

УДК 544.723:628.3 © А.К. Горелкина✉, Е.С. Михайлова,  
И.В. Тимощук, С.А. Семенова, 2024

UDC 544.723:628.3 © A.K. Gorelkina✉, E.S. Mikhaylova,  
I.V. Timoshchuk, S.A. Semenova, 2024

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,  
650000, г. Кемерово, Россия  
✉ e-mail: alengora@yandex.ru

Kemerovo State University,  
650000, Kemerovo, Russian Federation  
✉ e-mail: alengora@yandex.ru

# Изменение структуры поверхности сорбентов\*

## Changing the surface structure of sorbents

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11S-46-52>

### ГОРЕЛКИНА А.К.

Доктор техн. наук, профессор кафедры  
техносферной безопасности Института  
инженерных технологий ФГБОУ ВО «Кемеровский  
государственный университет»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: alengora@yandex.ru

### МИХАЙЛОВА Е.С.

Канд. хим. наук, доцент кафедры  
техносферной безопасности  
Института инженерных технологий,  
директор Института НБКС технологий  
ФГБОУ ВО «Кемеровский  
государственный университет»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: e\_s\_mihaylova@mail.ru

### ТИМОЩУК И.В.

Доктор техн. наук, профессор кафедры  
техносферной безопасности Института  
инженерных технологий ФГБОУ ВО «Кемеровский  
государственный университет»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: irina\_190978@mail.ru

### СЕМЕНОВА С.А.

Канд. хим. наук, внештатный научный сотрудник  
Управления по реализации КНТП  
ФГБОУ ВО «Кемеровский  
государственный университет»,  
e-mail: semlight@mail.ru

Изучены параметры сорбционных материалов, отбирающихся по структуре, пористости, исходному сырью и способу получения, с целью выбора наиболее эффективного для извлечения из водных сред тяжелых металлов (ТМ), присутствующих в сточных водах промышленных предприятий. Проведенные исследования процесса извлечения ТМ в кинетических условиях из водных сред и применение известных моделей позволили предположить, что процесс извлечения имеет смешанный характер.

Изучены изменения физико-химических свойств поверхности сорбентов под влиянием сорбируемых компонентов.

**Ключевые слова:** сорбент Пуrolат-стандарт, кокосовый уголь, сорбция, тяжелые металлы цинк и медь.

**Для цитирования:** Изменение структуры поверхности сорбентов / А.К. Горелкина, Е.С. Михайлова, И.В. Тимощук и др. // Уголь. 2024;(11S): 46-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-46-52.

### Abstract

The parameters of peel-off sorption materials in terms of structure, porosity, raw materials and production method were studied in order to select the most effective for extracting heavy metals present in wastewater from industrial enterprises from aqueous media. The above studies of the process of extraction of heavy metals under kinetic conditions from aqueous media, and the use of well-known models, suggested that the extraction process is of a mixed nature.

Changes in the physicochemical properties of the surface of sorbents under the influence of sorbed components have been studied.

\* Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № соглашения 075-15-2022-1201 от 30.09.2022.



**Keywords**

*Sorbent Purolate-standard, sorption, coconut charcoal, heavy metals zinc and copper.*

**Acknowledgements**

The research is conducted as part of the comprehensive scientific and technical program of a complete innovative cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of minerals, ensuring of industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing of coal raw materials with consecutive amelioration of ecological impact on the environment and risks to human life", approved by the Decree of the Government of the Russian Federation from 11.05.2022 No1144-r, agreement No. 075-15-2022-1201 dated 30.09.2022

**For citation**

Gorelkina A.K., Mikhaylova E.S., Timoshchuk I.V., Semenova S.A. Changing the surface structure of sorbents. *Ugol*. 2024;(115):46-52. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-46-52.

**ВВЕДЕНИЕ**

Современные сорбционные процессы являются доминирующими в различных направлениях, таких как очистка водных растворов, получение ценных компонентов из различного сырья. Например, технологии доочистки питьевой воды в своей основе имеют сорбционный процесс с различной модификацией адсорберов [1] и сорбентов-наполнителей [2]. Очистка сточных вод перед сбросом в реки-приемники осуществляется в несколько этапов в зависимости от состава стоков, и одним из таких этапов является адсорбционное извлечение с использованием сорбентов различной природы.

Эффективность адсорбционного извлечения определяется сочетанием ряда параметров процесса, в том числе выбором материала, выступающего в качестве твердой неподвижной фазы, конструкцией и размером адсорберов [3], режимом подачи очищаемой воды, степенью очистки от конкретных загрязнителей и другим.

