ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
MINERAL PROCESSING

Научная статья
УДК 622.74:622.6
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-185-194

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ И ПОЛУЧЕННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Домрачева Валентина Андреевна*, Раевская Ирина Дмитриевна, Синицын Илья Михайлович

Иркутский национальный исследовательский технический университет

* для корреспонденции: domra@istu.edu

CC BY

Информация о статье
Поступила:
09 февраля 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
15 июня 2026 г.

Принята к публикации:
01 июля 2026 г.

Ключевые слова:
Углеродные сорбенты, модифицирование, физико-химические характеристики, сорбционные характеристики, очистка сточных вод, тяжелые металлы, сульфирование

Аннотация.
Получение, исследование и применение сорбентов на основе ископаемых углей для извлечения ценных компонентов из сточных вод и техногенных образований является актуальным. В работе приведено исследование сорбционной активности углеродных сорбентов на основе бурого, каменного и древесного углей, а также их модифицированных образцов. Модифицирование проведено методом сульфирования с использованием олеума с концентрацией сернистого ангидрида 20%. Исследована сорбционная активность исходных и модифицированных углеродных сорбентов, показано влияние сульфирования на их структурно-сорбционные характеристики. Изучены физико-химические характеристики исходных углеродных сорбентов и их модифицированных образцов, прежде всего пористая структура, сорбционная активность по стандартным веществам (йоду и метиленовому голубому), механическая прочность и др. Результаты исследования показали, что у модифицированных сорбентов повышается суммарная пористость по водопоглощению от 0,5 до 0,8 см^3/г, снижается сорбционная активность по йоду от 18 до 27% и повышается сорбционная активность по метиленовому голубому в зависимости от вида угля. Изменение данных параметров свидетельствует о развитии пористой структуры и увеличении количества мезопор, которые более эффективно сорбируют ионы тяжелых металлов из растворов.

Для цитирования: Домрачева В.А., Раевская И.Д., Синицын И.М. Исследование углеродных сорбентов и их модифицированных образцов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 185-194. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-185-194, EDN: IGMUVB

1. Введение.

Углеродные сорбенты широко применяются во многих отраслях промышленности. Они используются в горнодобывающей, обогатительной, металлургической, нефтехимической и других отраслях. В обогащении и гидрометаллургии сорбенты используются для извлечения ценных компонентов, например, для извлечения золота из водных растворов. В нефтехимической отрасли углеродные сорбенты используются для очистки нефти и газа от примесей [1, 2]. Для широкого круга специалистов это открывает дополнительные экономические и экологические возможности.

Особое значение занимают углеродные сорбенты в сфере охраны окружающей среды. Большое количество технологий по очистке сточных вод и отходящих газов предполагает сорбционную очистку. Плюсом сорбционной очистки сточных вод является то, что извлеченные вещества, например металлы и другие вещества, можно вернуть в производство после проведения десорбции. Еще одним

преимуществом сорбентов является то, что они могут комплексно удалять сразу несколько загрязняющих веществ. Наличие пор разного размера и разных функциональных групп на поверхности сорбента позволяет очищать стоки от нескольких веществ или соединений.

Благодаря своим физико-химическим свойствам, таким как гидрофобность и набухаемость, сорбционные материалы используются для ликвидации нефтяных проливов и других химических загрязнений [2].

Для обогатителей, металлургов, экологов и других специалистов, использующих сорбционные материалы, особо важно найти сорбенты, обладающие высокой сорбционной емкостью и при этом невысокой себестоимостью. При выборе сорбента на практике руководствуются совокупностью следующих показателей: сорбционной емкости; ресурсоемкости производства; возможностью регенерации; затратностью утилизации отработанного материала. В экономическом контексте оценка себестоимости должна включать не только прямые производственные расходы, но и затраты на подготовку сырья.

Создание сорбентов – достаточно затратный процесс, из-за чего сорбенты приобретают высокую себестоимость, даже если для их создания используется сравнительно недорогое сырье. Во-первых, первые этапы получения сорбентов представляют собой термическую обработку исходного материала при высоких температурах, что предполагает большие затраты электроэнергии. Стоит отметить, что при термической обработке исходного сырья образуются отходящие газы, содержащие загрязняющие вещества, которые необходимо очищать, что также предполагает дополнительные затраты. Во-вторых, для создания некоторых сорбентов проводят обработку химическими реагентами, после чего нужно отфильтровывать химические реагенты, а также промывать обработанный материал. Образуются сточные воды, содержащие токсичные вещества, которые также необходимо очищать, и опасные токсичные отходы, которые нужно передавать на утилизацию специализированной организации.

Поэтому на данный момент особо актуально изучение исходных материалов для создания эффективных сорбентов. В качестве сырья для создания углеродных сорбентов используют ископаемые угли, древесину, торф, отходы агропромышленного комплекса (шелуха семян, скорлупа орехов) [3], отходы нефтехимического производства [4] и т. д. Каждое из указанных сырьевых направлений имеет свои сильные и слабые стороны. Подбор сырья должен базироваться на балансе между доступностью, стоимостью подготовки и желаемыми конечными свойствами сорбента, что важно учитывать уже на стадии разработки технологии создания эффективных сорбентов, не требующих больших затрат на их производство.

