединений для градуировки, а также рабочие растворы с концентрацией 0,1 мг/см³. Определение сорбционной емкости образцов проводили в течение 5, 10, 20, 30 и 40 мин.

На основе полученных значений сорбции с использованием калибровочной кривой определяли остаточные концентрации ионов меди и органических соединений в растворах (C_t). Степень сорбционной очистки (η , %) рассчитывали по формуле:

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

Адсорбционную емкость сорбента (q , мг/г) определяли из выражения:

$$q = \frac{C_0 - C_t}{m} \times V$$

где: C_0 и C_t – начальная и остаточная концентрации ионов Cu^{2+} или органических соединений (мг/л); V – объем раствора (л); m – масса сорбента (г).

Каждое измерение повторяли не менее трех раз, по полученным результатам рассчитывали среднее арифметическое значение и стандартное отклонение. Стандартная ошибка не превышала 5% от среднего значения.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Адсорбция ароматических углеводородов

Сопоставительный анализ кинетики адсорбции ароматических углеводородов на оксиде кремния с различной степенью чистоты (рис. 1) показывает, что изменение чистоты сорбента существенно влияет как на форму кинетических кривых, так и на селективность по отношению к отдельным компонентам смеси.

Для оксида кремния с чистотой 80% (рис. 1а, табл. 1) характерны ярко выраженная многостадийность процесса и сложное конкурентное взаимодействие между адсорбатами. На начальном этапе (5–10 мин) для всех четырех соединений наблюдается быстрый рост степени удаления, что

связано с диффузионно-контролируемым заполнением наиболее доступных и энергетически выгодных центров поверхности [25]. В этот период кинетика определяется размером и формой молекул. Бензол, как наименьший по молекулярному объему, наиболее быстро достигает поверхности и пор сорбента, тогда как более громоздкие молекулы этилбензола и ксилолов испытывают стерические затруднения при проникновении в узкие поры [26]. На интервале 10–20 мин адсорбция замедляется, что связано с формированием диффузионного торможения и частичным заполнением наиболее активных центров [27]. Однако уже на интервале 20–30 мин для системы на основе 80%-го оксида кремния проявляется резкое снижение степени сорбции части компонентов, что интерпретируется как эффект конкурентного вытеснения. Более кинетически и термодинамически предпочтительный бензол постепенно вытесняет этилбензол и ксилолы с поверхности и из пор сорбента [28].

Переход к использованию чистого оксида кремния (100%, рис. 1б, табл. 2) приводит к изменению поведения системы. Поверхность такого сорбента более однородна по энергетическим характеристикам, это отражается прежде всего на кинетике бензола [29]. В отличие от системы с 80%-ым оксидом кремния, здесь бензол демонстрирует монотонный рост степени сорбционной очистки во всем интервале времени (от 17 до 79%). Такой характер зависимости указывает на преобладание процесса адсорбции над десорбцией и последовательное заполнение доступных центров, в том числе в более узких и глубоких порах. Бензол становится предпочтительно адсорбируемым компонентом в системе с чистым SiO_2 , что подчеркивает высокую селективность материала по отношению к наименьшей по размеру молекуле.

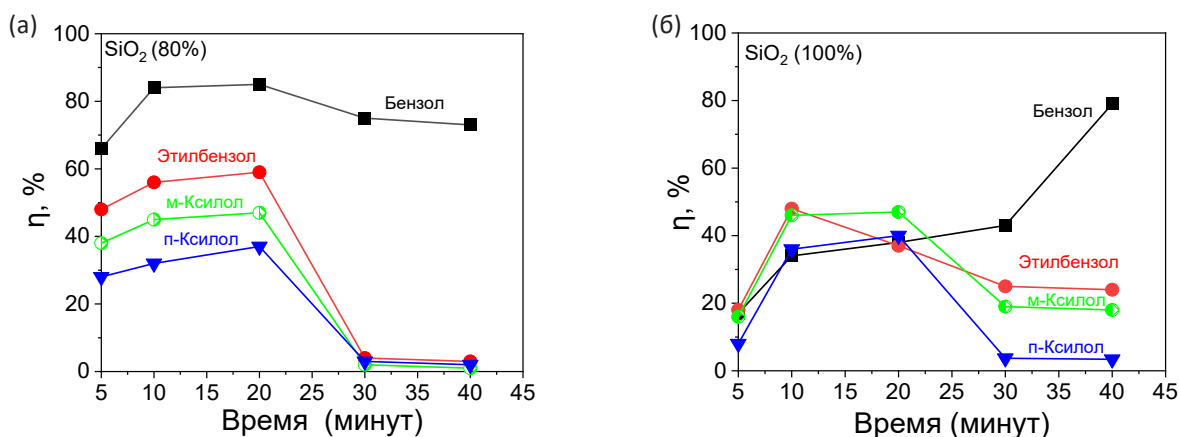


Рис. 1. Зависимость степени сорбционной очистки сорбентов от времени сорбции.

