СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ХИМИЯ

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 08.09.2026
Статья принята к публикации: 17.09.2026
Статья опубликована: 07.10.2026

УДК 628.3+546.24+661.8

DOI: 10.32743/UniChem.2026.148.10.23438

Получение серосодержащего сорбента на основе тетрасульфида натрия и эпихлоргидрина и исследование его сорбционных свойств по отношению к ионам Au(III)

Алланов Абдигаффор Бердиёрович
докторант
Каршинский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Карши
E-mail: abdigaffor.allanov.74@mail.ru

Нуркулов Файзулла Нурмуминович
д-р техн. наук, проф., заведующий отделом технологии Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Preparation of a sulfur-containing sorbent based on sodium tetrasulfide and epichlorohydrin and investigation of its sorption properties toward Au(III) ions

Allanov Abdigaffor Berdiyorovich
Doctoral Candidate Karshi State University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Nurkulov Fayzulla Nurmuminovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Head of the Technology Department, Tashkent Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Алланов А.Б., Нуркулов Ф.Н. Получение серосодержащего сорбента на основе тетрасульфида натрия и эпихлоргидрина и исследование его сорбционных свойств по отношению к ионам Au(III) // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 10(148). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23438

Аннотация

В работе исследованы процессы получения нового высокоэффективного серосодержащего сорбента (NT-ЭХГ) путем химического взаимодействия тетрасульфида натрия с эпихлоргидрином, а также детально изучены закономерности извлечения ценных ионов Au(III) из водных сред различного состава. С помощью современных физико-химических методов анализа, включая ИК-Фурье-спектроскопию и атомно-абсорбционную спектрометрию, установлены структурные особенности синтезированного полимерного материала, наличие активных функциональных групп и ключевые параметры сорбционного процесса. Экспериментально выявлено, что с ростом начальной концентрации ионов Au(III) в растворе от 25 до 300 мг/л равновесная сорбционная ёмкость материала увеличивается с 10,85 до 101,67 мг/г, при этом оптимальное время достижения термодинамического равновесия составляет 120-180 мин, а максимальная эффективность извлечения наблюдается в слабокислой среде при pH ≈ 6. В ходе динамических испытаний на колонках показано, что увеличение скорости фильтрации потока от 2 до 8 мл/мин закономерно снижает динамическую ёмкость сорбента с 60 до 41 мг/г. Установлено, что полученный сорбент обладает высокой механической и регенерационной устойчивостью, сохраняя около 92 % своей исходной сорбционной активности даже после пяти последовательных циклов сорбции-десорбции. Полученные экспериментальные и теоретические данные убедительно доказывают высокую перспективность промышленного применения разработанного материала NT-ЭХГ в передовых технологиях глубокой очистки промышленных сточных вод и эффективного возврата ценных благородных металлов в замкнутый ресурсный цикл.

Abstract

The paper investigates the preparation of a novel high-efficiency sulfur-containing sorbent (NT-ECH) via the chemical interaction of sodium tetrasulfide with epichlorohydrin and examines the regularities of Au(III) ion extraction from aqueous media of various compositions. The structural features, active functional groups, and sorption parameters were determined using FT-IR spectroscopy and atomic absorption spectrometry. It was established that with an increase in the initial Au(III) concentration from 25 to 300 mg/L, the equilibrium sorption capacity increases from 10.85 to 101.67 mg/g, while the practical equilibrium is reached within 120 – 180 min, and the maximum sorption activity is observed at a weakly acidic medium of pH ≈ 6. Dynamic column tests showed that increasing the flow rate from 2 to 8 mL/min reduces the dynamic capacity from 60 to 41 mg/g. Furthermore, the sorbent exhibits high mechanical and regeneration stability, retaining approximately 92 % of its initial activity after five successive sorption-desorption cycles. The obtained results demonstrate the high potential of NT-ECH for application in advanced industrial wastewater treatment technologies and the effective recovery of valuable metal components into a closed resource cycle.

Ключевые слова: промышленные сточные воды, сорбция, серосодержащий сорбент, тетрасульфид натрия, эпихлоргидрин, Au(III), ресурсосбережение.

Keywords: industrial wastewater, sorption, sulfur-containing sorbent, sodium tetrasulfide, epichlorohydrin, Au(III), resource conservation.