Использование ископаемых углей, а также угля на основе древесины для российских предприятий является перспективным направлением для создания сорбентов по ряду причин. Во-первых, это экономическая выгода: Россия обладает значительным ресурсным потенциалом ископаемых углей и древесного сырья, что позволяет затрачивать меньше средств на закупку и поставку сырья для создания сорбентов. Запасы только бурого угля в России составляют около 146 млрд тонн [5]. Во-вторых, при создании сорбентов на основе ископаемых углей сравнительно легко развивается требуемая пористость, образуются функциональные группы [6]. Ископаемые угли и угли на основе древесины обладают химическими компонентами, которые положительно влияют на сорбционные свойства конечного продукта. Так, например, бурый уголь содержит гуминовые вещества и функциональные группы, которые связывают ионы металлов на своей поверхности в прочные соединения [7, 8]. Наибольшей привлекательностью для создания углеродного сорбента обладает бурый уголь. Благодаря своей степени метаморфизма в процессе получения сорбента из бурого угля на поверхности сорбента образуется больше функциональных групп, которые положительно влияют на сорбционную активность [9]. Относительно низкая стоимость бурого угля, широкое распространение и доступность сырьевой базы делает его использование особенно перспективным при получении сорбентов.

Традиционно получают углеродные сорбенты по классической технологии, включающей карбонизацию и активацию [10]. Процесс карбонизации представляет собой один из ключевых этапов получения углеродных сорбентов и заключается в термической обработке исходного материала. Суть данного процесса состоит в нагреве образца до строго определенной температуры с последующей выдержкой при этой же температуре на протяжении заданного времени. Такая обработка проводится в специальных печах или реакторах, которые обеспечивают стабильные условия и предотвращают доступ кислорода. Исключение кислорода имеет принципиальное значение, так как оно препятствует процессу горения и разрушению материала. В ряде случаев для создания инертной атмосферы дополнительно применяют специальные газы, например гелий, азот или диоксид углерода, которые позволяют полностью исключить возможность окислительных реакций. Температура

карбонизации подбирается в зависимости от исходного материала: чем плотнее и механически прочнее структура исходного сырья, тем более высокие температуры необходимо применять. Так, для бурого угля температурный диапазон карбонизации составляет примерно 600-950℃, для каменного угля этот диапазон будет 900-1100℃, в то время как для фенолформальдегидных смол процесс проводится поэтапно – сначала при 300-400℃, затем при 500-600℃ и на заключительной стадии при 700-800℃. Такой многоступенчатый режим обеспечивает постепенное удаление летучих соединений и формирование более устойчивого углеродного каркаса. Кроме того, температура обработки напрямую определяет характер и соотношение различных типов пор: при относительно низких температурах преобладает макропористая структура, тогда как повышение температуры способствует формированию развитых микро- и мезопор, что существенно увеличивает сорбционную способность материала.

Часто применяется многостадийная карбонизация – сначала низкотемпературная для удаления летучих веществ, затем высокотемпературная для формирования пористой структуры. Также перед карбонизацией может проводиться предварительная обработка химическими реагентами, например, фосфорной, азотной кислотами или гидроксидом калия [4]. При масштабировании процесса на промышленный уровень следует учитывать исходный состав сырья, температурные параметры производства и требуемые характеристики конечного продукта.

В результате карбонизации у сорбента появляется первичная пористая структура, характеризующаяся в основном макропористой структурой. Макропоры не так эффективно сорбируют вещества из растворов, прежде всего это транспортные поры. Для эффективной сорбции необходимо, чтобы сорбент обладал мезо- и микропорами. Для повышения суммарного объема пор, развития микропор и мезопор, увеличения функциональных групп на поверхности сорбента проводят активацию. Активация – это термическая обработка при высокой температуре, примерно 700-1000℃, в токе какого-либо газа. В качестве газа-активатора применяют водяной пар, углекислый газ, а также их смеси, однако наибольшее распространение получил именно водяной пар. Его использование является более целесообразным с экономической точки зрения по сравнению с другими активаторами. К тому же процесс паровой активации отличается технологической простотой, не требует применения дорогостоящего оборудования и легко масштабируется для промышленного производства.

В результате проведения активации образуется больше мезо- и микропор и, как следствие, увеличивается удельная поверхность сорбента. Еще одним плюсом проведения активации является увеличение количества функциональных групп на поверхности сорбента, таких как гидроксильных, карбоксильных, карбонильных и др. Перед активацией могут проводить дополнительную обработку реагентами, например, предварительная обработка азотной кислотой с последующей паровой активацией позволяет получить углеродные сорбенты с катионообменными свойствами [11].

