
СТРАНИЧКА МОЛОДОГО УЧЕНОГО

Научная статья

УДК 544.723.2

DOI: 10.15372/ChUR2025639

EDN: QSGWAP

Исследование адсорбции железа(II) из водных растворов модифицированным углеродным материалом на основе антрацита

Н. В. ГОРА [✉], Д. А. ЧЕРНЫШЁВ, О. В. БЕЛЯЕВА*Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия**E-mail: goranataliya@yandex.ru[✉], danilachernishov79@gmail.com, belyaeva-ov.kemsu@yandex.ru*

Аннотация

Исследована возможность повышения адсорбционной емкости сорбента “Пуролат-Стандарт” – дешевого углеродного материала на основе антрацита, по отношению к ионам железа(II). В качестве модификаторов были использованы серная кислота, аминоктановая кислота и их сочетание. Изучено влияние модифицирования на пористую структуру и состояние поверхности анализируемых сорбентов, установлено, что только обработка серной кислотой заметно сказывается на характеристиках структуры углеродного материала. Сравнение микрофотографий образцов до и после адсорбции ионов железа позволило предположить его адсорбцию на поверхности макропор. С помощью рентгенофазового анализа показано, что выбранные способы модифицирования не изменяют фазовый состав сорбентов. Согласно данным спектроскопических исследований, процесс модифицирования образцов сорбента приводит к изменению качественного и количественного состава поверхностных групп. Проведено исследование адсорбции ионов железа(II) на исходном и модифицированных образцах углеродного материала в условиях равновесия. Выявлено, что использование в качестве модификатора аминоктановой кислоты кардинально изменяет форму изотерм адсорбции иона металла, что обусловлено различным составом функциональных групп на поверхности образцов и изменением типа взаимодействия сорбент–сорбат. При использовании модели Ленгмюра и модифицированного для случая адсорбции ионов уравнения Дубинина–Радускевича рассчитаны основные адсорбционные характеристики. Сделано предположение, что для исходного и обработанного серной кислотой сорбентов, а также для модифицированных аминоктановой кислотой образцов при низких равновесных концентрациях железа адсорбция происходит за счет ионного обмена. В области более высоких равновесных концентраций для обработанных аминокислотой сорбентов возможно образование комплексов ионов железа с модификатором. Установлено, что наиболее перспективным образцом для применения в качестве сорбента для извлечения ионов железа из подземных вод является модифицированный и серной, и аминоктановой кислотами (при последовательной пропитке) углеродный материал, обладающий наибольшей адсорбционной емкостью.

Ключевые слова: ионы железа(II), адсорбция, модифицирование углеродного сорбента

Финансирование: работа выполнена по проекту “Физико-химические и прикладные основы инновационной адсорбционной технологии обезжелезивания природных вод” (№ 23-73-01036) в рамках конкурса Российского научного фонда “Проведение инициативных исследований молодыми учеными” Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными.

Для цитирования: Гора Н. В., Чернышёв Д. А., Беляева О. В. Исследование адсорбции железа(II) из водных растворов модифицированным углеродным материалом на основе антрацита // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 2. С. 163–172. DOI: 10.15372/KhUR2025639. EDN: QSGWAP.

Original article

Investigation of iron(II) adsorption from aqueous solutions on anthracite-based modified carbon material

N. V. GORA , D. A. CHERNYSHEV, O. V. BELYAEVA

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: goranataliya@yandex.ru[✉], danilachernishov79@gmail.com, belyaeva-ov.kemsu@yandex.ru

Abstract

The possibility to increase the adsorption capacity of the sorbent Purolat-Standard, a cheap anthracite-based carbon material (CM), towards iron(II) ions was studied. Sulphuric acid, aminoethanoic acid, and their combination were used as modifiers. The effect of modification on the porous structure and surface state of the analysed sorbents was examined. It has been found that only treatment with sulphuric acid has a significant impact on the structural characteristics of the carbon material. A comparison of microphotographs of the samples before and after iron ion adsorption suggests its adsorption on the surface of macropores. It is shown with the help of X-ray diffraction analysis that the chosen modification methods do not change the phase composition of the sorbents. According to the data of spectroscopic studies, modification of sorbent samples leads to changes in the qualitative and quantitative composition of surface groups. The adsorption of iron(II) ions on the initial and modified samples of carbon material was studied under equilibrium conditions. It was found that using AEA as a modifier fundamentally alters the shape of the metal ion adsorption isotherms. The use of aminoethanoic acid as a modifying agent has been determined to strongly alter the shape of metal ion adsorption isotherms, which is due to different composition of functional groups on the sample surface and changes in the sorbent-sorbate interaction type. Using the Langmuir model and a modified Dubinin-Radushkevich equation for ion adsorption, the main adsorption characteristics were calculated. It is assumed that for the initial sorbent and the sample treated with sulphuric acid, as well as for the samples modified with aminoethanoic acid, in the case of low equilibrium iron concentration, adsorption proceeds via ion exchange. At higher equilibrium concentrations, the formation of iron ion complexes with the modifier is possible for the sorbents treated with the amino acid. It is established that the most promising sample for use as a sorbent for extracting iron ions from groundwater is the carbon material modified with both sulphuric and aminoethanoic acids (by sequential impregnation), which demonstrates the highest adsorption capacity.

Keywords: iron(II) ions, adsorption, carbon sorbent modification

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все бóльшие масштабы приобретает проблема антропогенной нагрузки на поверхностные водные объекты Кемеровской области. Напряженная экологическая обстановка во многом обуславливается значительными объемами сбрасываемых в реки сточных вод промышленных предприятий. Альтернативным источником водоснабжения региона могут слу-

жить надежно защищенные от загрязнения подземные воды [1], состав которых зависит от условий их формирования.