Введение

Интенсификация промышленного производства сопровождается увеличением объёмов технологических и сточных вод, содержащих соединения различных металлов. Ионы тяжёлых и потенциально токсичных металлов, в отличие от большинства органических загрязнителей, не подвергаются полному биохимическому разложению и способны длительное время сохраняться в компонентах окружающей среды. В водных объектах они могут находиться в растворённом состоянии, связываться со взвешенными частицами, накапливаться в донных отложениях и при изменении условий среды вновь переходить в водную фазу, формируя источник вторичного загрязнения [8; 4].

В условиях Узбекистана ограниченность водных ресурсов и аридный климат повышают значимость глубокой очистки промышленных сточных вод и их повторного использования [5]. Современные технологии водоочистки должны обеспечивать не только снижение содержания загрязняющих веществ, но и возможность возврата очищенной воды в технологический цикл, уменьшения объёма вторичных отходов и извлечения ценных компонентов.

Среди методов удаления ионов металлов сорбционные процессы выделяются технологической простотой, эффективностью при низких концентрациях и возможностью регенерации сорбентов. Однако результативность сорбции во многом определяется химической природой функциональных центров материала. В связи с этим разработка сорбентов, содержащих функциональные группы, способные селективно взаимодействовать с определёнными ионами металлов, является актуальной научной задачей [6; 11].

Особый интерес представляют серосодержащие полимерные и полимероподобные сорбенты. Атомы серы в их структуре могут формировать активные центры, благоприятные для координационного взаимодействия с металлсодержащими частицами. Реакция тетрасульфида натрия с эпихлоргидрином сопровождается раскрытием эпоксидного цикла и образованием функциональной структуры, содержащей гидроксипропильные и полисульфидные фрагменты. Такая структура сочетает кислород- и серосодержащие центры, способные участвовать в связывании ионов металлов [2; 14].

Сорбционное извлечение Au(III) из водных технологических сред представляет интерес с экологической и ресурсосберегающей точек зрения. Этот процесс позволяет одновременно очищать жидкую фазу, концентрировать ценный металлический компонент и потенциально возвращать его в технологический цикл. Поэтому разработка материалов с высокой сорбционной ёмкостью, устойчивостью в динамических условиях и способностью сохранять активность после регенерации имеет существенное практическое значение [9; 12; 13].

В настоящей работе исследованы сорбционные свойства серосодержащего сорбента NT-ЭХГ, полученного на основе тетрасульфида натрия и эпихлоргидрина, по отношению к ионам Au(III). Оценено влияние начальной концентрации, продолжительности контакта, pH среды и скорости потока на эффективность процесса. Дополнительно исследованы регенерационная устойчивость и возможность повторного использования сорбента [7; 15; 3].

Таким образом, создание серосодержащих сорбентов, сочетающих высокую сорбционную активность, возможность работы в статическом и динамическом режимах и регенерационную устойчивость, является перспективным направлением для очистки металлсодержащих водных сред и возврата ценных компонентов в ресурсный цикл [10; 1].

Целью работы являлось получение сорбента NT-ЭХГ на основе тетрасульфида натрия и эпихлоргидрина для извлечения ионов Au(III) из водных сред, установление основных физико-химических и технологических закономерностей сорбции и оценка перспектив его применения в ресурсосберегающих процессах водоочистки.

Материалы и методы

Серосодержащий сорбент NT-ЭХГ получали взаимодействием тетрасульфида натрия с эпихлоргидрином. Полисульфидный раствор предварительно синтезировали в водной среде при нагревании гидроксида натрия с элементарной серой. После фильтрования в полученный раствор при 60 – 70 °C дозированно вводили эпихлоргидрин при непрерывном перемешивании. Реакционную смесь выдерживали, образовавшийся полимероподобный продукт отделяли, промывали дистиллированной водой и высушивали. Формирование сорбента связано с раскрытием эпоксидного цикла эпихлоргидрина и включением полисульфидных фрагментов в структуру материала.

Функциональный состав полученного сорбента исследовали методом ИК-Фурье-спектроскопии на приборе SHIMADZU IRAffinity-1S. Концентрацию Au(III) в исходных и равновесных растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на SHIMADZU AA-7000.