Для увеличения сорбционной активности и селективности извлечения ценных компонентов применяется метод модифицирования углеродных сорбентов. Под модифицированием понимают целенаправленную обработку исходного материала различными реагентами при строго определенных условиях, в результате чего изменяются его физико-химические и сорбционные свойства. Такой подход позволяет изменять химическую природу поверхности. Основными задачами модифицирования являются увеличение количества пор определенного размера, формирование новых функциональных групп, а также общее улучшение структурных и эксплуатационных характеристик сорбента. Благодаря этому создается возможность получения сорбентов с заданными свойствами, которые могут быть использованы в процессах очистки, разделения или селективного извлечения ценных компонентов.

Модифицирование можно классифицировать на химическую, полимерную модификации, модификацию наноматериалами, импрегнирование. Химическая модификация может проводиться в виде окислительной обработки реагентами. При данной обработке увеличивается удельная поверхность сорбента и объем пор по водопоглощению. На поверхности сорбента увеличивается количество функциональных групп, таких как гидроксильных (OH) и карбоксильных (COOH) и др. После химической модификации увеличивается сорбционная активность по ионам тяжелых металлов [12]. Одним из методов химического модифицирования является нитрование – обработка углеродного сорбента азотной кислотой, часто в присутствии мочевины при повышенной температуре [11]. При таком типе модификации на поверхности сорбента образуются нитрогруппы (NO_2), которые являются сильными электрон-акцепторами и изменяют химическую активность поверхности. В процессе нитрования увеличиваются

Таблица 1. Физико-химические характеристики исходных углеродных сорбентов
Table 1. Physicochemical Characteristics of Original Carbon Sorbents

Показатели	Сорбенты			
	БАУ	АБУ	АБЗ	КАД-йодный
Размер зерен, мм	-3+0,5	-3+0,5	-2,5+0,5	-2,5+0,5
Массовая доля влаги, %	0,28	0,03	1,51	3,57
Насыпная плотность, г/дм^3	194,6	435,0	510,0	450
Прочность, %	48,7	54,3	76,0	68,0
pH водной вытяжки	7,4	8,9	7,2	5,2
Суммарная пористость по водопоглощению, см^3/г	1,77	0,75	0,59	0,75
Сорбционная активность по йоду, %	64	58	55	55
Сорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г	11,1	11,4	12,1	11,3

ионообменные свойства сорбентов, особенно катионообменников, что улучшает их эффективность в очистке воды от ионов тяжелых металлов, токсинов. При использовании мочевины в процессе модифицирования методом нитрования снижается образование вредных оксидов азота, а также уменьшается деструкция углеродного материала, что улучшает экологичность проведения модифицирования и качество конечного продукта. Модифицирование углеродных сорбентов наночастицами серебра (наносеребро) придает сорбентам биоспецифические свойства, улучшает детоксикационные характеристики [13]. Известен способ модифицирования углеродных сорбентов силикация [14]. Метод направлен на увеличение прочности углеродного сорбента. Он представляет собой процесс введения или формирования кремнеземсодержащей минеральной компоненты (SiO_2) в структуре сорбента. Это достигается при термохимической обработке исходного материала, содержащего как органическую, так и минеральную часть, например сапропель. В результате данной обработки формируется пористая структура с определенным размером и распределением пор. Минеральная составляющая, содержащая 35-68% диоксида кремния, играет структурообразующую роль, обеспечивая сорбент высокой пористостью с узким распределением макропор. Диоксид кремния в данной структуре способствует формированию стабильной и эффективной матрицы.

Для повышения сорбционной активности углеродных сорбентов одним из наиболее популярных и одновременно доступных методов модифицирования является окисление. Данный метод отличается простотой реализации, относительной дешевизной и широким спектром применяемых реагентов. Следует отметить, что окисление может осуществляться с использованием практически любых окислителей, включая олеум, азотную кислоту, гипохлорит натрия, а также перекись водорода. При этом выбор конкретного реагента и условий проведения процесса в значительной степени определяет параметры модифицированного углеродного сорбента.

В процессе окисления параллельно идут каталитическое разложение окислителя, окислительно-восстановительное взаимодействие с углем с образованием поверхностных и фазовых оксидов. Важно отметить, что одновременно с этим может происходить частичное разрушение исходной структуры углеродного материала.

Преимущественным методом модифицирования является сульфирование, так как в процессе данной обработки сорбент не поддается сильной деструкции, на поверхности образуется большое количество различных функциональных групп, включая сульфогруппу [15].

2. Методика проведения исследования.

Для исследования были взяты углеродные сорбенты на основе ископаемых углей: КАД-йодный, АБУ (активированный бурый уголь), АБЗ (активат бурый зернистый) и БАУ (березовый дробленный активированный уголь). КАД-йодный – промышленный сорбент на основе каменного угля Кузнецкого угольного бассейна, АБЗ – сорбент на основе бурого угля Иркутского угольного бассейна, АБУ –сорбент на основе бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна, БАУ – сорбент на основе древесины-березы. Все сорбенты, кроме АБУ, получены по классической технологии [9]. Сорбент АБУ получен одностадийно, с помощью термической обработки бурого угля при температуре 900-1000℃ в плотном слое, методом обратной тепловой волны [16].