В подземных водах Кузбасса содержание железа(II) значительно превышает предельно допустимые концентрации [2, 3]. Одним из наиболее эффективных путей решения проблемы очистки вод от тяжелых металлов считается применение сорбционных методов. В последнее время для удаления неорганических веществ, в

том числе и ионов железа, предлагается вместо традиционно рекомендуемых минеральных сорбентов применять материалы на основе углерода [4]. Эффективность извлечения железа, при его концентрациях в воде до 6 мг/л, углеродными адсорбентами может варьироваться в зависимости от типа используемого углеродного материала (УМ) – от 90–70 % для микропористых активных углей [5, 6] до 40–20 % для сорбентов на основе антрацитов [7, 8]. Кроме того, углеродные материалы выгодно использовать, если требуется комплексная очистка как от неорганических загрязнителей, так и от поллютантов органического характера.

Объектом исследования служил фильтрующий углеродный материал на основе антрацита “Пуролат-Стандарт”, обладающий низкой стоимостью.

Более ранние исследования [7] показали невысокую адсорбционную емкость этого сорбента по отношению к ионам железа(II), а также перспективность использования азотсодержащих органических соединений в качестве модификаторов углеродной поверхности для повышения извлечения данного иона металла.

Цель настоящей работы – исследование возможности увеличения адсорбционной емкости углеродного материала “Пуролат-Стандарт” по отношению к ионам железа(II) путем реагентного модифицирования минеральной кислотой и/или аминокислотой с последующим закреплением органического модификатора на поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы исследования

Исходный фильтрующий материал “Пуролат-Стандарт” (ООО “АНТР-АКТИВ”, Россия) был предварительно отмыт от пылевых фракций и высушен до воздушно-сухого состояния. Затем часть подготовленных образцов обработали раствором серной кислоты с концентрацией ионов водорода 4.0 моль/л, после чего сорбент отмывали дистиллированной водой до отрицательной реакции на ионы водорода с отделением взвеси и высушивали при комнатной температуре.

Модифицирование исходного УМ (образец П) и предварительно обработанного серной кислотой УМ (образец П1) проводили 5.0 % раствором аминокетановой кислоты (АЭК), получили образцы П2 и П3 соответственно. Сорбенты заливали

раствором аминокислоты при предварительно определенном соотношении Т/Ж = 1 : 10 и выдерживали в течение 24 ч. После модифицирования УМ промывали небольшим количеством дистиллированной воды, равным объему угля, и в течение 12 ч сушили на воздухе. Затем все обработанные образцы сорбента прогревали в сушильном шкафу при 210 °С в течение 2 ч. После охлаждения в эксикаторе образцы сорбентов хранили в герметичной емкости.

Исследование пористой структуры исходного и модифицированных образцов УМ проводили с использованием анализатора удельной поверхности дисперсных и пористых материалов “СОРБОМЕТР-М” (КАТАКОН, Россия). В качестве адсорбата использовался азот. Для расчёта удельной поверхности по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), а также объема микропор и суммарного объема мезо- и макропор по методу статистической толщины поверхностного слоя (STSA), использовалось программное обеспечение прибора.

Рентгенофазовый анализ осуществляли с помощью порошкового дифрактометра TD-3700 (Dandong Tongda Science & Technology Co., Китай). Содержание фаз определяли моделированием дифракционных картин по методу Ритвельда при использовании программного пакета Topas (Bruker, США) и базы данных ICSD.

Морфологию образцов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6390 LV (JEOL, Япония) с энергодисперсионной приставкой JED 2300. Микрофотографии образцов до и после адсорбции ионов железа получали в режиме вторичных электронов (режим SEI).

Инфракрасные спектры сорбента в виде таблетки с KBr (при соотношении УМ/KBr = 1 : 125) регистрировали в области 4000–550 см⁻¹ с помощью ИК-Фурье спектрометра “ИнфРАЛЮМ ФТ-08” (Люмэкс, Россия) с приставкой НРВО (нарушенное полное внешнее отражение), число сканов 25.

Оценка гидролитической адсорбции на исходном и модифицированных образцах проводилась по ГОСТ 33578-2015.

Распределение ионогенных групп на поверхности сорбентов в зависимости от их констант ионизации (показателя рК_а) оценивали с помощью спектрофотометра ПЭ-5300В (ПромЭкоЛаб, Россия) методом рК-спектрии с использованием индикаторов Гаммета [9].

Для исследования адсорбции ионов железа на исследуемых УМ применяли модельные растворы сульфата железа(II) с концентрацией от 0.20 до 500 мг/л. Навеску сорбента (1.0000 ± 0.0010 г) заливали раствором (100.0 мл) и перемешивали в герметично закрытых колбах на универсальном лабораторном встряхивателе WU-4 (PREMED, Польша) в течение не менее 24 ч. Как показали предварительные опыты, этого времени достаточно для достижения сорбционного равновесия в растворе. Для отделения твердой фазы и взвеси использовали центрифугу MPW-310 (MPW Med. Instruments, Польша), условия центрифугирования предварительно выбирали на модельной смеси (УМ – дистиллированная вода). Время центрифугирования при 3000 об/мин составило 20 мин. Все опыты проводили при комнатной температуре (25.0 ± 2.0 °C).

Равновесную концентрацию железа определяли по реакции образования окрашенного соединения с сульфосалициловой кислотой в щелочной среде (ПНД Ф 14:2:4.50-96) методом абсолютной калибровки на спектрофотометре.