Таблица 1. Влияние времени сорбции на сорбционную емкость SiO_2 (80%)

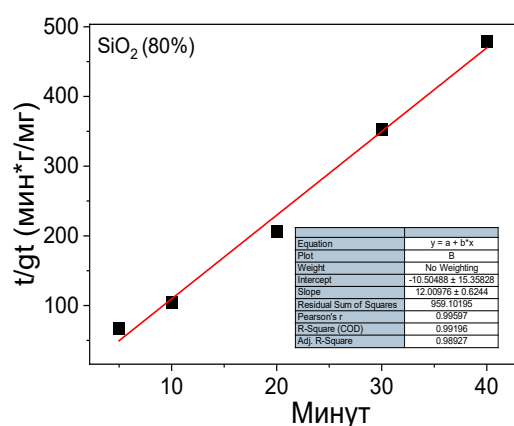
Время сорбции (мин)	q, мг/г по бензолу	q, мг/г по этилбензолу	q, мг/г по м-ксилолу	q, мг/г по м-ксилолу
5	0,075	0,050	0,038	0,035
10	0,096	0,064	0,045	0,038
20	0,097	0,067	0,048	0,045
30	0,085	0,005	0,003	0,004
40	0,084	0,004	0,002	0,003

Таблица 2. Влияние времени сорбции на сорбционную емкость SiO_2 (100%)

Время сорбции (мин)	q, мг/г по бензолу	q, мг/г по этилбензолу	q, мг/г по м-ксилолу	q, мг/г по м-ксилолу
5	0,026	0,108	0,096	0,049
10	0,071	0,289	0,272	0,218
20	0,082	0,195	0,198	0,106
30	0,090	0,147	0,116	0,023
40	0,160	0,078	0,069	0,012

Кинетика адсорбции бензола на оксиде кремния с чистотой 80% проанализирована с использованием модели псевдо-второго порядка (рис. 2). Эта модель предполагает, что лимитирующей стадией процесса является химическая адсорбция с участием валентных сил через обмен или перераспределение электронов между адсорбатом и сорбентом [30]. Линеаризация экспериментальных данных в координатах t/q_t от времени показала высокую степень корреляции ($R^2 = 0,992$), что подтверждает применимость данной модели для описания процесса.

Высокое значение коэффициента детерминации свидетельствует о том, что лимитирующей стадией процесса является хемосорбция с образованием относительно прочных связей между молекулами бензола и активными центрами поверхности оксида кремния [31].

**Рис. 2.** График зависимости времени от t/q_t для определения кинетики адсорбции бензола на оксиде кремния.

Таким образом, оксид кремния с чистотой 80% может рассматриваться как более «гибкая» по свойствам адсорбционная система, чувствительная к конкурентному взаимодействию и гетерогенности поверхности, тогда как 100%-ый оксид кремния демонстрирует более высокую селективность с ярко выраженным предпочтением бензола и тенденцией к десорбции более тяжелых ароматических компонентов при длительном контакте. Эти различия следует учитывать при проектировании процессов сорбционной очистки и селективного фракционирования многокомпонентных ароматических систем, выбирая степень чистоты оксида кремния в зависимости от требуемой селективности по отношению к целевым компонентам.

3.2. Адсорбция ионов меди

Исследование сорбционной активности двух образцов оксида кремния различной чистоты выявило существенные различия в их адсорбционном поведении в отношении ионов меди (рис. 3).

Образец SiO_2 с чистотой 80% продемонстрировал более высокую начальную сорбционную способность, достигнув 31,07% уже на 5-ой мин эксперимента. Степень сорбции этого материала быстро возрастала до 36,80% в течение первых 10 мин, после чего процесс приближался к равновесному состоянию с финальным значением 36,90% при времени контакта 40 мин. Это свидетельствует об эффективной и относительно быстрой адсорбции ионов меди на поверхности данного образца.

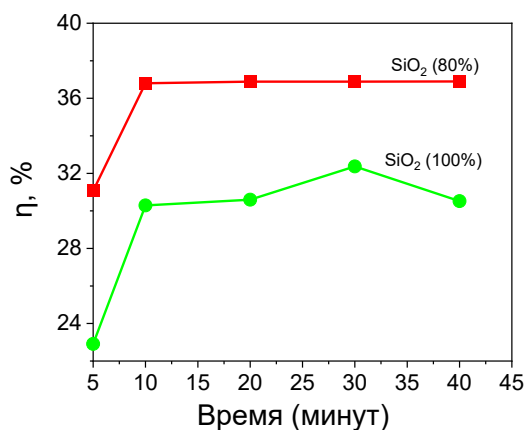


Рис. 3. Зависимость степени сорбционной очистки сорбентов SiO₂ (80%) и SiO₂ (100%) от времени сорбции.

Средняя степень сорбции для SiO₂ 80% составила 35,71%, что указывает на стабильно высокие адсорбционные характеристики материала на протяжении всего временного интервала.