Физико-химические характеристики и показатели сорбционной активности определяли по гостированным методикам [17].

Насыпную плотность определяли в соответствии с ГОСТ 16190-70 «Сорбенты. Метод определения насыпной плотности». Методика заключается в определении массы и объема уплотненного сорбента. Отношение массы сорбента к его объему будет являться насыпной плотностью.

Определение массовой доли влаги определяли в соответствии с ГОСТ 12597-67. Массовая доля влаги является результатом разницы массы навески сорбента к массе той же навески, высушенной при температуре 105-110℃ до постоянной массы.

Гранулометрический состав определяли в соответствии с ГОСТ 16187-70 «Сорбенты. Метод определения фракционного состава». Сорбенты подвергали фракционированию на вибросите с использованием набора сит от 0,25 до 3 мм, после чего взвешивали фракции, оставшиеся на каждом сите, и выражали в процентном соотношении относительно массы взятого сорбента.

Определение прочности проводили в соответствии с ГОСТ 55873-2013 «Уголь активированный. Определение прочности стандартным методом». Методика заключается во взвешивании разрушенных частиц сорбента, которые подверглись разрушению с использованием шаров. Испытание проводится с использованием вибрационного сита, где навеска сорбента и шары загружаются на поддон.

Суммарную пористость по водопоглощению определяли по ГОСТ 17219-71. Метод основан на увеличении массы навески сорбента вследствие заполнения пор водой при кипячении.

Сорбционную активность по метиленовому голубому определяли на спектрофотометре в соответствии с ГОСТ 4453-74 «Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный». С помощью спектрофотометра определяли количество адсорбированного метиленового голубого в растворе.

Определение сорбционной активности по йоду проводилось с помощью титрования в соответствии с МРТУ № 6-16-1003-67 «Активные угли. Методы испытаний. Метод определения сорбционной активности по йоду». Результаты исследований исходных сорбентов приведены в Таблице 1.

Для повышения сорбционной активности сорбентов проводили модифицирование сорбентов методом окисления серной кислотой (сульфирование). Методика проведения модифицирования и параметры эксперимента приведены в патенте [18].

Процесс сульфирования проводили в 4 стадии:

Первая стадия заключалась в обработке сорбентов растворителем – дихлорэтаном, в отношении сорбента к растворителю 1:2. Взяли навески углеродных сорбентов АБУ, АБЗ, БАУ и КАД-йодный в количестве 50 граммов, поместили в колбы. К навеске АБУ, АБЗ и КАД-йодному добавили по 100 мл дихлорэтана. К навеске БАУ добавили 250 мл дихлорэтана, так как БАУ – более объемный сорбент. Колбы закрыли пробками и встряхивали на шейкере в течение часа. По окончанию встряхивания сорбенты поместили в конические воронки с фильтрами для отделения сорбента от растворителя в закрытом вытяжном шкафу на протяжении нескольких часов.

Обработка дихлорэтаном обоснована тем, что растворитель способствует разрыхлению поверхности сорбентов, разрушению межфрагментарных связей. Это способствует улучшению последующего контакта сорбентов с окислителем, за счет чего образуется больше функциональных групп (карбоксильных, гидроксильных, сульфогрупп и др.) на поверхности сорбентов [19,20].

Вторая стадия заключалась в обработке углеродных сорбентов олеумом с 20%-ным содержанием серного ангидрида (SO_3) при соотношении сорбента к олеуму, равном 1:7). Модифицирование происходило в колбе с обратным холодильником на водяной бане при температуре 70^0С. Для 50 граммов углеродного сорбента было взято 350 мл олеума (серной кислоты). Продолжительность сульфирования составила 3 часа. После обработки олеум отфильтровывали.

В третьей стадии полученный модифицированный сорбент промывали проточной водой до нейтральной реакции pH. Кислотность среды проверяли с помощью pH-метра марки pH-150МИ.

В четвертой стадии была проведена сушка сорбентов в сушильном шкафу при температуре 110^0С в течение 2 часов.

Физико-химические характеристики и показатели сорбционной активности модифицированных сорбентов определяли по тем же методикам, как и для исходных сорбентов. Результаты исследования модифицированных сорбентов приведены в Таблице 2.

3. Результаты исследования. Исходные углеродные сорбенты обладают развитой пористой структурой, о чем свидетельствуют такие показатели, как суммарная пористость по водопоглощению, активность по йоду и метиленовому голубому. У модифицированных образцов физико-химические и сорбционные характеристики изменились.

После модифицирования у сорбента марки АБУ увеличилась массовая доля влаги, у БАУ, КАД-йодный и АБЗ – снизилась. У сорбента на основе бурого угля марки АБУ массовая доля

влаги увеличилась почти в три раза, у сорбента на основе древесного угля марки БАУ и сорбента марки КАД-йодный массовая доля влаги снизилась в полтора раза, у АБЗ процент влаги снизился незначительно.

У трех исследуемых сорбентов – АБУ, БАУ и КАД-йодного – насыпная плотность увеличилась, тогда как у сорбента марки АБЗ наблюдается ее снижение.