Сорбционные свойства NT-ЭХГ исследовали в статических условиях с использованием растворов $H[AuCl_4]$ с начальными концентрациями Au(III) 25, 50, 100, 200 и 300 мг/л. Систему «сорбент-раствор» выдерживали 24 ч при периодическом перемешивании, после чего фазы разделяли фильтрованием и определяли равновесную концентрацию Au(III).

Равновесную сорбционную ёмкость рассчитывали по формуле:

$$q_e = ((C_0 - C_e) \cdot V)/m$$

а степень извлечения Au(III):

$$\alpha = ((C_0 - C_e)/ C_0) \cdot 100\ \%$$

где C_0 и C_e - начальная и равновесная концентрации Au(III), мг/л; V – объём раствора, л; m - масса сорбента, г.

Кинетику сорбции исследовали при непрерывном перемешивании со скоростью 200 об/мин. Концентрацию Au(III) определяли через 5, 10, 20, 40, 60, 120 и 180 мин. Влияние кислотности среды оценивали в диапазоне pH 2-9 при постоянных значениях массы сорбента, объёма раствора, температуры и времени контакта.

Динамические испытания проводили в стеклянной колонне, содержащей 2,0 г NT-ЭХГ. Раствор Au(III) пропускали через слой сорбента со скоростью 2, 4, 6 и 8 мл/мин. Эффективность процесса оценивали по времени прорыва, времени насыщения и динамической сорбционной ёмкости.

Регенерационную устойчивость сорбента изучали в пяти последовательных циклах сорбции-десорбции. Десорбцию Au(III) проводили смесью 0,7 М тиомочевины и 0,2 %-ного раствора HCl, после чего сорбент промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции среды и повторно использовали.

Результаты и обсуждение

Формирование и спектроскопическая характеристика NT-ЭХГ. Взаимодействие тетрасульфида натрия с эпихлоргидрином сопровождалось образованием полимероподобного серосодержащего продукта. При увеличении продолжительности реакции от 0,5 до 3,0 ч выход сорбента последовательно возрастал и достиг максимума 8,75 %. При дальнейшем увеличении времени до 3,5 ч выход уменьшался до 6,4 %. Поэтому для исследованного диапазона продолжительность 3 ч была принята как рациональная. Наличие экстремума на зависимости «время - выход» указывает, что после завершения основной стадии формирования материала дальнейшее пребывание продукта в реакционной среде не обеспечивает дополнительного прироста выхода и может сопровождаться вторичными превращениями полисульфидных фрагментов (Рис. 1,2).

ИК-спектроскопия показала заметную перестройку функциональных групп исходного эпихлоргидрина. Для него характерны полосы 1170,79; 1085,92 и 1001,70 $см^{-1}$, связанные с C-O-C-фрагментом эпоксидного цикла, а также сигналы 958,62; 908,47 и 852,54 $см^{-1}$. В спектре NT-ЭХГ наблюдались полосы 1232,51 и 1082,07 $см^{-1}$, соответствующие C-O и C-O-C связям, что согласуется с раскрытием эпоксидного цикла и образованием гидроксипропильных структурных единиц.