В отличие от этого, образец SiO₂ с чистотой 100% показал более низкие начальные показатели адсорбции, начиная с 22,91% при 15-минутном контакте. Степень сорбции этого материала увеличивалась более плавно и достигала максимума 32,37% только к 30-й мин эксперимента. Последующее снижение значения до 30,52% на 40-й мин может указывать на возможную десорбцию или колебания равновесного состояния. Среднее значение степени сорбции для этого образца составило 29,34%, что существенно ниже, чем для материала с 80% чистотой. Количественное сравнение показывает превосходство SiO₂ 80% над 100% образцом в максимальной степени сорбции, что соответствует относительному преимуществу на 14,0%. Кроме того, 80% образец

достигает равновесного состояния значительно быстрее — уже к 10-й мин, в то время как 100% образец требует 30 мин для приближения к максимальной адсорбционной емкости.

3.3. Анализ пористой структуры сорбентов

Для полного понимания различий в адсорбционном поведении образцов оксида кремния различной чистоты была проведена детальная характеристика их пористой структуры методом анализа адсорбции-десорбции азота при 77 К. Исследование охватило полный диапазон микро- и мезопористости материалов в целях выяснения взаимосвязи между архитектурой пор и адсорбционными свойствами (рис.4).

Исходный образец SiO₂ с 80% чистотой демонстрирует хорошо развитую микропористую структуру (диаметр пор 0,8-2,0 нм) с ярко выраженным максимумом распределения при диаметре пор ~0,9 нм, достигающим значения $dV/dD = 0,057 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{нм}$. Распределение является уширенным, с существенным содержанием пор размерами от 0,8 до 2,0 нм, что свидетельствует о широком спектре микропористости исходного материала [32]. Такая многоцентровая микропористая система обеспечивает многочисленные центры связывания для адсорбата, что объясняет как высокую начальную адсорбционную способность материала, так и склонность к конкурентному взаимодействию между различными компонентами смесей. После проведения процедуры очистки образец SiO₂ 100% чистоты претерпевает существенные изменения, максимум распределения остается при примерно том же характеристическом размере (~0,95 нм), однако объем пор уменьшается более чем в 4 раза, от 0,057 до 0,012 $\text{см}^3/\text{г}\cdot\text{нм}$.

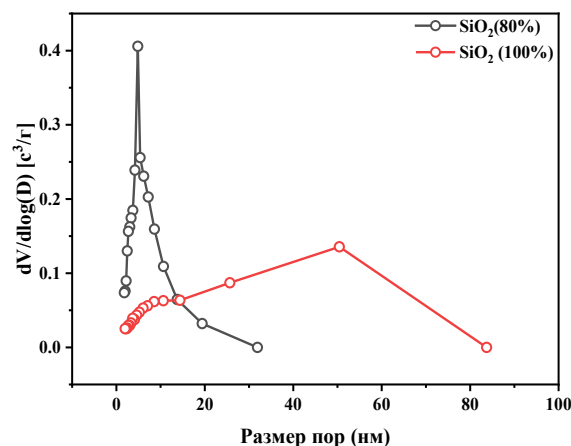
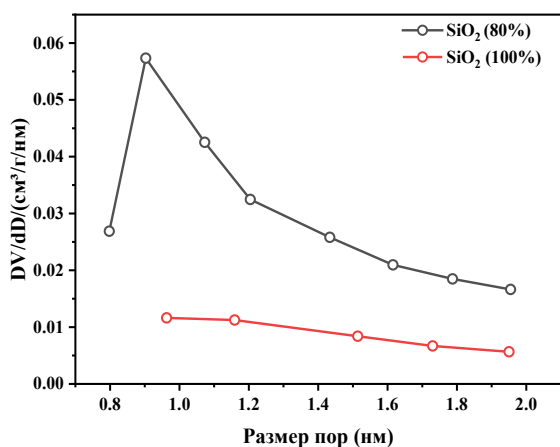


Рис. 4. Результаты анализа пористой структуры сорбентов.

Одновременно распределение становится значительно более компактным и однородным, с более узким диапазоном размеров пор. Снижение доступного объема микропор при сохранении их характеристического размера может быть объяснено удалением адсорбированных примесей и загрязнений, занимающих часть порового пространства, изменением поверхностной энергии материала при очистке и частичным гидролизом кремнезема с последующим сжатием пористой структуры [33]. Полученные результаты микропористого анализа хорошо согласуются с наблюдаемыми различиями в кинетике адсорбции органических соединений, широкое распределение микропор в исходном образце обеспечивает гетерогенную поверхность, приводящую к сложным многостадийным процессам и конкурентному вытеснению, а более узкое распределение в образце 100% чистоты создает однородную поверхность с четкой селективностью по молекулярному размеру [34].