В процессе модифицирования прочность снизилась у всех сорбентов. Максимальное снижение прочности произошло у сорбента БАУ (на 25%), минимальное – у КАД -йодного (на 9%). Приблизительно одинаковое снижение прочности у сорбентов АБУ и АБЗ (на 17-18% соответственно).

Суммарная пористость по водопоглощению у всех сорбентов в процессе модифицирования увеличилась. Значительное увеличение суммарной пористости у сорбента АБУ – на 41%, и БАУ – на 24%, у сорбентов КАД-йодный и АБЗ – на 9–10 % соответственно.

В процессе модифицирования снизилась сорбционная активность сорбентов по йоду. У сорбентов АБУ активность по йоду снизилась на 27%, БАУ – на 24%, у АБЗ и КАД-йодный – на 18-20% соответственно.

Сорбционная активность сорбентов по метиленовому голубому в процессе модифицирования увеличилась. Максимальное увеличение емкости по метиленовому голубому у БАУ – на 21,6%, у остальных сорбентов – на 6-7%.

4. Обсуждение результатов.

Увеличение массовой доли влаги возможно в результате увеличения удельной поверхности и суммарной пористости: создаются дополнительные участки для адсорбции паров водяного пара. Снижение массовой доли влаги может происходить, если у сорбента уменьшается количество микропор. В таком случае молекулы воды не задерживаются на поверхности [10].

Проведение модифицирования привело к снижению прочности сорбентов. Больше всего прочность снизилась у сорбента на основе древесного угля марки БАУ, меньше всего прочность снизилась у сорбента на основе каменного угля марки КАД-йодный. Во время модифицирования толщина стенок структуры пор уменьшается, некоторые стенки между порами также разрушаются. Все это ведет к уменьшению механической прочности. Низкая прочность способствует разрушению пористой структуры сорбента, вследствие чего сорбент будет мало эффективен для извлечения ионов металлов из растворов. Такой сорбент не способен выдержать несколько-циклов сорбция-десорбция и будет пригоден только для одноразового применения.

pH водной вытяжки после модифицирования становится ниже вследствие проведения модифицирования в кислотной среде.

Суммарная пористость по водопоглощению углеродных сорбентов в процессе модифицирования значительно увеличилась. Увеличение суммарной пористости происходит вследствие разрушения стенок между порами, сокращения количества микропор, увеличение количества мезопор и макропор.

Сорбционные активности сорбентов по йоду и метиленовому голубому являются международными стандартами, по которым можно судить о развитии микро-мезопористой структуры сорбентов. Сорбционная активность по йоду коррелируется с микропористой структурой. Йод сорбируется на поверхности пор с диаметром более 1 нм. Существует прямая зависимость между активностью по йоду и удельной поверхностью. Снижение сорбционной активности по йоду свидетельствует об уменьшении количества микропор в сорбенте (пор размером до 2 нм). Обосновано это тем, что сорбция молекул йода более эффективно

Таблица 2. Физико-химические характеристики модифицированных образцов углеродных сорбентов
Table 2. Physicochemical Characteristics of Modified Carbon Sorbent Samples.

Показатели	**БАУ- М**	**АБУ- М**	**АБЗ-М**	**КАД-М**
Размер зерен, мм	-3+0,5	-3+0,5	-2,5+0,5	-2,5+0,5
Массовая доля влаги, %	0,15	0,08	1,49	0,26
Насыпная плотность, г/дм^3	195,7	460,4	470,0	479,0
Прочность, %	36,4	43,9	62	58
pH водной вытяжки	5,5	6,2	6,8	5,2
Суммарная пористость по водопоглощению, см^3/г	2,20	0,82	0,65	0,82
Сорбционная активность по йоду, %	48,0	42,0	45,0	44,0
Сорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г	13,5	12,2	12,8	12,0

протекает на микропористых сорбентах, где молекулы йода из-за небольших размеров задерживаются в объеме микропор [16]. При модифицировании происходит разрушение стенок между порами, либо стенки между порами становятся тоньше. В результате этого поры увеличиваются в размерах.

Сорбционная активность сорбентов по метиленовому голубому коррелируется с мезопористой структурой. Молекулы метиленового голубого в силу своих размеров (линейный размер молекулы составляет 1,5 нм) более эффективно сорбируются объемом мезопор [17]. Повышение сорбционной активности по метиленовому голубому подтверждает увеличение количества мезопор (пор с размером от 2 до 50 нм), что является положительным фактором для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов, так как ионы металлов в воде имеют свойство гидратации [9]. Размер гидратированного иона больше обычного, поэтому гидратированный ион металла эффективнее сорбируется в объеме мезопор.

5. Основные результаты и выводы.

Исследованы физико-химические и сорбционные характеристики исходных углеродных сорбентов на основе древесного угля марки БАУ, на основе бурых углей марки АБУ и АБЗ, на основе каменного угля – КАД-йодный. Исходные материалы оказывают существенное влияние на формирование пористой структуры, химическое состояние поверхности, а также прочности сорбентов.