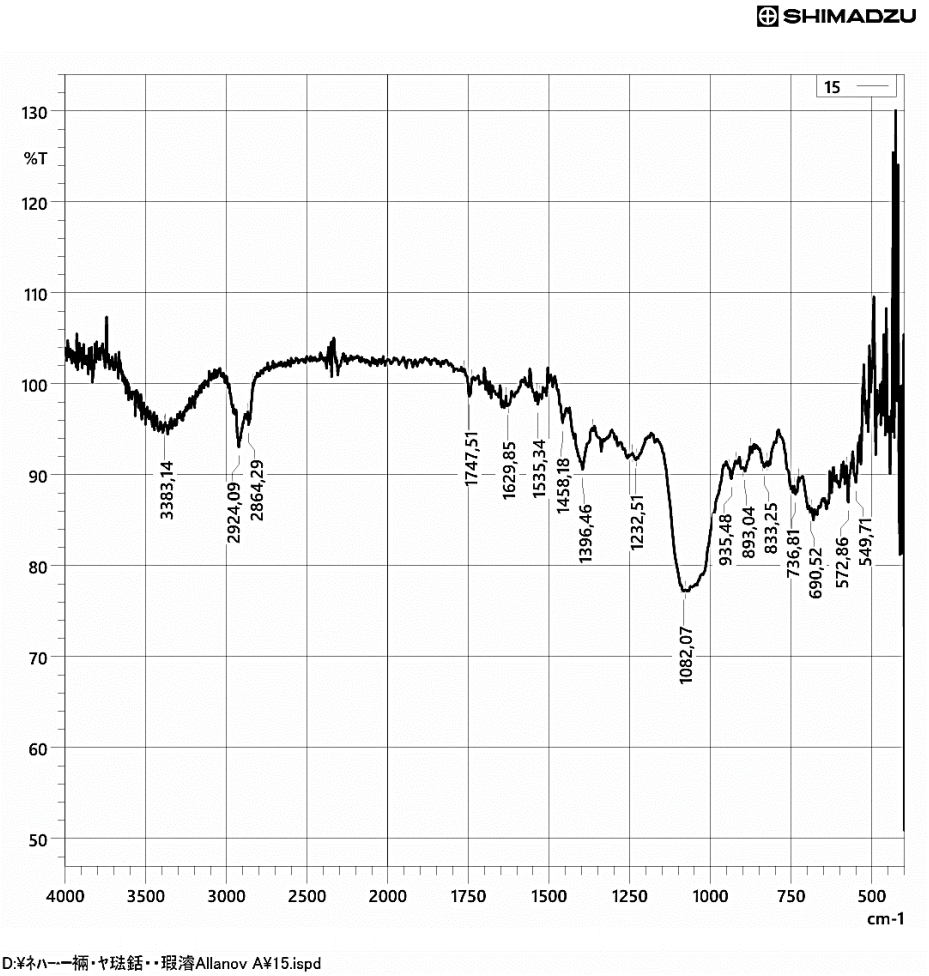


Рисунок 1. ИК-спектр сорбента NT-ЭХГ, полученного на основе тетрасульфида натрия и эпихлоргидрина

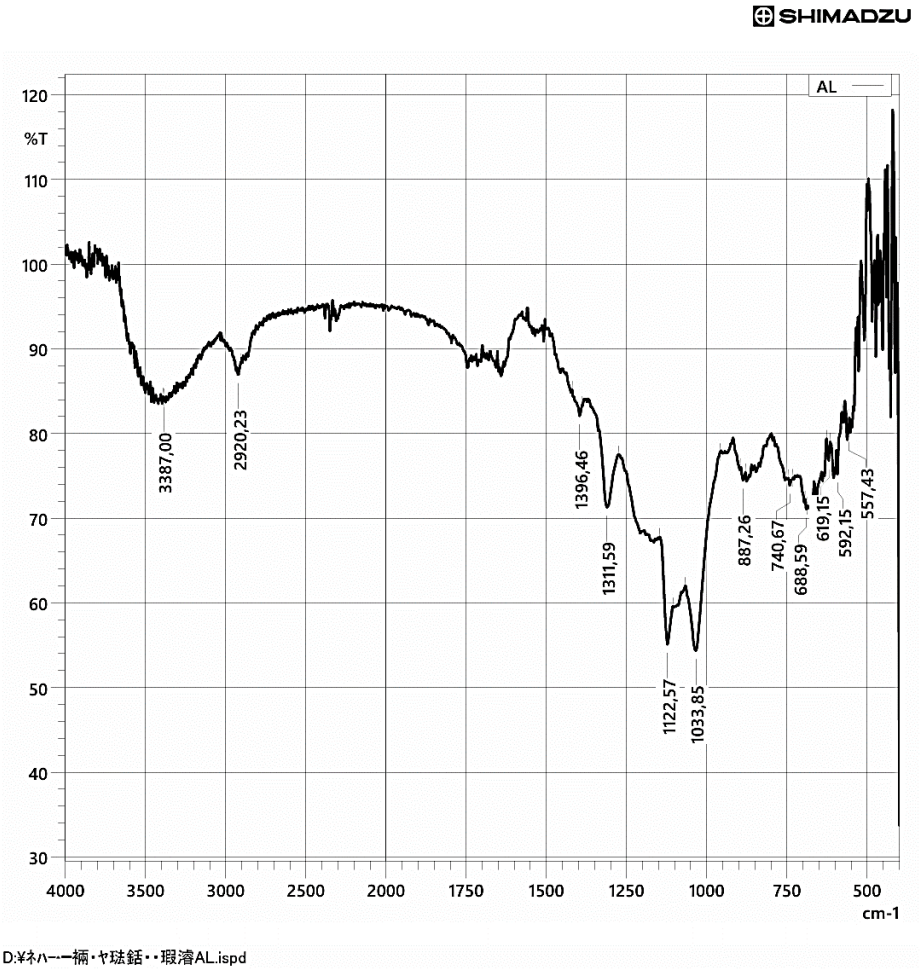


Рисунок 2. ИК-спектр сорбента NT-ЭХГ после сорбции ионов Au(III)