Анализ мезопористой структуры выявил еще более значительные структурные изменения. Исходный образец SiO_2 80% демонстрирует чрезвычайно узкое и монодисперсное распределение мезопор, сконцентрированное в области малых мезопор (5-10 нм) с максимумом $dV/d(\log D) \approx 0,40 \text{ см}^3/\text{г}$, что указывает на хорошо упорядоченную архитектуру материала. Распределение практически исчезает при диаметре $>50 \text{ нм}$, свидетельствуя о крайне узкой полидисперсности и почти полном отсутствии крупных мезопор. Напротив, после очистки образец SiO_2 100% претерпевает кардинальные изменения, пик в исходной области (5-10 нм) существенно снижается до $dV/d(\log D) \approx 0,05 \text{ см}^3/\text{г}$, одновременно в распределении появляется совершенно новый максимум в диапазоне 40-60 нм ($dV/d(\log D) \approx 0,13 \text{ см}^3/\text{г}$). Полное распределение становится явно полимодальным, охватывая расширенный диапазон от 20 до 100 нм.

Механизм наблюдаемого перераспределения пор из области малых (5-10 нм) в область крупных мезопор (40-60 нм) является многофакторным. Удаление адсорбированных загрязнений приводит к коалесценции соседних мелких пор в более крупные полости, что термодинамически благоприятно из-за снижения поверхностной энергии [35]. Процесс очистки может вызывать локальный гидролиз и переотложение кремнезема, при котором мелкие кристаллиты растворяются в локальных щелочных средах и переосаждаются на более крупных структурах, приводя к укрупне-

нию пор. Кроме того, изменение гидрофильности поверхности при удалении органических загрязнений может влиять на механизм конденсации азота, выявляя ранее недетектируемые макропоры в материале.

Полученное перераспределение пор имеет глубокие последствия для функциональных свойств материалов. Исходный узкораспределенный материал с преобладанием микромезопор (5-10 нм) обладает высокой селективностью по размерам молекул и идеален для молекулярного просеивания, фракционирования и селективной адсорбции малых молекул. Материал после очистки с преобладанием крупных мезопор (40-60 нм) теряет молекулярную селективность, но приобретает способность к адсорбции более крупных молекул и коллоидных частиц. Одновременно более однородная поверхность и регулярная пористая архитектура высокочистого образца обеспечивают более предсказуемое и воспроизводимое поведение.

Полученные данные о пористой структуре существенно проясняют различия, наблюдаемые в кинетике адсорбции. Исходный образец SiO_2 80% с развитой микропористостью и узкораспределенными мезопорами обладает высокой начальной адсорбционной способностью благодаря многочисленным активным центрам, что обеспечивает быстрое достижение равновесия для ионов меди и высокую максимальную адсорбционную емкость (36,90%). Однако гетерогенность структуры приводит к конкурентному вытеснению при адсорбции смесей органических соединений. Образец SiO_2 100% с сниженной микропористостью и полимодальной мезопористой структурой демонстрирует четкую селективность по молекулярному размеру для органических соединений (сильная адсорбция бензола, десорбция более крупных молекул), но одновременно снижает эффективность адсорбции ионов металлов из-за меньшего количества высокоэнергетических центров [36]. Таким образом, архитектура пор выступает как критический фактор, определяющий выбор адсорбента для конкретного применения.

4. Заключение

Проведенное сравнительное исследование адсорбционных свойств оксида кремния различной степени чистоты при удалении ионов тяжелых металлов и органических загрязнителей позволило установить критическую роль поверх-

ностных и структурных параметров материала в определении адсорбционной эффективности.

Повышение чистоты оксида кремния с 80% до 100% приводит к качественному изменению селективности материала. Образец с 80% чистотой демонстрирует многостадийный процесс с конкурентным взаимодействием между адсорбатами, что выражается в немонотонных кинетических кривых для этилбензола и ксилолов. Образец 100% чистоты проявляет ярко выраженную селективность по отношению к бензолу, в то время как более объемные ароматические углеводороды подвергаются десорбции при увеличении времени контакта. Анализ кинетики бензола на 80%-ном оксиде кремния с использованием модели псевдо-второго порядка ($R^2 = 0,99$) подтверждает преобладание хемосорбции.

Неожиданный результат показывает превосходство образца SiO_2 с 80% чистотой над 100% образцом. Максимальная степень сорбции составила 36,90% для 80% образца против 32,37% для 100% образца, что соответствует относительному преимуществу 14,0%. Время достижения равновесия также существенно меньше для 80% образца (10 мин против 30). Анализ микропор (0,8–2,0 нм) показывает снижение объема пор более чем в четыре раза (с 0,057 до 0,012 $\text{см}^3/\text{г}\cdot\text{нм}$) при практически неизменном характеристическом размере (0,9–0,95 нм). Анализ мезопор выявляет кардинальное перераспределение, исчезновение пика при 5–10 нм и появление нового максимума при 40–60 нм. Такая реорганизация архитектуры пор может быть обусловлена удалением адсорбированных загрязнений, коалесценцией мелких пор, частичным гидролизом кремнезема и изменением гидрофильности поверхности.