Величину адсорбции (q , ммоль/г) рассчитывали по уравнению:

$$q = V(c_0 - c)/m$$

где V – объем раствора, л; c_0 и c – концентрации ионов железа в растворе до и после контакта с сорбентом соответственно, ммоль/л; m – масса сорбента, г.

Для расчетов основных параметров равновесия адсорбции использовали модель Ленгмюра и модифицированную для случая адсорбции ионов модель Дубинина–Радускевича [10].

Линеаризованная форма уравнения Ленгмюра имеет вид

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max} k_L} \quad (2)$$

где c_e – равновесная концентрация, моль/л; q_e – величина адсорбции при равновесной концен-

трации, моль/г; $q_{\max}$ – величина предельной адсорбционной емкости монослоя, моль/г; k_L – константа адсорбционного равновесия, л/моль; а линеаризованная форма уравнения Дубинина–Радускевича:

$$\ln q_e = \ln q_0 - k_{DR} \left[RT \ln \left(1 + \frac{1}{c_e} \right) \right]^2 \quad (3)$$

где q_0 – предельная адсорбция, моль/г; c_e – равновесная концентрация, моль/л; k_{DR} – константа, связанная со средней свободной энергией адсорбции.

Константа уравнения Ленгмюра (k_L) позволяет оценить величину свободной энергии Гиббса адсорбции (ΔG) [11]:

$$-\Delta G = RT \ln(wk_L) \quad (4)$$

где w – молярная концентрация воды, моль/л.

Константу уравнения Дубинина–Радускевича (k_{DR}) использовали для оценки свободной энергии адсорбции (E), позволяющей установить тип взаимодействия сорбент–сорбат [10]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2k_{DR}}} \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование характеристик сорбентов

Изучение пористой структуры исходного и модифицированных образцов УМ показало (табл. 1), что использованные способы модифицирования не привели к значительному изменению текстурных характеристик сорбента. Все образцы относятся к непористым материалам с низкой удельной поверхностью ($S_{уд}$). Для всех сорбентов, за исключением П1, удельная поверхность составляет в среднем 1.70 ± 0.20 м²/г, для обработанного серной кислотой (образец П1) – 7.68 м²/г. В случае образца П1 увеличение $S_{уд}$ может быть связано с растворением минеральных соединений сорбента. Закрепление АЭК снижает удельную поверхность УМ. Рассчитанный суммарный объем пор исследуемых сорбентов не превышает 1 см³/г, микропоры отсутствуют. Величина среднего диаметра, рассчитанного для условных цилиндрических пор [12], у всех образцов превышает 100 нм (см. табл. 1). Это позволяет предположить, что они могут представлять собой области контакта частиц УМ.

Анализ образцов сорбентов методом СЭМ подтвердил отсутствие пор на поверхности (рис. 1). Сравнение микрофотографий образцов до и после извлечения ионов железа(II) из водного раствора с концентрацией 15 мг/л (образцы по-

ТАБЛИЦА 1

Характеристики пористой структуры и состояния поверхности исследуемых образцов

Образец	$S_{уд}$, м ² /г	V_{Σ} , см ³ /г	$D_{пор}$, нм	pH _{ВВ}	pH _{ИАТ}
П	1.62	0.21	518.5	3.75	7.90
П1	7.68	1.07	557.3	3.25	6.40
П2	1.89	0.02	42.3	3.98	9.05
П3	1.92	0.21	437.5	4.18	8.05

Примечание. $S_{уд}$ – удельная поверхность; V_{Σ} – суммарный объем пор; $D_{пор}$ – диаметр пор; pH_{ВВ} – pH водной вытяжки; pH_{ИАТ} – изоадсорбционная точка углеродных материалов.