Выявлено, что с увеличением степени метаморфизма (углефикации) изменяется насыпная плотность и пористость углеродных сорбентов, причем чем меньше плотность, тем больше пористость сорбентов. Все сорбенты обладают развитой пористой структурой. Сорбционная активность по йоду и метиленовому голубому подтверждает наличие микро-мезопористой структуры сорбентов. Выявлено, что микропористая структура преобладает. Обнаружено, что механическая прочность сорбентов (АБУ и АБЗ) с одинаковой степенью метаморфизма значительно отличается. Полагаем, это связано с разными условиями их получения.

Для повышения сорбционной активности сорбентов проведено модифицирование методом окисления с использованием олеума и предварительной обработкой дихлорэтаном для разрыхления структур и раскрытия пор. У модифицированных сорбентов подтверждено значительное развитие пористой структуры с образованием мезопор, что открывает возможность применения модифицированных сорбентов для более эффективного извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов.

Целесообразность использования углеродных сорбентов определяется возможностью их регенерации и повторного использования. В процессе модифицирования произошло дальнейшее снижение механической прочности сорбентов на 15–25%. Низкая прочность способствует разрушению пористой структуры сорбента, вследствие чего сорбент будет мало эффективен для извлечения ионов металлов из растворов, это сорбент БАУ, но он пригоден для одноразового применения, прежде всего для очистки питьевой воды. Промышленный сорбент КАД-йодный по-прежнему востребован в обогащении и гидрометаллургии, но модифицирование сделает его более привлекательным для потребителей.

Комплексный анализ сорбционной активности исследуемых сорбентов, прежде всего суммарной пористости, активности по стандартным веществам показал, что наиболее эффективными будут сорбенты и их модифицированные образцы на основе бурых углей, с учетом механической прочности это сорбенты АБЗ и АБЗ-М. Следует отметить, что и с экономической точки зрения преимущество за сорбентами на основе бурых углей. Сорбент БАУ практически в 2 раза дороже КАД-йодного, который почти в 3 раза дороже сорбента АБЗ.

В дальнейших исследованиях будет уделено особое внимание качественным и количественным показателям наличия функциональных групп, удельной поверхности и решению проблемы прочности при модифицировании.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают возможность практического применения как исходных, так и модифицированных углеродных сорбентов. Модифицирование углеродных сорбентов позволяет существенно расширить их функциональные возможности. Полученные результаты позволяют говорить о перспективности сорбентов на основе ископаемых углей и их модификаций для использования в процессах извлечения тяжелых металлов и других ценных компонентов из различных растворов. Важнейшим преимуществом является чрезвычайно широкая сырьевая база таких сорбентов, что позволяет производить их практически в любом регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дементьева Н. А. Исследование технологии сорбционно-флотационного обогащения бедного золотосодержащего сырья: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2003. 152 с.

2. Kose C., Sonmez H. B. Enhancing oil-spill cleanup: The role of porogen on swelling characteristics of sorbents in environmental protection

// Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13, Iss. 5. 118745.

3. Apolloni F., Menegazzo F., Bittencourt C., Signorettoa M. Hazelnut shells and rice husks activated biochars for the adsorption of atrazine and terbuthylazine // Next Energy. April 2025. Vol. 7.

4. Alama Md. S., Cossio M., Robinson L., Wang X., Kenney J., Konhausera K. O., MacKenzied M. D., Yong Sik Ok, Alessia D. S. Removal of organic acids from water using biochar and petroleum coke // Environmental Technology & Innovation. November 2016. Vol. 6. Pp. 141–151.

5. Балмасов Н. Н., Бранчугов В. К., Быкадоров В. С. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России // Регионы и бассейны. Москва : Изд. Московского государственного горного университета, 1999. 448.

6. Abduakhytova D., Abdimomyn S., Atchabarova A., Mirzaeianb M., Tokpayev R., Mukanov A., Turdeanc G. L., Malchik F., Nauryzbayev M. Controlled electrochemical design of activated carbon surface chemistry: Enhanced copper recovery using functionalized walnut shell-derived sorbents // Journal of Water Process Engineering. August 2025. Vol. 76.

7. Лукьянов Н. В., Сыроежко А. М., Ицкович В. А., Славошевская Н. В. Гуминовые кислоты на основе окисленных бурых углей некоторых месторождений России и Монголии // Известия СПбГТИ. 2013. № 22 (48).

8. Крюкова В. Н., Латышева В. П., Белоногова Л. Н., Болондзь Ф. М., Вязова Н. Г., Малюгин М. С., Лобанова Г. Л. Исследование неорганических составляющих углей Канско-Ачинского бассейна // Исследование состава и свойств углей Восточной Сибири и продуктов их переработки. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 168 с.

9. Домрачева В. А. Извлечение металлов из сточных вод и техногенных образований: Монография. Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2006. 152 с.