Полученные результаты демонстрируют, что выбор оксида кремния для адсорбционной очистки должен быть определен конкретной задачей. Для селективного удаления малых молекул предпочтительны высокочистые образцы, которые обеспечивают максимальную селективность и минимизируют нежелательное поглощение более объемных компонентов. Однако для удаления ионов тяжелых металлов более целесообразно использование технического оксида кремния (80% чистоты), эффективность которого усиливается присутствием модифицирующих примесей. Это открывает возможности для экономически оптимизированного дизайна адсорбентов, при котором дополнительная очистка исходного материала может быть не только ненужной, но и контрпродуктивной.

Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение совместной адсорбции ионов металлов и органических загрязнителей из смешанных растворов, определение механизмов конкурентного взаимодействия на поверхности адсорбента, разработку методов целенаправленного управления пористой структурой и функционализации поверхности оксида кремния для повышения как емкости, так и селективности материала. Перспективным направлением является использование полученных результатов для оптимизации технологических процессов очистки промышленных сточных вод смешанного загрязнения и разработки на основе технического оксида кремния композитных адсорбентов с контролируемой архитектурой пор.

Author Contribution

Gaukhar Yergazieva – Conceptualization, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Project Administration, Funding Acquisition. **Laura Myltykbayeva** – Methodology, Investigation, Data Curation. **Inzhu Kuanysheva** – Methodology, Investigation, Data Curation. **Aidana Asilkhan** – Investigation, Data Curation. **Zhamilya Nazarbayeva** – Investigation, Data Curation. **Nurlan Idrissov** – Formal Analysis, Validation. **Aibol Baratov** – Formal Analysis, Validation. **Diana Esenkeldina** – Formal Analysis, Validation. **Slambek Kapan** – Formal Analysis, Validation.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Благодарность

Исследование проведено в рамках выполнения научной программы BR28712957, финансируемого Министерством науки и высшего образования РК.

Reference

- [1]. M. Khan, M. Shafi, J. Ahmed, I.A. Ahmed, A. Zada, et al. Mechanistic breakthroughs in affordable adsorbents for heavy metal remediation: An in-depth exploration of next-generation sustainable water purification technologies. *Journal of Hazardous Materials Advances* 19 (2025). 100847. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100847>.

- [2]. H. Perroud, J. Miraux, M. Lions, T. Caillot, C. Ferronato, et al. Combustion of volatile organic compounds in a domestic microwave oven using regenerable sorbent-catalyst combinations. *Separation and Purification Technology* 330 (2024) 125387. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125387>.
- [3]. M. Gheibi, S. Masoomi, M. Eftekhari, et al. Heavy metals adsorption using CDW adsorbents: A sustainable path for water purification. *Journal of Hazardous Materials Advances* 20 (2025) 100883. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100883>.
- [4]. M. Behpour, M. Shadi, S. Nojavan. Preparation of an efficient magnetic nano-sorbent based on modified cellulose and carboxylated carbon nanotubes for extraction of pesticides from food and agricultural water samples before GC-FID analysis. *Food Chemistry* 407 (2023) 135067. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135067>.
- [5]. G. Pandey, N. Rajput, U. Sharma, M.S. Chauhan, N.P. Lamba. Remediation of environmental issues using graphene based materials for water purification: Synthesis, kinetics, and factors effecting the removal of heavy metal ions. *Next Materials* 8 (2025) 100765. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100765>.
- [6]. M. Yuan, L. Yang, Z. Wang, J. Du, S. Shang, et al. Dual-functional GO composite aerogels for water purification and desalination via heavy metal adsorption and solar evaporation. *Desalination* 613 (2025) 119113. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119113>.
- [7]. M. Shilpa, K.S. Harisha, S. Thripithi, M.A. Arpitha, Y. Sangappa. Eco-friendly magnetic silk fibroin films for heavy metal adsorption in water purification. *Next Materials* 9 (2025) 101062. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101062>.
- [8]. A. Adylkanova, M. Kunarbekova, A. Uali. A hydrophobic PMS-biochar-coated sponge sorbent for pre-purification of heavily oil-polluted waters. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 720 (2025) 137154. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137154>.
- [9]. C.T.G. Hua, L.D. Ngiyen, N.K. Bo, P.H. Tran. Saccharine-based ionic liquid functionalized silica gel as an efficient sorbent for heavy metal ion extraction. *Journal of Molecular Liquids* 439 (2025) 128881. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.128881>.
- [10]. K. Al-Ghamdi, A.A. Suhaimi, K.A. Mohaimadi, Y.T.H. Mehdar, S.K. Alharbi, et al. Applications of *Lactobacillus bulgaricus* (Lactic Acid Bacteria) as dispersive solid phase sorbent for sample preparation of heavy metals from aqueous samples. *Green Analytical Chemistry* 15 (2025) 100308. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2025.100308>.
- [11]. J. Sulejmanović, M. Memić, E. Šehović, R. Omanović, S. Begić, et al. Synthesis of green nano sorbents for simultaneous preconcentration and recovery of heavy metals from water. *Chemosphere* 296 (2022) 133971. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133971>.
- [12]. M.K. Hussain, S.K. Hatoon, G. Nizami, U.K. Fatma, M. Ali, et al. Unleashing the power of bio-adsorbents: efficient heavy metal removal for sustainable water purification. *Journal of Water Process Engineering* 64 (2024) 105705. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105705>.
- [13]. M.F. Irfan, T. Siddique, A. Ullah. Utilizing surface modified poultry feathers for senary multi-metal water purification: kinetic and thermodynamic behavior of heavy metal-laden biosorbent. *RSC advances* 15 (2025) 25450-25472. <https://doi.org/10.1039/d5ra02131f>.
- [14]. K. Rashitova, S. Gerasimov, N. Bobrysheva, Q. Wang, B. Noskov, et al. Multifunctional sorbent and photocatalyst material for complex water remediation based on Cu/Cr doped Mg-Al LDHs. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 728 (2025) 138745. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138745>.
- [15]. M. Zarabadipour, M. Soleimani, M.G. Afshar. Application of functionalized $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparticles as an adsorbent for heavy metal removal. *Results in Chemistry* 17 (2025) 102514. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102514>.
- [16]. D. Pilnaj, P. Kuráň, M. Šťastný, V. Pilařová, P. Janoš, et al. C_{18} -functionalized $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ magnetic nano-sorbent for PAHs removal from water. *Environmental Technology & Innovation* 24 (2021) 101905. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101905>.
- [17]. A. Esrafil, S. Bagheri, M. Kermani, M. Gholami, M. Moslemzadeh, et al. Simultaneous adsorption of heavy metal ions (Cu^{2+} and Cd^{2+}) from aqueous solutions by magnetic silica nanoparticles ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) modified using edta. *Desalination and Water Treatment* 158 (2019) 207-215. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24274>.
- [18]. Y. Harinath, D.H.K. Reddy, L.S. Sharma, K. Sessaiah, et al. Development of hyperbranched polymer encapsulated magnetic adsorbent ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-NH}_2\text{-PAA}$) and its application for decontamination of heavy metal ions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (2017) 4994-5001.