После сорбции Au(III) изменения фиксировались также в низкочастотной области 740,67-517,43 $см^{-1}$, где могут проявляться C-S, S-S и скелетные колебания полисульфидной цепи. Это является косвенным спектроскопическим свидетельством участия серосодержащих центров во взаимодействии с Au(III). Полученные данные позволяют рассматривать сформированную полисульфидную структуру как функциональную основу сорбционной активности NT-ЭХГ.

Влияние начальной концентрации Au(III). Начальная концентрация Au(III) существенно влияла на равновесные характеристики процесса. При увеличении C_0 от 25 до 300 мг/л сорбционная емкость q_e возрастала с 10,85 до 101,67 мг/г, в то время как степень извлечения снижалась с 86,80 до 67,80 %.

Таблица 1.

Статическая сорбция Au(III) на NT-ЭХГ

C_0, мг/л	C_e, мг/л	q_e, мг/г	α, %
25	3,30	10,85	86,80
50	7,40	21,30	85,20
100	18,20	40,90	81,80
200	52,50	73,75	73,75
300	96,70	101,67	67,80

Рост q_e связан с увеличением концентрационного градиента и поступлением большего количества Au(III) к доступным функциональным центрам. Одновременно снижение α при неизменной массе сорбента указывает на постепенное заполнение активных участков: при высокой исходной концентрации абсолютное количество поглощенного металла возрастает, однако его доля от общего содержания в растворе уменьшается.

Для практической оценки эти два показателя следует рассматривать совместно. При очистке разбавленных водных сред определяющей является степень извлечения, тогда как для концентрированных технологических растворов существенное значение имеет удельная емкость сорбента. Максимальное экспериментально установленное значение q_e 101,67 мг/г относится только к исследованному диапазону концентраций.

Кинетика сорбции Au(III). Наиболее интенсивное поглощение Au(III) наблюдалось в первые 40-60 мин контакта. За первые 40 мин q_t увеличивалось с 6,1 до 32,6 мг/г, к 60-й минуте достигало 36,1 мг/г. В дальнейшем прирост замедлялся: значения при 120 и 180 мин составили 39,6 и 40,1 мг/г.

Таблица 2.

Кинетические показатели сорбции

t, мин	C, мг/л	q, мг/г
5	89	6,1
10	72	14,6
20	54	23,6
40	36	32,6
60	26	36,1
120	22	39,6
180	21	40,1

Быстрый начальный участок зависимости соответствует высокой доступности свободных центров и значительному градиенту концентрации. По мере их заполнения скорость процесса уменьшается, а вклад более медленного переноса ионов к менее доступным участкам материала возрастает. Незначительное различие между результатами 120 и 180 мин показывает, что система к этому интервалу приближается к практическому равновесию.

Таким образом, увеличение продолжительности контакта свыше 120 мин дает лишь небольшой дополнительный прирост емкости. Для технологического режима это важно, поскольку выбор чрезмерно длительной стадии сорбции может увеличить продолжительность обработки без существенного повышения степени использования материала.

Динамическая сорбция и влияние скорости потока. Колонные испытания подтвердили зависимость эффективности NT-ЭХГ от гидродинамического режима. При увеличении скорости потока от 2 до 8 мл/мин время прорыва уменьшалось с 171 до 63 мин, время насыщения - с 251 до 112 мин, а динамическая емкость - с 60 до 41 мг/г.

Таблица 3.

Результаты динамических колонных опытов

Q, мл/мин	$t_β$, мин	t, мин	q_d, мг/г
2	171	251	60
4	119	186	54
6	88	144	47
8	63	112	41

Снижение показателей при повышении Q связано прежде всего с сокращением времени пребывания раствора в сорбционном слое. При малой скорости создаются более благоприятные условия для внешнего массопереноса, диффузии и взаимодействия Au(III) с функциональными центрами. При ускорении потока часть сорбата покидает колонну до полного использования потенциально доступной емкости материала.