10. Сурков А. А., Глушанкова И. С., Балабенко Н. А. Синтез углеродных сорбентов из отходов поликарбоната методом химической активации // Фундаментальные исследования. 2012. № 9–1. С. 171–175;

11. Дам Тхи Тхань Хай, Гоготов А. Ф., Каницкая Л. В., До Тьем Тай. Нитрозирование как способ модификации лигнина для получения эффективных ингибиторов полимеризации пироконденсатов // Вестник ИрГТУ. 2011. № 5 (52).

12. Веприкова Е. В., Иванов И. П., Чесноков Н. В., Кузнецов Б. Н. Структура и сорбционные свойства пористых углеродных сорбентов из коры осины // Химия растительного сырья. 2019. № 3.

13. Юркова И. Н. Модификация углеродных сорбентов наносеребром // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 2–1.

14. Wikströma J., Prabhakarad D. Pala, R., Forsbergab S. C., Renmanc A., Renmanc J. Aid, G., Gunnarssona J. S. Assessment of the calcium-silicate Polonite as a sorbent for thin-layer capping of metal contaminated sediment // Chemosphere. October 2024. Vol. 365.

15. Домрачева В.А., Вещева Е.Н. Модифицирование углеродных сорбентов для повышения эффективности извлечения тяжелых металлов из сточных вод и техногенных образований // Вестник ИрГТУ. 2010. № 4 (44).

16. Фарберова Е. А., Виноградова А. В., Шергина Е. С. Разработка модифицированного углеродного сорбента для обеззараживания воды // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2010. № 11.

17. Колышкин Д. А., Михайлова К. К. Активные угли: Справочник. под ред. Плаченова Т. Г. Л. : Химия, 1972. 56 с.

18. Способ получения сорбента: Патент 2508248 Россия, МПК C01B31/16; / Домрачева В. А., Вещева Е. Н., Трусова В. В., Гандандорж Ш., Шкаверо Е.Н. № 2012131961; Заявл. 2012.07.25; Опубл. 2014.02.27.

19. Райхардт К. Растворители и эффекты среды в органической химии. М. : Мир, 1991. 763 с.

20. Фиалков Ю. Я. Растворители как средство управления химическим процессом. Л. : Химия, 1990. 283 с.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Домрачева Валентина Андреевна, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), доктор технических наук, профессор, e-mail: domra@istu.edu

Раевская Ирина Дмитриевна, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), магистрант, e-mail: irinaraewska@yandex.ru

Синицын Илья Михайлович, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), магистрант, e-mail: sinicin010967@gmail.com

Заявленный вклад авторов:
Домрачева В.А. – постановка исследовательской цели, задач, обзор соответствующей литературы, написание текста, выводы.
Раевская И.Д. – проведение исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, обработка и обсуждение результатов эксперимента, написание текста.
Синицын И.М. – проведение исследования, сбор и анализ данных, обработка и обсуждение результатов эксперимента, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

RESEARCH OF CARBON SORBENTS AND THEIR MODIFIED SAMPLES

Domracheva Valentina Andreevna*, Raevskaya Irina Dmitrievna, Sinitsyn Ilya Michailovitch

Irkutsk National Research Technical University

* for correspondence: domra@istu.edu

Article info
Received:
09 February 2026

Accepted for publication:
15 June 2026

Accepted:
01 July 2026

Keywords: *carbon sorbents, modification, physicochemical characteristics, sorption characteristics, wastewater treatment from heavy metal, sulfonation*

Abstract.
The production, research, and application of sorbents based on fossil coals for the extraction of valuable components from wastewater and technogenic formations is relevant. This work presents a study of the sorption activity of carbon sorbents based on brown coal, bituminous coal, and wood coal, as well as their modified samples. Modification was carried out by sulfonation using oleum with a concentration of 20% sulfur trioxide. The sorption activity of the initial carbon sorbents and their modified samples was studied, demonstrating the influence of sulfonation on their structural and sorption characteristics. The physicochemical characteristics of the initial carbon sorbents and their modified samples were examined, primarily focusing on pore structure, sorption activity toward standard substances (iodine and methylene blue), mechanical strength, and others. The research results showed that after modification, the total porosity measured by water absorption increases from 0.5 to 0.8 cm³/g, the iodine sorption capacity decreases by 18 to 27%, while the methylene blue sorption capacity increases. These changes in parameters indicate an increase in the number of mesopores, which are more effective at sorbing metal ions from solutions.

For citation: Domracheva V.A., Raevskaya I.D., Sinitsyn I.M. Research of carbon sorbents and their modified samples. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):185-194. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-185-194, EDN: IGMUVB

REFERENCES

1. Dementieva N.A. Investigation of the Technology of Sorption-Flotation Enrichment of Low-Grade Gold-Bearing Raw Materials: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 2003. 152 p.

2. Kose C., Sonmez H.B. Enhancing oil-spill cleanup: The role of porogen on swelling characteristics of sorbents in environmental protection. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2025; 13(5):118745.

3. Apolloni F., Menegazzo F., Bittencourt C., Signorettoa M. Hazelnut shells and rice husks activated biochars for the adsorption of atrazine and terbuthylazine. *Next Energy.* 2025; 7.