На сегодняшний день на мировом рынке известно около двух сотен различных поглотителей (сорбентов), которые используются для извлечения различных веществ из водных растворов. В качестве адсорбентов могут использоваться материалы на основе цеолитов, полимерных материалов, растительных компонентов различного происхождения (начиная от высушенных початков кукурузы, соломы, опилок до кокосовых отходов), природного угля и многофазные бионеорганические наноконпозиции.

Подбор наиболее эффективного сорбента для конкретных производственных условий наиболее целесообразно на первом этапе осуществлять в условиях лабораторных исследований, что поможет минимизировать риски, связанные с применением современных малоизученных материалов и поведением их в промышленных условиях, что в первую очередь решит задачу определения безопасно и рационального применения сорбентов для очистки.

Лабораторные исследования материалов направлены на изучение: сорбционной способности в различных условиях,

будь то статические, кинетические или динамические условия; механизмов взаимодействия извлекаемого вещества с поверхностью; изменения сорбента и его структуры при воздействии загрязнителей. Все исследования ложатся в основу рекомендаций по использованию сорбента в определенных производственных условиях. Исследования сорбентов в отношении компонентов чаще всего изучаются в широком интервале их концентраций, референтное содержание согласуется с допустимыми значениями согласно установленным санитарно-гигиеническим нормативам.

При рассмотрении уровня воздействия различных загрязнителей на живые системы нужно отметить группу тяжелых металлов, так как их накопление в водных объектах все больше и больше вызывает опасения, связанные с губительным воздействием на гидробионтов и канцерогенным эффектом в отношении организма человека [4, 5].

Целью исследований в данной работе стало изучение влияния сорбции ионов тяжелых металлов цинка и меди на изменение физико-химических свойств поверхности кокосового угля и активного угля марки Пуrolат-стандарт и изучение кинетики извлечения для характеристики процесса сорбции катионов на поверхности сорбентов.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В статических условиях материалы показали высокую сорбционную способность по отношению к металлам. Кинетика процесса извлечения изучалась в широком временном интервале. Модельные растворы смеси меди и цинка с концентрацией загрязнителей до 50 ПДК в динамических условиях были пропущены через лабораторные адсорберы, заполненные сорбентами Пуrolат-стандарт и кокосовый уголь.

Сорбенты Пуrolат-стандарт получены на основе угля марки антрацит с использованием одностадийного процесса карбонизации/активации воздухом, и кокосовый уголь получен на основе скорлупы кокосовых орехов путем ее дробления с последующим рассевом – имеют характеристики, представленные в *табл. 1*.

Структурные характеристики материалов-сорбентов, химию поверхности изучали на основании иллюстраций поверхности образцов – сорбентов, полученных методом сканирующей электронной микроскопии в режиме детектирования вторичных электронов, термический анализ осуществляли на приборе синхронного термического анализа STA 449 C Jupiter фирмы NETZSCH. Для установления величин удельной поверхности исследуемых образцов использовали метод азотной порометрии. Измерения изотерм адсорбции азота при 77 К проводили на автоматизированном приборе ASAP-2400 фирмы Micromeritics [6, 7, 8, 9]. Изучение механизма сорбционного извлечения в кинетических условиях основано на применении моделей псевдо-I порядка и псевдо-II порядка.

В основе псевдо-I модели Лагергрена лежит предположение, что в изменение скорости поглощения растворенного вещества за определенный период времени вносит вклад химическое взаимодействие, это обычно применимо на начальной стадии процесса адсорбции, когда адсорбция происходит за счет диффузии через границу раздела.

Таблица 1

**Характеристики сорбентов**  
Characteristics of sorbents

Марка АУ		Пуrolат-стандарт	Кокосовый уголь
Размер частиц, мм		0,1-3	0,4-1,7
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>		0,7-0,9	0,49
Прочность, %		90-95	98
Зольность, не более, %		5	6
Влагоемкость, %		90	92
Удельная поверхность пор (СБЭТ), м <sup>2</sup> /г		311	1512
Суммарный объем пор по воде, см <sup>3</sup> /г		0,500	0,951
Содержание активного кислорода, ммоль-экв/г	Кислотного типа общее (СОЕ ОН-)	0,238	0,344
	Фенольный -ОН	0,218	0,194
	Карбоксильный -СООН	-	0,090
	Лактонный -СООН	0,020	0,060
	Основного типа (СОЕ Н+)	0,120	0,778