- <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.031>.
- [19]. N. Zouli. Synthesis of high-ordered mesoporous aluminosilica monoliths using triblock copolymer and application in the water purification. *Ain Shams Engineering Journal* 15 (2024) 103011. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103011>.
- [20]. M. Faizan, M.Y. Naz, S.A. Shah, I. Shakir, M. Khaliq, et al. Mesoporous magnetic $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ -chitosan nanocomposite for efficient adsorptive removal of Zn (II) and Cd (II) ions from aqueous media. *Desalination and Water Treatment* 324 (2025) 101488. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101488>.
- [21]. M.K. Perumal, D. Gandhi, R.R. Renuka, A. Lakshminarayanan, N. Thiyagarajulu, et al. Advanced nano-based adsorbents for purification of pharmaceutical residue polluted water: A critical review. *Process Safety and Environmental Protection* 186 (2024) 552-565. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.011>.
- [22]. H.J. Kim, M.G. Mohamed, H.J. Yuet, S.H. Baek, I. Hossain, et al. Silica-Based Gas Separation Membranes: Structure-Performance Relationships Across the Si-O Continuum from Polysilsesquioxanes to Amorphous SiO_2 . *Journal of Membrane Science* 740 (2025) 124907. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.124907>.
- [23]. S.M.E. Rahman, Md.A. Rahman, S. Vijayalakshmi, M. Paul, R. Chelliah, et al. Exploring agro-waste derived inorganic nanoparticles (Ag, ZnO, and SiO_2) in the food industry: Green synthesis, characteristics, and applications -A comprehensive review. *Science of The Total Environment* 1008 (2025) 181009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181009>.
- [24]. C.G. Morales-Amaya, P.D. Astudillo-Sánchez, L. Reynoso-Cuevas, R. Herrera-Mendoza, S.A. Lozano-Morales. A short review of immobilized nanostructured systems for arsenic removal in water purification. *Environmental Research*. 285 (2025) 122319. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122319>.
- [25]. D. Zhao, Y. Liu, C. Wu. Adsorption of Cr (VI) polluted water by $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ -APTMS nanocomposites prepared in the presence of ultrasonic irradiation for sustainable water resources utilization. *Ultrasonics Sonochemistry* 96 (2023) 106439. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106439>.
- [26]. G. Ashokan, M.K. Tiwari, V. Racherla, B.K. Dubey. Clay for Clean Water: A Review on Low-Cost Ceramic Filters for Household Drinking Water Purification. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 13 (2025) 119150. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119150>.
- [27]. B. Sarma, R. Kumar, D.N. Gupta. Nitrogen plasma treated cotton fabrics coated with SiO_2 followed by RGO deposition for water purification process. *Chemical Physics Impact* 8 (2024) 100612. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100612>.
- [28]. Z-Y. Wang, L. Xu, C-H Liu, M-L. Fu, B. Yuan. The photothermal hydrogels based on dual-active centers for volatile organic compound simultaneous removal in efficient water purification production. *Journal of Colloid and Interface Science* 705 (2025) 139511. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.139511>.
- [29]. A. Ouchene, H. Khelili, M. Guellal, N. Zouaoui, A. Amraneand. Preparation and characterization of new adsorbents of pea and bean agricultural peels for water purification loaded with organic tryptophan compound. *Desalination and Water Treatment* 234 (2021) 206-221. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27656>.
- [30]. R. Ni, W. Xu, C. Wang, Zh. Man, X. Cheng. The application of iron-manganese compounds towards micropollutants purification in water: A critical review. *Chemical Engineering Journal* 493 (2024) 152553. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152553>.
- [31]. H. Tahir, A.H. Dar, K.K. Dash, T. Majeed, S. Srivastava, et al. Subcritical Water Extraction as a Green Technology for the Recovery of Bioactive Compounds from Algae: A Comprehensive Review. *Food Physics* 3 (2025) 100077. <https://doi.org/10.1016/j.foodp.2025.100077>.
- [32]. M. Rahbari-Sisakht, A.F. Ismail, P.S. Goh, M.S. Abdullah, Y. Raharjo. Two-dimensional nanomaterials in membrane-based water purification: Advances, challenges, and future perspective. *Desalination* 625 (2026) 119935. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2026.119935>.
- [33]. M. Hasanah, A. Manalu, D. Puspitasari, I. Zahar, R. Zhulyan, et al. Sustainable photocatalyst fabrication from Silau River-derived SiO_2 : PVA/ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ for water purification. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 11 (2025) 101059. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.101059>.
- [34]. X. Li, A. Janke, P. Formanek, A. Fery, M. Stamm, et al. One pot preparation of polysulfone-amino functionalized SiO_2 nanoparticle ultrafiltration membranes for water purification. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6 (2018) 4598-4604. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.045>.
- [35]. J. Liu, Q.-Y. Hu, M.-J. Chang, X. Li, Sh.-Sh. Cao.