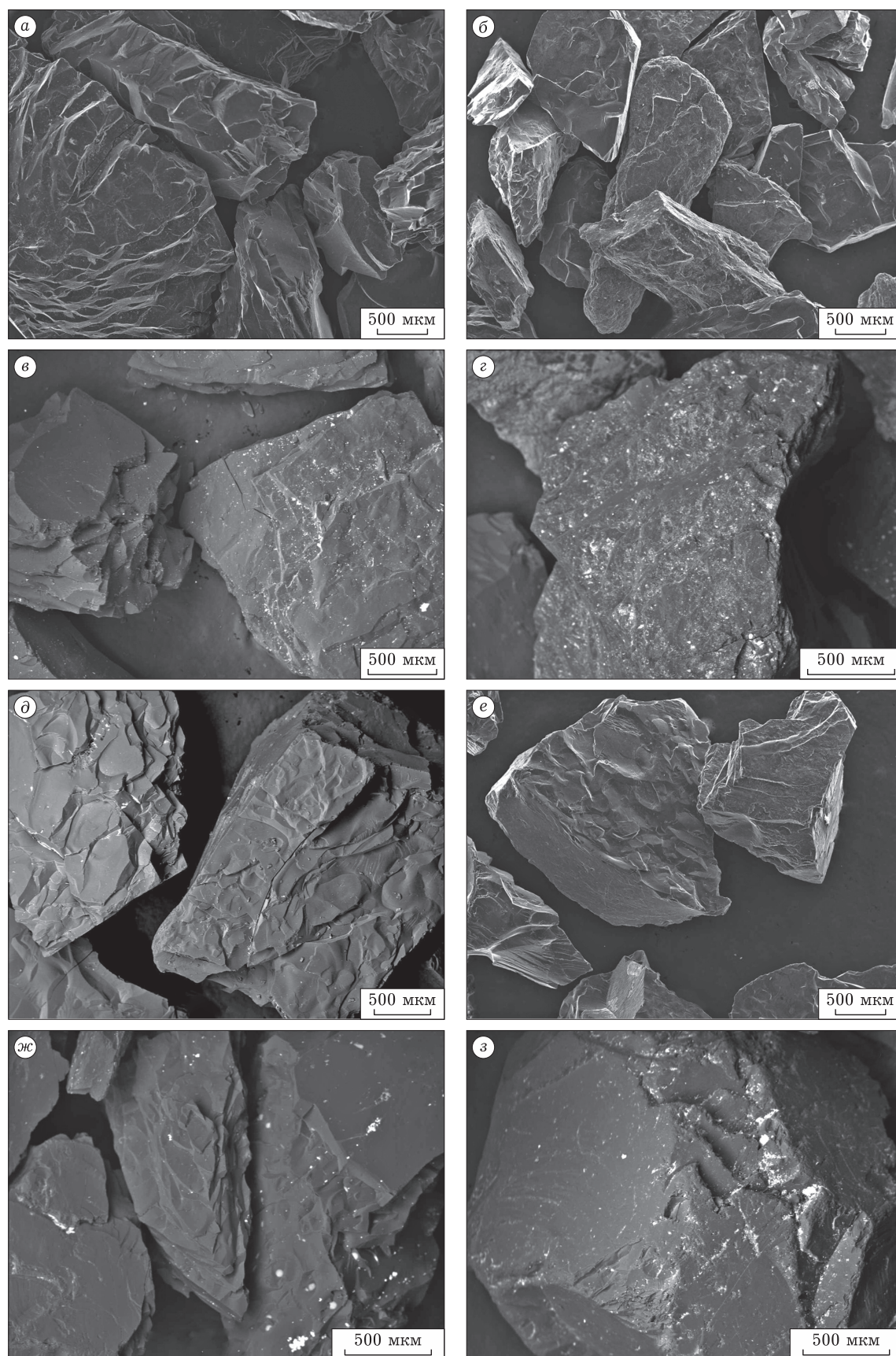


Рис. 1. СЭМ-изображения в режиме SEI образцов углеродного сорбента: П (а); П-Fe (б); П2 (в); П2-Fe (г); П1 (д); П1-Fe (е); П3 (ж); П3-Fe (з).

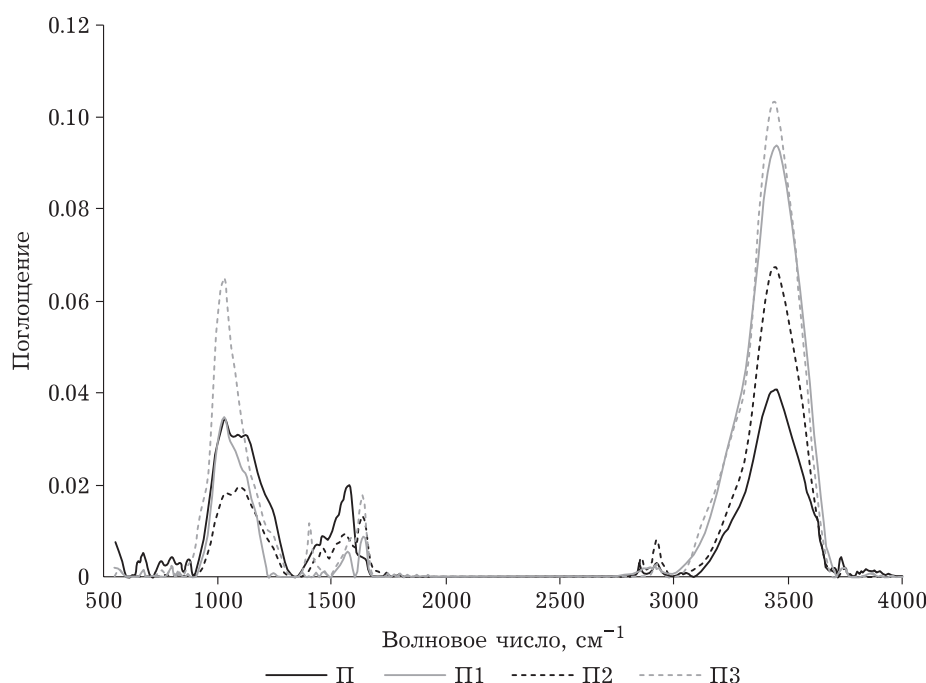


Рис. 2. ИК-спектры образцов углеродного сорбента П, П1, П2, П3.

сле адсорбции железа обозначены П-Fe, П1-Fe, П2-Fe, П3-Fe) позволило предположить его адсорбцию не только на внешней поверхности УМ, но и на стенках макропор.

Рентгенофазовый анализ показал, что основную фазу сорбентов представляет аморфный углерод (87–89 %), также присутствуют кристаллический кварц (до 2.1 %) и алюмосиликаты типа мусковита (до 7.5 %). Содержание остальных фаз находится в границах погрешности определения данного метода (менее 2 %).

Наибольший интерес представляет изучение изменения свойств поверхности УМ при их модифицировании, так как именно модифицирование, вероятнее всего, будет наиболее значимым фактором, влияющим на адсорбцию ионов металлов. Исследование гидролитической активности УМ выявило (см. табл. 1), что обработка серной кислотой уменьшает рН водной вытяжки сорбента, а модифицирование аминокснтановой кислотой как образца П, так и П1, – увеличивает. Аналогичным образом изменяется и величина изоадсорбционной точки ($\text{pH}_{\text{изт}}$) углеродных материалов.