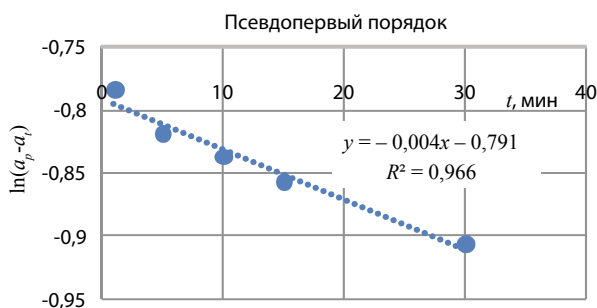
Преобразованная в линейный вид модель Лагергрена псевдо-I порядка может быть описана следующей формулой:

$$\ln(a_e - a_t) = \ln a_e - k_1 \cdot t,$$

где  $a_e$  и  $a_t$  (г/г) значения адсорбции в равновесии и в момент времени  $t$  соответственно;  $k_1$  – константа равновесной скорости в модели псевдопервого порядка (дм<sup>3</sup>/мин).

Учитывая, что псевдо-уравнение Лагергрена первого порядка применимо на начальной стадии извлечения, для описания всего диапазона времени адсорбции данная модель применима в частных случаях, обычно модель описывает первые 20-30 мин процесса адсорбции. Интеграция уравнения в координатах  $\ln(a_e - a_t) - t$  позволяет определить константу скорости адсорбции.

Кинетическая модель псевдо-II порядка основана на предположении, что ограничивающим скорость этапом является химическая сорбция или хемосорбция, и позволяет предположить поведение во всем временном диапазоне адсорбции [9].



Математически преобразованная модель кинетики псевдо-второго порядка в интегрированной форме имеет вид [10]:

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{k_2 a_e^2 + \frac{t}{a_e}},$$

где  $k_2$  – константа равновесной скорости модели псевдо-второго порядка (г/мг мин).

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Извлечение ионов ТМ из водного раствора в кинетических условиях представлено на примере ионов меди, рис. 1.

Для выявления лимитирующей стадии массопереноса и механизма диффузии получены данные по адсорбционному извлечению компонентов в кинетических условиях, обработанных с использованием кинетических моделей псевдо-I порядка и псевдо-II порядка [11, 12].

Моделирование процесса извлечения в кинетических условиях с использованием моделей псевдо-I и псевдо-II порядка позволяет предположить, что механизм адсорбции исследуемой системы представляет собой сочетание внешней и внутренней диффузионной кинетики, т.е. имеет смешанно-диффузионный характер. При сравнении результатов моделирования ( $R^2$ ) нужно отметить, что наиболее точное описание дает модель псевдо-II порядка.

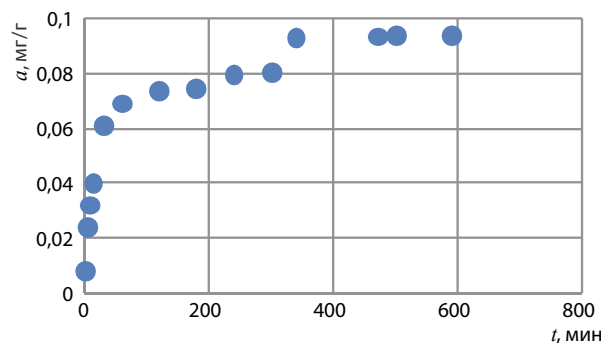


Рис. 1. Экспериментальная кривая процесса извлечения ионов меди в кинетических условиях сорбентом кокосовый уголь

Fig. 1. Experimental curve of the copper ion extraction process under kinetic conditions with a coconut charcoal sorbent

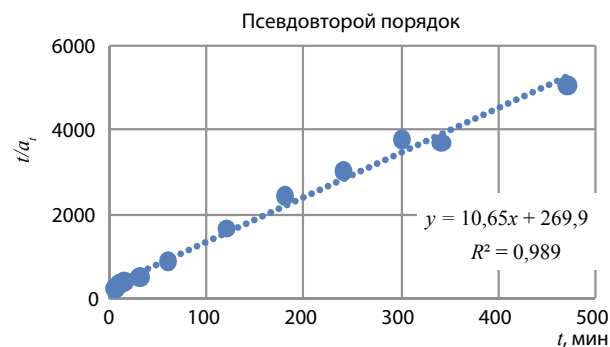


Рис. 2. Описание кинетики адсорбции Си в координатах моделей псевдо-I порядка и псевдо-II порядка

Fig. 2. Description of the kinetics of Sg adsorption in the coordinates of the pseudo-I-order and pseudo-II-order models