Аналогичная тенденция установлена для динамической объемной емкости. При Q = 2; 4; 6; 8 и 10 мл/мин она составляла 2,96; 2,71; 2,43; 2,19 и 1,96 моль/л соответственно, а время прорыва уменьшалось с 182 до 82 мин. В исследованных условиях наиболее эффективное использование сорбционного слоя наблюдалось при минимальной скорости потока.

Регенерационная устойчивость и статическая объемная емкость

Возможность повторного применения NT-ЭХГ оценивали в пяти последовательных циклах сорбции-десорбции. После каждого цикла Au(III) удаляли смесью 0,7 М тиомочевины и 0,2 %-ного HCl, после чего сорбент промывали и повторно использовали.

Таблица 4.

Регенерационная устойчивость NT-ЭХГ

Цикл	q_s, мг/г	q_d, мг/г	R_n, %
1	62	59	100
2	61	58	98
3	60	57	96
4	59	56	94
5	58	55	92

После пятого цикла статическая емкость снизилась с 62 до 58 мг/г, динамическая - с 59 до 55 мг/г, а сохранившаяся активность составила 92 %. Постепенное уменьшение показателей может быть связано с неполной регенерацией части центров и остаточным удерживанием Au(III) в менее доступных участках структуры. Однако отсутствие резкого падения активности указывает на возможность многократного использования материала.

Статическая объемная емкость возрастала с увеличением C_0 от 0,10 до 0,50 моль/л: 0,71; 1,45; 2,19; 2,81 и 3,29 моль/л соответственно. Значение 3,29 моль/л следует рассматривать как наибольшее полученное в исследованном диапазоне, а не как абсолютную предельную емкость, поскольку полного выхода зависимости на плато не зафиксировано.

Влияние pH и эколого-технологическая оценка.

Кислотность среды являлась одним из ключевых факторов сорбции. При pH = 2 емкость составляла около 48 мг/г, при pH = 4 - 75-80 мг/г, при pH = 5 превышала 90 мг/г, а максимальное значение около 100 мг/г отмечено при pH ≈ 6. При дальнейшем повышении pH наблюдалось снижение, и при pH = 9 q_e составляло около 72 мг/г.

Таблица 5.

Влияние pH на сорбционную емкость

pH	q_e, мг/г
2	≈48
4	≈75-80
5	>90
≈6	≈100
9	≈72

Пониженная эффективность в сильно кислой среде может быть связана с протонированием функциональных центров и конкуренцией H^+. При повышении pH эти ограничения ослабевают. Снижение после pH ≈ 6, вероятно, обусловлено совокупным влиянием зарядового состояния поверхности, OH^- и изменением форм Au(III) в растворе, поэтому сводить наблюдаемую зависимость к одному механизму некорректно.

В совокупности результаты показывают, что NT-ЭХГ характеризуется высокой сорбционной емкостью, достижением практического равновесия примерно за 120-180 мин, работоспособностью в колонном режиме и сохранением 92 % активности после пяти циклов. Возможность регенерации уменьшает потребность в свежем сорбенте и потенциально снижает образование вторичных отходов, что соответствует принципам ресурсосбережения.

С позиции охраны окружающей среды NT-ЭХГ представляет интерес как регенерируемый материал для извлечения металлов из водных технологических сред и концентрирования ценного компонента. Поскольку результаты получены преимущественно для модельных растворов Au(III), промышленное применение требует дополнительной проверки на реальных многокомпонентных сточных водах.

Заключение

В результате исследования получен серосодержащий сорбент NT-ЭХГ на основе тетрасульфида натрия и эпихлоргидрина и установлены основные закономерности извлечения Au(III) из водных сред. Показано, что увеличение начальной концентрации Au(III) от 25 до 300 мг/л приводит к росту равновесной сорбционной ёмкости от 10,85 до 101,67 мг/г, а практическое равновесие достигается в интервале 120-180 мин.

Наиболее высокая сорбционная активность наблюдалась при pH около 6. В динамических условиях увеличение скорости потока от 2 до 8 мл/мин сопровождалось снижением динамической ёмкости от 60 до 41 мг/г, что подтверждает существенное влияние времени контакта на эффективность процесса.