По данным ИК-спектроскопии, процесс модифицирования образцов УМ приводит к изменениям состояния поверхности, особенно ярко проявляющимся в области так называемых отпечатков пальцев (1700–600 см^{-1}) (рис. 2). Действительно, обработка серной и/или аминокснтановой кислотой ожидаемо привела к росту колебаний

связанных –ОН- и –NH-групп (3100–3540 см^{-1}). Кроме того, в ИК-спектре данных образцов появилась полоса поглощения (п. п.) при 1635 см^{-1} , соответствующая входящей в состав сопряженных хинонов или лактамов карбонильной группе, а также карбоксилат-иону [13]. Это в сочетании с резким снижением интенсивности пика при 1125 см^{-1} для образца П1 может свидетельствовать о гидролизе сложноэфирных структур и перегруппировке фенольных групп в хиноидные при адсорбции ионов водорода на углеродной поверхности [14]. В случае образца П2 дополнительно появляются колебания при 2850 и 2925 см^{-1} (метиленовая группа), а также снижается интенсивность колебаний карбоксилат-иона при 1580 и 1430 см^{-1} и –С–О–связи фенолов и простых эфиров при 1125 и 1030 см^{-1} [13]. Данные изменения предполагают закрепление модификатора на поверхности сорбента за счет образования амидной связи [15]. Для образца П3 кроме уже упомянутых п. п. проявилось плечо при 3120 см^{-1} ($-\text{NH}_3^+$) и возросла по сравнению с образцом П1 интенсивность колебаний при 1520, 1405, 1250, 1130 и 1023 см^{-1} . Эти данные свидетельствуют о нахождении аминокислоты на поверхности не только в молекулярном виде, но и в ионизированной форме (возможно, цвиттер-иона) [16].

Исследование состояния поверхности с использованием индикаторов Гаммета показало присутствие функциональных групп в широком

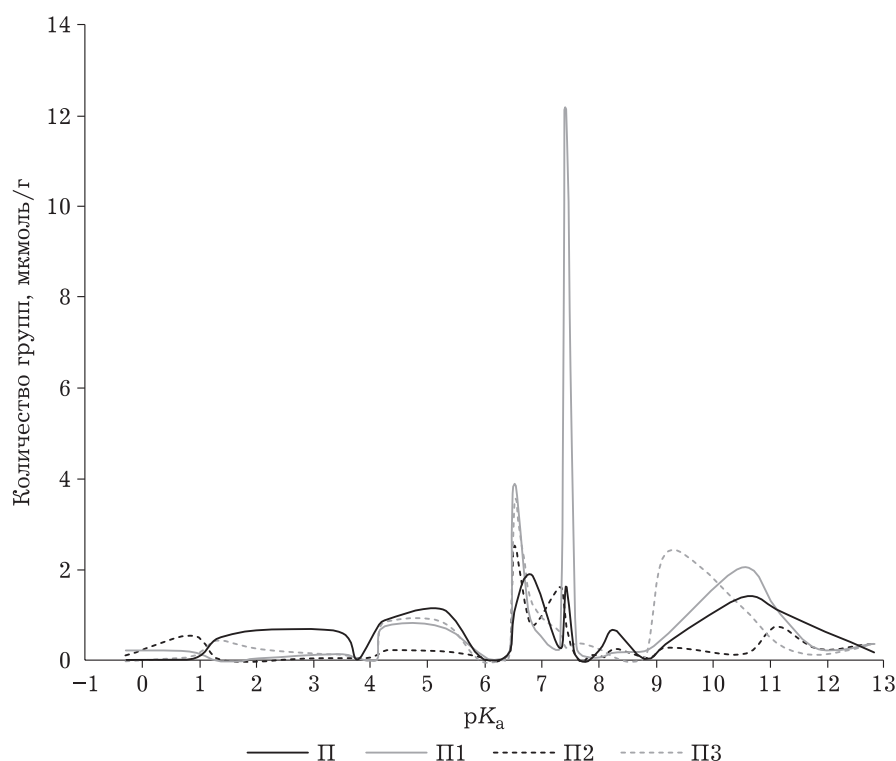


Рис. 3. Распределение функциональных групп по кислотности (pK_a) на поверхности образцов углеродного сорбента П, П1, П2, П3.

диапазоне кислотности. Зависимости количества кислотных/основных групп от показателя их констант ионизации (pK_a -спектры) представлены на рис. 3. Полученные данные подтверждают изменение поверхности сорбентов при модифицировании. Так, при обработке серной кислотой (образец П1) наиболее заметные изменения по сравнению с исходным сорбентом произошли в средней области pK_a -спектра, где резко возросло количество групп с pK_a 6.4 и 7.3. Незначительно повысилось количество сильнокислотных групп с $pK_a < 1.0$, а также основных групп в области pK_a 9.0–11.4. При этом уменьшилась доля кислотных групп с pK_a 1.1–3.8 и с pK_a 8.3. Эти данные подтверждают предположение о процессах перегруппировки и гидролиза кислородсодержащих поверхностных групп при адсорбции ионов водорода. Закрепление на поверхности АЭК (образец П2) также приводит к росту количества групп с $pK_a < 1.0$ и pK_a 6.4 (см. рис. 3). Доля остальных групп на поверхности данного сорбента по сравнению с образцом П резко снижается. При последовательной обработке сорбента серной и аминокетановой кислотами (образец П3) наиболее заметным является повышение количества групп с pK_a 8.8–9.8 по сравнению с образцом П1. Полученные данные

не противоречат результатам ИК-спектроскопии и предположению об образовании амидной связи в образце П2 и о наличии аминогруппы, не связанной с углеродной поверхностью, в образце П3.