Таблица 2

**Относительные атомные концентрации элементов в приповерхностном слое исследованных образцов сорбента КАУ**

Relative atomic concentrations of elements in the near-surface layer of the studied samples of the KAU sorbent

Образец	Разложение спектра C1s, %				Разложение спектра O1s, %		
	C=C, 284,4 эВ	C-O, 286,0 эВ	C=O, 287,6 эВ	COOH, 289,0 эВ	C=O, 532,3 эВ	COOH, 534,5 эВ	Оксиды металлов, 530,2 эВ
КАУ исходный	60	34	0	5	68	28	2
КАУ после сорбции ионов ТМ	66	29	0	5	–	–	–

Таблица 3

**Результаты термогравиметрического анализа образцов сорбента КАУ до и после сорбции различных ионов, проведенного в окислительной атмосфере**

Results of thermogravimetric analysis of KAU sorbent samples before and after sorption of various ions conducted in an oxidizing atmosphere

Образец КАУ	T <sub>н</sub> , °C	T <sub>в</sub> , °C	ΔT, °C	T <sub>max</sub> , °C	V <sub>max</sub> , %/мин	Δm, мас. %, при температурах, °C				
						25-150	150-300	T <sub>н</sub> – T <sub>в</sub>	T <sub>в</sub> – 1000	150-1000
Исходный	490	605	115	724	0,88	0,78	0,30	3,40	31,02	35,11
После сорбции ионов ТМ	540	712	107	691	3,25	1,62	0,67	35,68	54,82	93,55

Таблица 4

**Значения текстурных характеристик для образцов кокосового угля по данным адсорбции N2 при 77 К**

Values of textural characteristics for coconut charcoal samples according to N<sub>2</sub> adsorption data at 77 K

Образец	a <sub>γ</sub> , м <sub>2</sub> /г	C <sub>БЭТ</sub>	a <sub>мезо</sub> , м <sup>2</sup> /г	V <sub>микро</sub> , см <sup>3</sup> /г	V <sub>сумм</sub> , см <sup>3</sup> /г
Кокосовый уголь исходный	276	481	14	0,105	0,121
Кокосовый уголь после адсорбции ионов цинка и меди	151	1448	–	0,06	0,069

По данным ИК-спектроскопии, для образца кокосового угля после сорбции ионов цинка и меди изменение спектральной картины выражено достаточно ярко. Отмечается существенное повышение интенсивности полос поглощения (ПП) в области 910-1040 см<sup>-1</sup>, которые можно отнести к колебаниям циклических эфиров, в том числе лактонов, а также в области поглощения карбонилсодержащих (кетонных или хинонных) ароматических структур при 2110 и 1510-1570 см<sup>-1</sup>. Наблюдается увеличение ПП при 1680 и 1440-1480 см<sup>-1</sup>, соответствующих колебаниям солей карбоновых кислот.

Изменение степени замещения в ароматических циклах фиксируется по более выраженному поглощению СН-ароматических групп при 3040 см<sup>-1</sup> и перераспределению и увеличению интенсивности ПП в области 680-870 см<sup>-1</sup>. Указанные изменения коррелируют с данными РФЭС, согласно которым существенно возрастают относительные атомные концентрации С=C-ароматических групп при 284,4 эВ (табл. 2).

Валентные колебания связей металл-кислород проявляются в основном в длинноволновой области ИК-спектра поглощения. В области частот 300-400 см<sup>-1</sup> обнаружены полосы в спектре комплекса меди (II) при ~ 334 см<sup>-1</sup>, комплекса цинка (II) при 320 см<sup>-1</sup>.

Данные термогравиметрического анализа образцов сорбента кокосовый уголь представлены в табл. 3.

Образец после сорбции ТМ почти полностью (94%) выгорает в условиях окислительного термолитиза. Интенсивность горения в 3,7 раза превосходит показатели для исходного сорбента. Изменение характера терморазложе-

ния использованного в сорбции ТМ образца кокосового угля начинается при достижении температуры начала окислительной деструкции (540°C). Возможно, на нетипичность процесса термоокислительной деструкции оказало влияние каталитическое воздействие на углеродное вещество сорбента соединений цинка и/или меди, адсорбированных на поверхности материала.

Анализ результатов сканирующей электронной микроскопии (рис. 3) и данных порометрии (табл. 4) согласуется с данными ТГА. Анализ результатов порометрии свидетельствует, что осаждение сорбируемых ионов осуществляется за счет участия микро- и мезопор, вследствие этого отмечается снижение объемов пор и удельной поверхности в целом.