Water glass-based aerogel monolith prepared with formamide catalyst and SiO₂ nanofiber reinforcement: Nanoarchitectonics and enhanced mechanical property. *Journal of Solid State Chemistry* 353 (2025) 125651. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2025.125651>.

- [36]. Y. Li, S.Yumin, D. Xiongfei, R. Tian, P. Zhang, et al. PVDF/Ag@ SiO₂ nanofiber membranes with surface substructure for dye catalytic degradation and oil-water separation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 169 (2025) 105977. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.105977>.

About the Authors

G.E. Yergazieva – PhD, Professor, Head of the Laboratory of Catalytic Processes, ICP, Prof., Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan
E-mail: ergazieva_g@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9464-5317>

L.K. Myltykbaeva – PhD, Act. Assoc. Prof., Al-Farabi KazNU, Leading Researcher, Laboratory of Catalytic Processes, ICP, Almaty, Kazakhstan
E-mail: laura.kaden@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0322-0135>

I. Kuanysh – PhD candidate at the KBTU, Engineer, Laboratory of Catalytic Processes, ICP, Almaty, Kazakhstan
E-mail: inzhu.2017@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1773-2405>

A.M. Asilkhan – Student, Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan
E-mail: aidanaasyilkhan24@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5288-0664>

Zh.A. Nazarbayeva – Student, Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan
E-mail: nazarbayeva05@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6464-4926>

N. Idrissov – Researcher, Electrochemical Energy Conversion and Storage Laboratories, INP, PhD candidate, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: kantsevich.n.v@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2393-1102>

D. Esenkeldina – Researcher, Electrochemical Energy Conversion and Storage Laboratories, INP, PhD candidate, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: dianazbergenova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5837-8706>

A. Baratov – Researcher, Electrochemical Energy Conversion and Storage Laboratories, INP, PhD candidate, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: baratovaibol01@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7240-5259>

S. Kapan – Junior Researcher, Electrochemical Energy Conversion and Storage Laboratories, INP, Master's Student, Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan
E-mail: slambot322@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4903-5436>

Comparative Study of the Adsorption Properties of Silicon Oxide in the Removal of Organic Pollutants and Heavy Metals

G.E. Yergazieva^{1,2*}, L.K. Myltykbaeva^{1,2}, I. Kuanysh^{1,3}, A.M. Asilkhan², Zh.A. Nazarbayeva², N.V. Idrissov^{4,5}, A. Baratov^{4,5}, D. Esenkeldina^{4,5}, S. Kapan^{4,5}

¹Institute of Combustion Problems, Bogenbai Batyr Str., 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave, 71, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh-British Technical University, Tole Bi Str., 59, Almaty, Kazakhstan

⁴Satbayev University, Satpayev Str., 22, Almaty, Kazakhstan

⁵Institute of Nuclear Physics, Ibragimov Str., 1, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

Removal of mixed contaminants, including heavy metal ions and aromatic hydrocarbons, from water systems requires the development of efficient and selective adsorbents. This study presents a comparative investigation of the adsorption properties of silicon oxide with different purity levels (80% and 100%) toward Cu²⁺ ions and aromatic hydrocarbons (benzene, ethylbenzene, m, p-xylenes). Adsorption kinetics were examined, and the porous structure of the materials was characterized using low-temperature nitrogen adsorption-desorption analysis.