Исследование равновесия адсорбции ионов железа(II)

Для установления наиболее предпочтительных вариантов модифицирования сорбента “Пуролат-Стандарт” с целью повышения его емкости по отношению к железу(II) необходимо экспериментально проверить эффективность адсорбции на всех модифицированных образцах в условиях равновесия. Кроме того, эти данные требуются для разработки в дальнейшем адсорбционной технологии, обеспечивающей очистку воды от железа(II) до необходимого уровня.

Для описания равновесия в гетерогенной системе сорбент/раствор широко используются изотермы адсорбции [17, 18]. На рис. 4 приведены изотермы адсорбции железа(II) исходным и модифицированными образцами. Анализ полученных данных показал, что для всех исследуемых сорбентов характерна традиционная L-форма изотерм по классификации Гильса. Для образцов П2 и П3 наблюдаются две ступени, вторая достигается при высоких равновесных концен-

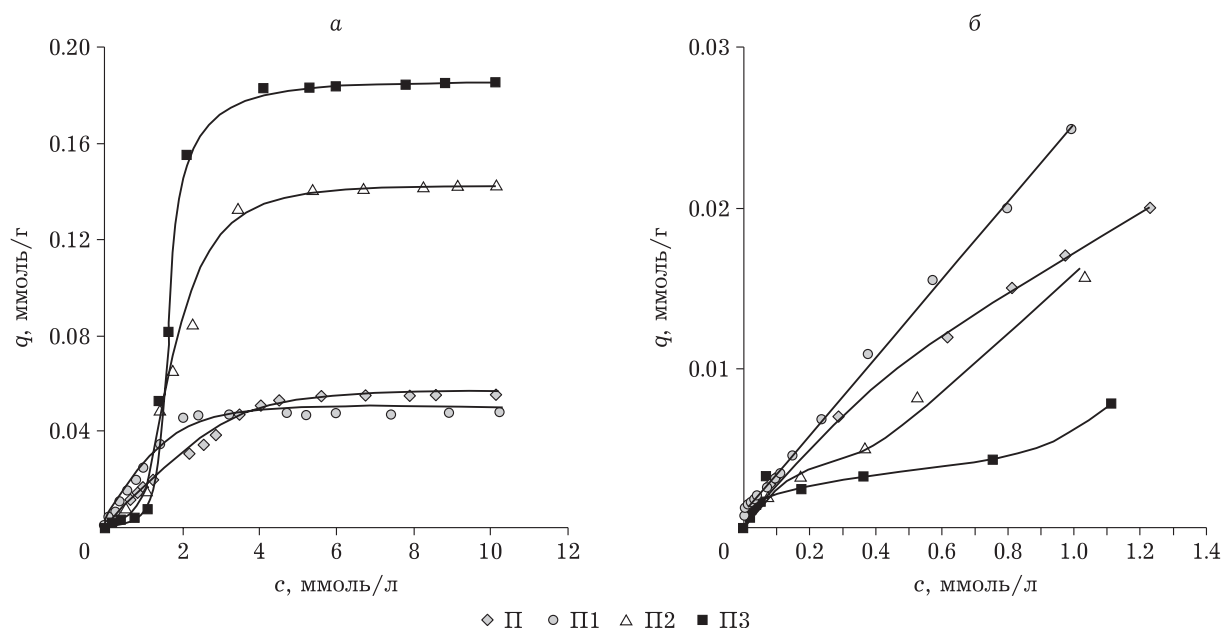


Рис. 4. Изотермы адсорбции ионов железа(II) (q , ммоль/г) образцами углеродного сорбента П, П1, П2, П3: а – в исследуемом интервале концентраций ($c = 0-10$ ммоль/л) раствора сульфата железа(II); б – на начальном участке ($c = 0-1.2$ ммоль/л).

трациях железа в растворе (>1 ммоль/л). Появление второй ступени характерно только для модифицированных АЭК образцов, что может свидетельствовать об изменении механизма взаимодействия сорбент–сорбат.

В области низких равновесных концентраций (до 1.5 ммоль/л) адсорбция ионов железа(II) образцами П2 и П3, для модифицирования которых использовалась АЭК, меньше, а образцом П1, обработанном только серной кислотой, – больше по сравнению с исходным сорбентом (см. рис. 4, б). Однако при более высоких концентрациях адсорбционная активность имеет следующий порядок: П3 > П2 > П > П1. Повышение адсорбции на начальном этапе для образца П1, возможно, связано с конверсией фенольных групп в хиноидные в результате адсорбции на углеродной поверхности ионов водорода и, как следствие, с ростом поверхностных активных центров [14]. Уменьшение адсорбции в области малых равновесных концентраций для образцов П2 и П3 может быть связано, во-первых, с частичным блокированием поверхностных центров сорбента аминокислотой или образованием связи центров с АЭК, а во-вторых – возможным взаимным отталкиванием ионов железа и ионизированных аминокислот АЭК.

Для интерпретации полученного массива данных и изучения взаимодействия железа(II) с исследуемыми сорбентами использованы описывающие равновесие адсорбции модели Ленгмюра и Дубинина–Радускевича. Оба уравне-

ния корректно ($R^2 > 0.90$) описывают адсорбцию иона металла сорбентами П и П1 (табл. 2). На изотермах адсорбции Fe^{2+} образцами П2 и П3 в координатах используемых моделей наблюдается несколько линейных участков (рис. 5), при этом коэффициент корреляции выше для модели Ленгмюра.