Морфология поверхности сорбента принципиально изменяется. В результате адсорбции ТМ нивелируется ячеистая текстура поверхности. Отверстия макропор заполнены продуктами адсорбции ТМ. Видимых отверстий пор микронного размера на поверхности образца кокосового угля после сорбции ионов цинка и меди не обнаруживается (см. рис. 3).

Принципиальным отличием спектра сорбента Пуrolат-стандарт после сорбции ионов ТМ является существенное повышение ПП в области 900-1050 см<sup>-1</sup> и 590 см<sup>-1</sup>, отвечающих за колебания солей и металл-кислородных связей. На возможность образования солей металлов указывает повышение ПП при 1440, 1520 см<sup>-1</sup>. Уменьшаются интенсивности ПП ОН-групп при 3200-3400 см<sup>-1</sup>, возможно, за счет участия протона водорода в реакциях ионного обмена с катионами металлов. Группа ПП С-О-групп при 1100-1240 см<sup>-1</sup>



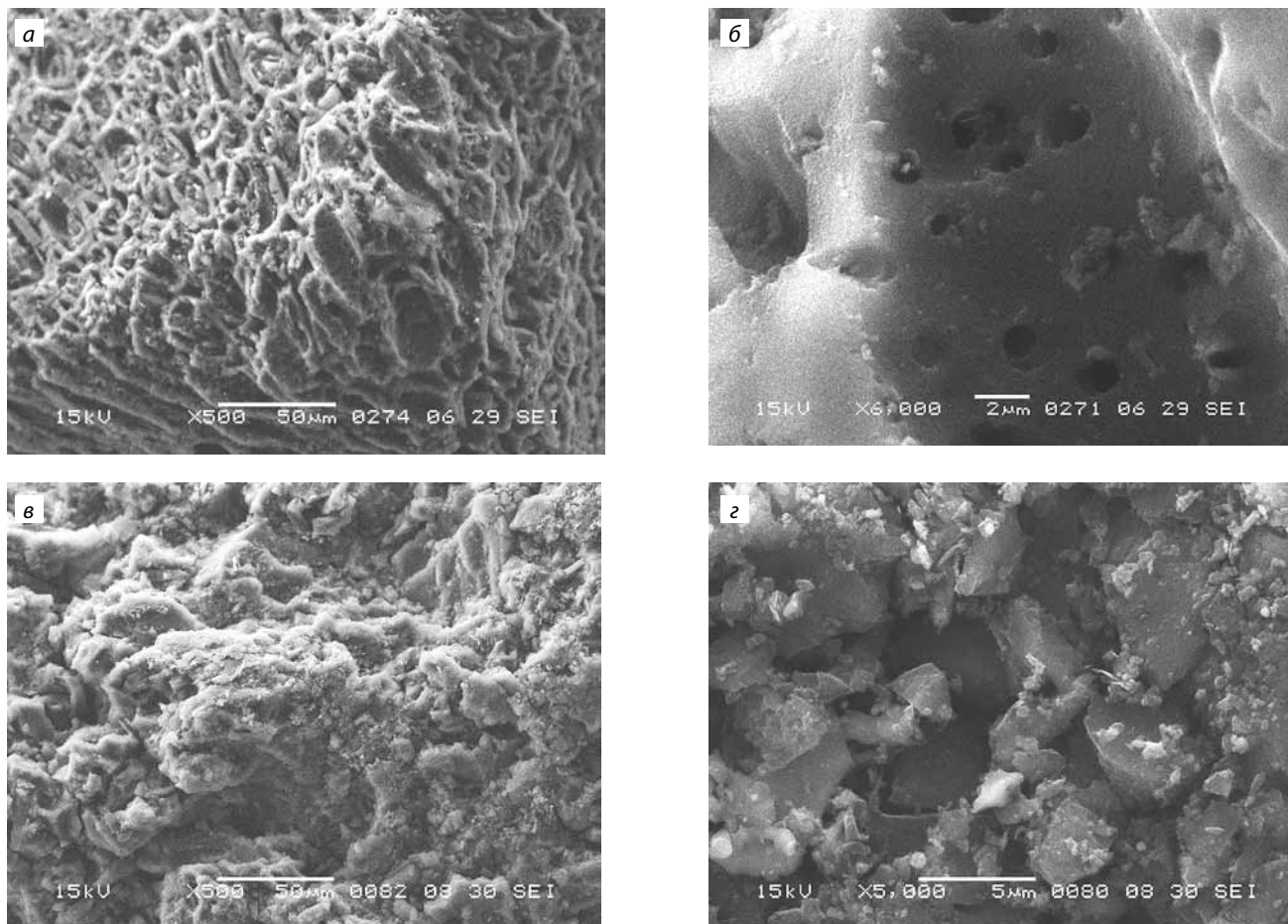


Рис. 3. Изображения пористой структуры сорбента кокосовый уголь: исходного (а, б), после адсорбции смеси ионов цинка и меди (в, г)  
 Fig 3. Images of the porous structure of the coconut charcoal sorbent: initial (a, b), after adsorption of a mixture of zinc and copper ions (v, g)