4. Alama Md.S., Cossio M., Robinson L., Wang X., Kenney J., Konhausera K.O., MacKenzied M.D., Yong Sik Ok, Alessia D.S. Removal of organic acids from water using biochar and petroleum coke. *Environmental Technology & Innovation.* 2016; 6:141–151.

5. Balmasov N.N., Branchugov V.K., Bykadorov V.S. Mineral and natural resource base of the coal industry of Russia. Regions and coal fields. Moscow:

Publishing House of Moscow State Mining University; 1999. 448 p.

6. Abduakhytova D., Abdimomyn S., Atchabarova A., Mirzaeianb M., Tokpayev R., Mukanov A., Turdeanc G.L., Malchik F., Nauryzbayev M. Controlled electrochemical design of activated carbon surface chemistry: Enhanced copper recovery using functionalized walnut shell-derived sorbents. *Journal of Water Process Engineering.* 2025; 76.

7. Lukyanov N.V., Syroezhko A.M., Itskovich V.A., Slavoshevskaya N.V. Humic acids of oxidized brown coals from some coal fields of Russia and Mongolia. *Proceedings of SPbGTI.* 2013; 22(48).

8. Kryukova V.N., Latysheva V.P., Belonogova L.N., Bolondz F.M., Vyazova N.G., Malyugin M.S., Lobanova G.L. Study of Inorganic Components of Coals from the Kansk-Achinsk Basin. *Study of the Composition and Properties of Coals from Eastern Siberia and Their Processing Products.* Irkutsk: Irkutsk University Publishing House; 1986. 168 p.

9. Domracheva V.A. Extraction of Metals from Wastewater and Technogenic Formations: Monograph / V.A. Domracheva. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publishing House; 2006. 152 p.

10. Surkov A.A., Glushankova I.S., Balabenko N.A. Carbon sorbents synthesis from polycarbonate waste by chemical activation. *Fundamental Research.* 2012; 9–1:171–175.

11. Dam Thi Thanh Hai, Gogotov A.F., Kanitskaya L.V., Do Tiem Tai. Nitrosation as a Method for Modifying Lignin to Obtain Effective Pyrocondensate Polymerization Inhibitors. *Bulletin of Irkutsk State Technical University.* 2011; 5(52).

12. Veprikova E.V., Ivanov I.P., Chesnokov N.V., Kuznetsov B.N. Structure and sorption properties of porous carbon sorbents from aspen bark. *Chemistry of Plant Raw Materials.* 2019; 3.

13. Yurkova I.N. Modification of Carbon Sorbents with Nanosilver. *Current Problems of Humanities and Natural Sciences.* 2016; 2–1.

14. Wikströma J., Prabhakarad D., Pala R., Forsbergab S.C., Renmanc A., Renmanc J., Aid G., Gunnarssona J.S. Assessment of the calcium-silicate Polonite as a sorbent for thin-layer capping of metal-contaminated sediment. *Chemosphere.* 2024; 365.

15. Domracheva V.A., Veshcheva E.N. Modification of carbon sorbents to improve the efficiency of heavy metals extraction from sewage and technogeneous entities. *Bulletin of Irkutsk State Technical University.* 2010; 4(44).

16. Farberova E.A., Vinogradova A.V., Shergina E.S. Development of a modified carbon sorbent for water decontamination. *Bulletin of PNIPU. Chemical Technology and Biotechnology.* 2010; 11.

17. Kolyshkin D.A., Michailova K.K. Activated Carbons: Handbook. Edited by Plachenov T.G. Leningrad: Chemistry; 1972. 56 p.

18. Method for Producing a Sorbent: Patent 2508248 Russia, IPC C01B31/16; / Domracheva V.A., Vescheva E.N., Trusova V.V., Gandandorzh S., Shkavero E.N. № 2012131961; Filed 2012.07.25; Published 2014.02.27.

19. Reichardt K. Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publishers; 1991. 763 p.

20. Fialkov Y.Y. Solvents as a Means of Controlling a Chemical Process. Leningrad: Khimiya Publishers; 1990. 283 p.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Valentina A. Domracheva, Irkutsk National Research Technical University (664074, Russian Federation, Irkutsk, Lermontova St., 83), Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: domra@istu.edu

Irina D. Raevskaya, Irkutsk National Research Technical University (664074, Russian Federation, Irkutsk, Lermontova St., 83), Master's student, e-mail: irinaraewska@yandex.ru

Ilya M. Sinitsyn, Irkutsk National Research Technical University (664074, Russian Federation, Irkutsk, Lermontova St., 83), Master's student, e-mail: sinicin010967@gmail.com

Contribution of the authors:

Valentina A. Domracheva – formulation of the research problem, supervision of the study, conceptualization of research.

Irina D. Raevskaya – conducting the research; data collection and analysis, reviewing the relevant literature, processing of experimental results, drawing the conclusions, writing the text.

Ilya M. Sinitsyn – conducting the research, data collection and analysis, processing of experimental results, drawing the conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.