Рассчитанная величина энергии Гиббса адсорбции свидетельствует о самопроизвольном протекании процесса, а близкие значения этого параметра для П и П1, а также П2 и П3 – о схожести типов взаимодействия ионов Fe^{2+} с углеродной поверхностью.

Для образцов П2 и П3 в области низких равновесных концентраций рассчитанные величины предельной емкости монослоя (q_{max}) (табл. 2) близки по значению к суммарному количеству поверхностных групп с $\text{pK}_{\text{a}} < 2.1$ (8.2 и 5.5 мкмоль/г для П2 и П3 соответственно, рис. 3). Можно предположить, что в качестве активных центров выступают карбоксильные группы и взаимодействие ионов железа протекает за счет ионного обмена.

Образование прочных связей ион металла – поверхность УМ подтверждается оценкой свободной энергии адсорбции E , рассчитанная величина которой (см. табл. 2) свидетельствует о хемосорбции ионов железа [11, 19]. При этом можно предположить, что с поверхностью образца П3 ионы железа образуют более прочную связь, чем с остальными исследуемыми образ-

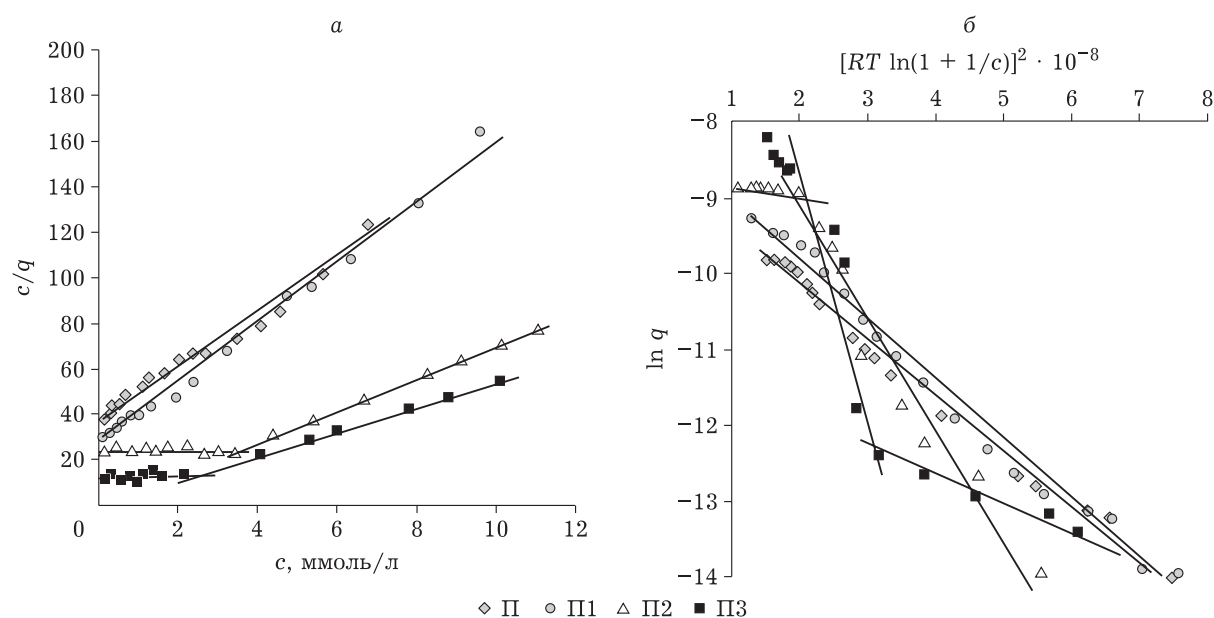


Рис. 5. Изотермы адсорбции ионов железа(II) образцами углеродного сорбента П, П1, П2, П3 в координатах уравнения Ленгмюра (а) и уравнения Дубинина–Радужкевича (б). Обозн. см. рис. 4.

цами. Согласно [19], под хемосорбцией подразумевается ионный обмен, однако для образцов П2 и П3 возможно также образование хелатных комплексов ионов железа с модификатором [20].

По совокупности полученных результатов можно предположить, что ионы железа могут закрепляться на поверхности сорбента как за счет ионного обмена, так и формирования внутрикомплексного соединения с АЭК. Вероятно, закрепление аминокислоты в виде цвиттер-иона (П3) затрудняет адсорбцию Fe^{2+} в области низких равновесных концентраций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любой из использованных вариантов модифицирования углеродного материала (серной кисло-

той и/или аминокетановой кислотой) не приводит к заметному изменению пористой структуры и фазового состава сорбентов. Изменение состояния поверхности и адсорбционной активности углеродного материала зависит от типа модификатора.

Модифицирование только серной кислотой предпочтительно использовать для повышения адсорбционной способности углеродного материала “Пуrolat-Стандарт” при использовании его для очистки подземных вод с низким содержанием железа. Для подготовки воды из подземных источников с повышенным содержанием железа(II) рекомендовано использование сорбента, модифицированного последовательно серной и аминокетановой кислотами.