сдвигается с повышением интенсивности в длинноволновую область, что может означать наличие связи О-Ме. Понижение интенсивности ПП СН-ароматических групп при 3040, 780, 870 см<sup>-1</sup> коррелирует с уменьшением относительных атомных концентраций С=С-ароматических групп при 284,4 эВ, по данным РФЭС (табл. 5).

Данные термогравиметрического анализа образцов сорбента Пуролат представлены в табл. 6.

Ход процесса термодеструкции сорбента Пуролат после сорбции ионов тяжелых металлов принципиально не отличается от поведения кокосового угля после сорбции ТМ. Образец Пуролата после сорбции ТМ также почти полностью (93%) выгорает в условиях окислительного

термолиза. Интенсивность горения в 3,6 раза превосходит показатели для исходного сорбента Пуролат. Изменение характера терморазложения использованного в сорбции ТМ-образца начинается при достижении температуры начала окислительной деструкции (550°С). Возможно, как и с образцом кокосового угля, на изменение процесса термоокислительной деструкции оказало влияние каталитическое воздействие соединений цинка и/или меди.

Анализ результатов сканирующей электронной микроскопии и данных порометрии (табл. 7) показывает, что сорбент Пуролат не обладает высокой пористостью. В результате адсорбции ионов ТМ отмечается уменьшение удельной поверхности сорбента.

Таблица 5

**Относительные атомные концентрации элементов в приповерхностном слое исследованных образцов**

Relative atomic concentrations of elements in the near-surface layer of the studied samples

Образец	Разложение спектра C1s, %				Разложение спектра O1s, %		
	C = C, 284,4 эВ	C-O, 286,0 эВ	C = O, 287,6 эВ	COOH, 289,0 эВ	C = O, 532,3 эВ	COOH, 534,5 эВ	Оксиды металлов, 530,2 эВ
Пулолат-стандарт исходный	74	22	0	4	78	18	4
Пулолат-стандарт после адсорбции тяжелых металлов Zn, Cu	69	27	0	4	-	-	-

Таблица 6

**Результаты термогравиметрического анализа образцов сорбента Пуролат-стандарт до и после сорбции различных ионов, проведенного в окислительной атмосфере**

The results of thermogravimetric analysis of samples of the sorbent Purolate-standard before and after sorption of various ions conducted in an oxidizing atmosphere

Образец Пуrolата	$T_{н}, ^\circ\text{C}$	$T_{в}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_{max}, ^\circ\text{C}$	$V_{max}, \%$ /мин	$\Delta m, \text{мас. \%}$ , при температурах, $^\circ\text{C}$				
						25-150	150-250	$T_{н} - T_{в}$	$T_{в} - 1000$	150-1000
Исходный	495	679	184	548	0,23	1,97	0,97	7,48	25,48	34,75
				692	0,88					
После сорбции ТМ	550	810	260	727	3,18	2,58	0,91	61,80	29,61	93,03

Частицы ТМ равномерно распределены по поверхности сорбента. Большая плотность покрытия сорбированными частицами ТМ наблюдается на более шероховатой поверхности, что указывает на предпочтительную адсорбцию ионов на участках неоднородностей электронной плотности – острых гранях, сколах, выступах поверхности (рис. 4).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Приведенные исследования процесса извлечения ТМ в кинетических условиях из водных сред, и применение известных моделей позволили предположить, что процесс извлечения имеет смешанный характер.