После пяти циклов сорбции-десорбции сорбент сохранял 92 % первоначальной активности, что свидетельствует о его регенерационной устойчивости и возможности повторного применения. Полученные результаты позволяют рассматривать NT-ЭХГ как

перспективный функциональный материал для сорбционного извлечения металлсодержащих компонентов из водных технологических сред. Для подтверждения его эффективности в промышленной практике необходимы дальнейшие исследования на реальных многокомпонентных сточных водах.

Список литературы

1. Al-Ghouti M.A., Da'ana D.A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review // Journal of Hazardous Materials. – 2022. – T. 424. – P. 127–141. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127383.
2. Changes in the environmental condition of soil and plants under the influence of industrial enterprises (in the case of the Almalyk Mining and Metallurgical Combine) // E3S Web of Conferences. – 2024. – T. 539. – DOI: 10.1051/e3sconf/202453901020.
3. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of sorption processes for wastewater treatment // Environmental Chemistry Letters. – 2020. – T. 17, № 1. – P. 145–155. – DOI: 10.1007/s10311-018-0786-9.
4. Fornasaro S., Ghezzi L., Shukurov N., Petrov M., Petrini R. Water quality and dissolved load in the Chirchik and Akhangaran river basins (Uzbekistan, Central Asia) // Environmental Monitoring and Assessment. – 2024. – T. 196. – DOI: 10.1007/s10661-024-13014-1.
5. Fornasaro S., Ghezzi L., Arrighi S., Shukurov N., Petrov M., Tomei A., Petrini R. Geochemistry and risk assessment of potentially toxic elements in surface river sediments (Chirchik-Akhangaran basin, Uzbekistan) // Environmental Geochemistry and Health. – 2025. – T. 47. – P. 1–20. – DOI: 10.1007/s10653-025-02441-9.
6. Gapporov Kh., Kulmatov R., Opp Ch. Assessment of quantity and quality indicators of water resources in the Zarafshan River basin (within the territory of Uzbekistan) // E3S Web of Conferences. – 2025. – T. 623. – P. 1–8. – DOI: 10.1051/e3sconf/202562301010.
7. Karimov I.A., Tojiyev S.S. Atrof-muhit monitoringi va suv resurslarini muhofaza qilishning zamonaviy usullari // O‘zbekiston Kimyo Jurnali. – 2024. – № 2. – P. 45–53.
8. Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Uzbekistan. National State of the Environment Report: Uzbekistan. IISD, 2023/2024. -C. 1–125. – IISD, 2024.
9. O‘zbekiston Respublikasi Ekologiya vazirligi. Sanoat korxonalarining oqova suvlarini tozalash bo‘yicha 2024-yil ma’lumotlari. – O'zbekiston Respublikasi Ekologiya vazirligi, 2024. – 45 P.
10. Shaykulov B.K., Nurkulov F.N., Djalilov A.T. Izucheniye fiziko-khimicheskikh svoystv sopolymerov sintezirovannykh na osnove akrilovoy kislotы // «Razvitiye nauki i tekhnologiy» nauchno-tekhnicheskiy jurnal. – 2022. – № 5. – P. 110–114.
11. Shukurov N., Kodirov O., Peitzsch M., Kersten M., Pen-Mouratov S., Steinberger Y. Coupling geochemical, mineralogical and microbiological approaches to assess the health of contaminated soil around the Almalyk mining and smelter complex, Uzbekistan // Science of the Total Environment. – 2014. – T. 476. – P. 447–459. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.031.

12. Smith J.A., Harrison R.M. Industrial wastewater treatment and heavy metal pollution: A global review // Journal of Environmental Management. – 2022. – T. 302. – P. 114–128. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114090.
13. Turner A. Bioaccumulation of toxic elements in aquatic ecosystems: Mechanisms and ecological risks // Environmental Pollution. – 2021. – T. 285. – P. 117–132. – DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117132.
14. UNECE. Fourth Environmental Performance Review of Uzbekistan. 2026. -P. 1–310. – UNECE, 2026. – 310 c.
15. Wang Q., Kim D. Advanced oxidation and separation technologies for industrial effluent treatment: A comparative study // Water Research. – 2023. – T. 235. – P. 119–134. – DOI: 10.1016/j.watres.2023.119134.