ТАБЛИЦА 2

Параметры адсорбции ионов железа(II) исследуемыми образцами в условиях равновесия

Образец	Уравнение Ленгмюра			Уравнение Дубинина–Радужкевича		
	q_{max} , ммоль/г	$-\Delta G$, кДж/моль	R^2	q_0 , ммоль/г	E , кДж/моль	R^2
П	0.085	24.14	0.9196	0.121	9.05	0.9664
П1	0.064	26.06	0.9587	0.102	9.59	0.9180
П2	0.009	30.21	0.9842	0.050	8.54	0.9826
	0.148	29.71	0.9998	0.152	9.32	0.8080
П3	0.005	32.25	0.9843	0.024	10.95	0.9667
	0.193	29.50	0.9980	0.236	17.45	0.7714

Примечание. q_{max} – предельная адсорбционная емкость монослоя; ΔG – свободная энергия Гиббса; q_0 – предельная адсорбционная емкость; E – свободная энергия адсорбции; R^2 – коэффициент корреляции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брель О. А., Задорожная Г. В., Сасаев Н. И., Егорова А. И. Стратегирование водных ресурсов Кузбасса // Экономика в пром-сти. 2020. Т. 13, № 3. С. 357–365.
2. Стоящева Н. В. Антропогенная нагрузка на водные объекты бассейна реки Томи // География и природ. ресурсы. 2018. № 3. С. 95–103.
3. Сколупович Ю. Л., Купницкая Т. А., Цыба А. А. Исследование качественного состава подземных вод Кузбасса // Вестн. Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. “Материалы. Конструкции. Технологии”. 2017. № 2. С. 107–115.
4. Badran A. M., Utra U., Yussof N. S., Bashir M. J. K. Advancements in adsorption techniques for sustainable water purification: a focus on lead removal // Separations. 2023. Vol. 10, No. 11. Art. 565.
5. Филатова Е. Г., Дударев В. И., Соболева А. А., Помазкина О. И. Обезжелезивание сточных вод углеродными сорбентами // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 3. С. 90–98.
6. Филатова Е. Г., Дударев В. И., Сырых Ю. С., Нгуен Н. А. Т. Извлечение ионов железа (II) из водных растворов углеродными сорбентами // Водоснабжение и санитар. техника. 2010. № 8. С. 42–44.
7. Гора Н. В., Беляева О. В., Чернышёв Д. А., Голубева Н. С. Исследование возможности применения углеродных сорбентов для очистки природных вод от железа // Водоснабжение и санитар. техника. 2024. № 5. С. 5–9.
8. Зубкова О. С., Алексеев А. И., Залилова М. М. Исследования совместного применения углеродсодержащих и алюминийсодержащих соединений для очистки сточных вод // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. 2020. Т. 63, № 4. С. 86–91.
9. Нечипоренко А. П., Орехова С. М., Плотникова Л. В., Глазачева Е. Н., Волкова К. В., Успенская М. В. Специализированный практикум по физико-химическим методам анализа: электронная и ИК-спектроскопия отражения, люминесцентная и рентгенофлуоресцентная спектроскопия, рефрактометрия, термометрия, кинетическая рН-метрия, индикаторный метод – РЦА. Теория и практика: учеб. пособие. Ч. 2. СПб.: Ун-т ИТМО, 2016. 181 с.
10. Donat R., Akdogan A., Erdem E., Cetisli H. Thermodynamics of Pb^{2+} and Ni^{2+} adsorption onto natural bentonite from aqueous solutions // J. Colloid Interface Sci. 2005. Vol. 286, No. 1. P. 43–52.
11. Куприн В. П., Иванова М. В., Николенко Н. В. Адсорбция азотсодержащих гетероциклических соединений из водных растворов на железе и оксиде $\alpha-Fe_2O_3$ // Журн. физ. химии. 2000. Т. 74, № 7. С. 1277–1282.
12. Козлов А. П., Дудникова Ю. Н., Зыков И. Ю., Созинов С. А., Исмагилов З. Р. Методические аспекты определения параметров пористой структуры углеродных сорбентов на основе ископаемых углей // Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. 2017. № 6 (124). С. 197–203.
13. Тарасевич Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений: справ. материалы. М.: МГУ, 2012. 54 с.
14. Солдатов А. И. Структура и свойства поверхности углеродных материалов // Вестн. Челябинского гос. ун-та. 2001. Т. 4, № 1. С. 155–163.
15. Bakels S., Meijer E. M., Greuell M., Porskamp S. B., Rouwhorst G., Mahé J., Gaigeot M.-P., Rijs A. M. Interactions of aggregating peptides probed by IR-UV action spectroscopy // Faraday Discuss. 2019. Vol. 217. P. 322–341.
16. Бутырская Е. В., Нечаева Л. С., Шапошник В. А., Дроздова Е. И. Отнесение полос в ИК спектрах водных растворов глицина на основе квантово-химического расчета // Сорбц. и хроматограф. процессы. 2012. Т. 12, № 4. С. 501–512.
17. Shahmirzadi M. A. A., Hosseini S. S., Luo J., Ortiz I. Significance, evolution and recent advances in adsorption technology, materials and processes for desalination, water softening and salt removal // J. Environ. Manage. 2018. Vol. 215. P. 324–344.
18. Chan L. S., Cheung W. H., Allen S. J., McKay G. Error analysis of adsorption isotherm models for acid dyes onto bamboo derived activated carbon // Chin. J. Chem. Eng. 2012. Vol. 20, No. 3. P. 535–542.
19. Линников О. Д., Родина И. В., Сунцов А. Ю. Сорбционные свойства активированного угля БАУ-А по отношению к ионам никеля // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58, № 5. С. 473–479.
20. Ashmead S. D. The chemistry of ferrous bis-glycinate chelate // Arch. Latinoam. Nutr. 2001. Vol. 51, No. 1. P. 7–12.

Поступила в редакцию 21.01.2025

Одобрена после рецензирования 21.02.2025

Принята к публикации 25.03.2025