Таблица 7

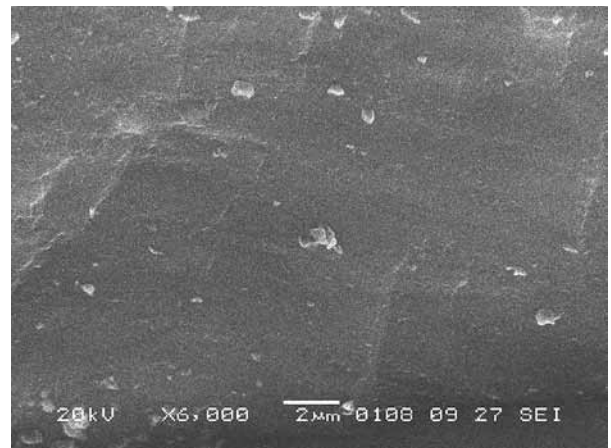
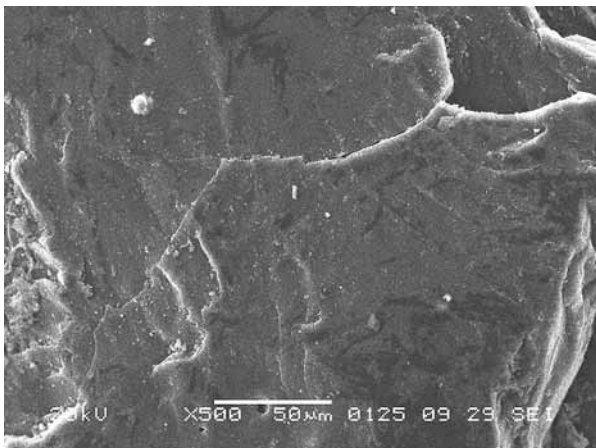
**Значения удельной поверхности сорбента Пуролат по данным адсорбции  $\text{N}_2$  при 77 К**

The values of the specific surface of the sorbent Purolate according to  $\text{N}_2$  adsorption data at 77 K

Образец	$a_s, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{БЭТ}$
Пуrolат-стандарт исходный	0,5	237
Пуrolат-стандарт после адсорбции тяжелых металлов Zn, Cu	0,2	–

Изучены изменения физико-химических свойств поверхности сорбентов под влиянием сорбируемых компонентов.

а



б

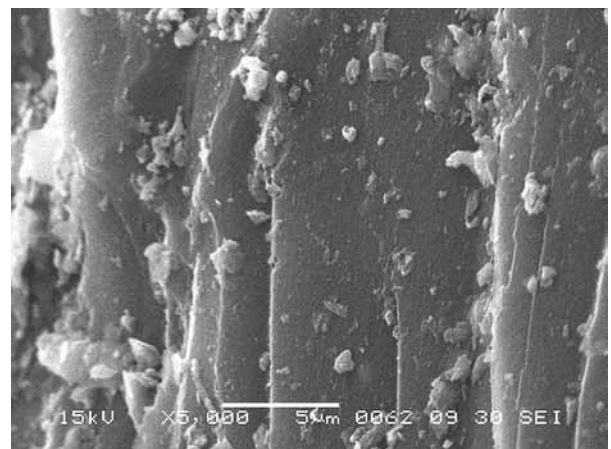
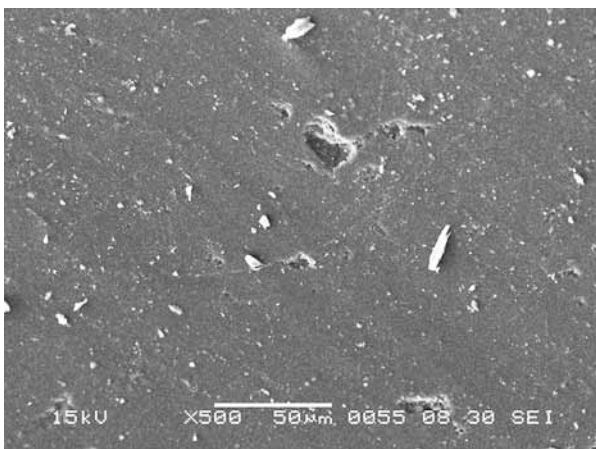


Рис. 4. Изображения поверхности сорбента Пуролат-стандарт до (а) и после (б) адсорбции ионов цинка и меди

Fig. 4. Images of the surface of the sorbent Purolate-standard before (a) and after (b) adsorption of zinc and copper ions



Так, на образцах кокосового угля осаждение сорбируемых ионов осуществляется за счет участия микро- и мезопор, вследствие этого отмечается снижение объемов пор и удельной поверхности в целом. В результате адсорбции ТМ, судя по снимкам, отверстия макропор заполнены продуктами адсорбции ТМ, и видимых отверстий пор микронного размера на поверхности образца кокосового угля после сорбции ионов цинка и меди не обнаруживается.

Извлечение контаминантов на образцах сорбента марки Пуrolат-стандарт возможно за счет участия протона водорода в реакциях ионного обмена с катионами металлов, а также образования связи О-Ме.