The results revealed a paradoxical advantage of technical silicon dioxide (80%) over the high-purity sample (100%) in copper ion adsorption. The maximum sorption degree reached 36.90% compared to 32.37%, while equilibrium was achieved within 10 min versus 30 min, respectively. In contrast, high-purity SiO₂ demonstrated superior selectivity toward aromatic hydrocarbons, particularly benzene, with removal efficiency increasing from 17% to 79% within 40 min, accompanied by partial desorption of bulkier molecules.

Pore structure analysis showed a 4.75-fold reduction in micropore volume after purification, together with significant redistribution of mesopores: pores in the 5-10 nm range disappeared, while a new maximum emerged at 40-60 nm. Benzene adsorption on technical SiO₂ followed a pseudo-second-order kinetic model ($R^2 = 0.992$), indicating a chemisorption mechanism. The findings establish a clear relationship between pore architecture and adsorption selectivity, enabling rational adsorbent selection depending on pollutant type and supporting cost-effective design of adsorption materials without additional feedstock purification.

Keywords: silicon oxide, adsorption, copper ions, aromatic hydrocarbons, selectivity, porous structure

Органикалық ластағыштар мен ауыр металдарды жою кезінде кремний оксидінің адсорбциялық қасиеттерін салыстырмалы зерттеу

Г.Е. Ергазиева^{1,2*}, Л.К. Мылтыкбаева^{1,2}, І. Қуаныш^{1,3}, А.М. Асылхан², Ж.А. Назарбаева², Н.В. Идрисов^{4,5}, А. Баратов^{4,5}, Д. Есенкелдина^{4,5}, С. Капан^{4,5}

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даң. 71, Алматы, Қазақстан

³Қазақстан-Британ техникалық университеті, Толе би к., 59, Алматы, Қазақстан

⁴Satbayev University, Сатпаев к., 22, Алматы, Қазақстан

⁵Ядролық физика институты, Ибрагимов к., 1, Алматы, Қазақстан

АҢДАТПА

Су жүйелерінен аралас ластағыштарды (ауыр металл иондары мен ароматты көмірсутектер) жою тиімді әрі селективті адсорбенттерді әзірлеуді талап етеді. Осы жұмыста тазалық дәрежесі әртүрлі (80% және 100%) кремний оксидінің Cu²⁺ иондары мен ароматты көмірсутектерге (бензол, этилбензол, м-, п-ксилолдар) қатысты адсорбциялық қасиеттері салыстырмалы түрде зерттелді. Адсорбция кинетикасы зерттеліп, материалдардың кеуекті құрылымы төмен температурада азоттың адсорбция-десорбция әдісімен сипатталды.

Нәтижелер мыс иондарын адсорбциялау кезінде техникалық кремний оксидінің (80%) жоғары тазалықтағы үлгімен (100%) салыстырғанда парадоксалды артықшылығын көрсетті: сорбцияның максималды дәрежесі 36,90% және 32,37% болды, ал тепе-теңдікке жету уақыты тиісінше 10 мин және 30 мин құрады. Ароматты көмірсутектер үшін кері үрдіс байқалды: жоғары тазалықтағы SiO₂ бензолды адсорбциялауда жоғары селективтілік көрсетті, жою дәрежесі 40 мин ішінде 17%-дан 79%-ға дейін артты, бұл кезде көлемі үлкен молекулалардың бір мезгілде десорбциясы жүрді. Кеуекті құрылымды талдау тазарту барысында микрокеуектер көлемінің 4,75 есе азайғанын және мезокеуектердің түбегейлі қайта бөлінгенін көрсетті: 5-10 нм аймағындағы максимумның жойылып, 40-60 нм аралығында жаңа максимумның пайда болуы байқалды. Техникалық SiO₂ бетінде бензолдың адсорбция кинетикасы псевдо-екінші ретті модельмен ($R^2 = 0,992$) жақсы сипатталады, бұл үдерістің хемосорбциялық механизммен жүретінін көрсетеді.

Кеуектер архитектурасы мен адсорбция селективтілігі арасындағы өзара байланыс анықталды: дамыған микрокеуектілігі және мезокеуектердің жиі таралуы (5-10 нм) бар техникалық SiO₂ металл иондарын жылдам жою үшін тиімді, ал мезокеуектердің полимодальды таралуына (20-100 нм) ие жоғары тазалықтағы SiO₂ органикалық қосылыстарға қатысты молекулалық – елеуіштік селективтілікті қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер ластағыштың түріне байланысты адсорбентті таңдауды оңтайландыруға мүмкіндік береді және бастапқы шикізатты қосымша тазартусыз адсорбциялық материалдарды экономикалық тұрғыдан тиімді жобалаудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Түйін сөздер: кремний оксиді, адсорбция, мыс иондары, ароматты көмірсутектер, селективтілік, кеуекті құрылым