Сорбент Пуrolат, по данным исследования, не обладает высокой пористостью, а в результате адсорбции ионов ТМ отмечается уменьшение удельной поверхности сорбента за счет равномерного распределения по поверхности сорбента частицы ТМ. Большая плотность покрытия сорбированными частицами ТМ наблюдается на более шероховатой поверхности, что указывает на предпочтительную адсорбцию ионов на участках неоднородностей электронной плотности – острых гранях, сколах, выступах поверхности.

Нетипичность процесса термоокислительной деструкции для всех исследуемых марок после адсорбции тяжелых металлов обусловлена каталитическим воздействием на углеродное вещество сорбентов соединений цинка и/или меди, адсорбированных на поверхности материала.

#### Список литературы • References

1. Корчагина Т.В., Степанов Ю.А., Бурмин Л.Н. Метод оценки экологических показателей воздействия на окружающую среду в районах размещения угольных предприятий // Уголь. 2018. № 8. С. 119-123. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123.  
Korchagina T.V., Stepanov Yu.A., Burmin L.N. Method of environmental impact indicators assessment within coal enterprises footprint. *Ugol'*. 2018;(8):119-123. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123.
2. Доклад «О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2021 году».
3. Перенос загрязняющих веществ при фильтрации сточных карьерных вод во вскрышных породах / М.А. Тюленев, С.Ю. Лукьянова, А.В. Папин и др. // Вестник КузГТУ. 2011. № 2. С. 22-30.  
Tyulenev M.A., Lukyanova S.Yu., Papin A.V., Makarevich E.A. Transfer of pollutants during filtration of waste quarry waters in overburden rocks. *Vestnik KuzGTU*. 2011;(2):22-30 (In Russ.).
4. Оценка возможности использования отходов производства при разработке мероприятий по иммобилизации тяжелых металлов / Н.Ю. Антонинова, Л.А. Шубина, К.В. Шепель и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5. С. 46-55. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-51-0-46.  
Antoninova N.Yu., Shubina L.A., Shepel K.V., Sobenin A.V., Usmanov A.I. Assessment of the possibility of using industrial waste in the development of measures for the immobilization of heavy metals. *Gornyy informatsionno-analyticheskij byulleten'*. 2022;(5):46-55. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-51-0-46.
5. Алексеев Е.В. Теоретические аспекты технологии очистки сточных вод с использованием осадка // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 270-273.  
Alekseev E.V. Theoretical aspects of wastewater treatment technology using sludge. *Vestnik MGSU*. 2011;(8):270-273. (In Russ.).
6. Краснова Т., Горелкина А., Кирсанов М. Использование адсорбции для снижения загрязнения водных ресурсов // Экология и промышленность России. 2018. № 1(22). С. 44-49. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-44-49.  
Krasnova T., Gorelkina A., Kirsanov M. The use of adsorption to reduce pollution of water resources. *Ecologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018;22(1):44-49. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-44-49.
7. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *J. Coll. Inter. Sci.* 2004;(276):47-62.
8. Анурова С.А. Кинетика адсорбции автомобильных расходных жидкостей из водной среды // Вода: химия и экология. 2012. № 6. С. 70-75.  
Anurova S.A. Kinetics of adsorption of automotive consumables from an aqueous medium. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2012;(6):70-75. (In Russ.).
9. Radovic L.R., Silva I.F., Ume J.I. An experimental and theoretical study of the adsorption of aromatic possessing electron-withdrawing and electron-donating functional groups by chemically modified activated carbons. *Carbon*. 1997;35(9):1339-1348. DOI: 10.1016/S0008-6223(97)00072-9.
10. Podkościelny P., Nieszpore K. Adsorption of phenols from aqueous solutions: Equilibria, calorimetry and kinetics of adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011;354(1):282-291. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.10.034
11. Gnanaselvan Gnanasekaran Arthanareeswaran G. Young Sun Mok 20. A high-flux metal-organic framework membrane (PSF/MIL-100 (Fe)) for the removal of microplastics adsorbing dye contaminants from textile wastewater. *Separation and Purification Technology*. 2021;(77):119655. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119655/.
12. Xiaoling Ma, Wenlong Wang, Chenggong Sun, Hui Li, Jing Sun, Xin Liu. Adsorption performance and kinetic study of hierarchical porous Fe-based MOFs for toluene removal // Science of the Total Environment Volume 793, 1 November 2021, 148622. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148622.

#### Authors Information

**Gorelkina A.K.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: alengora@yandex.ru

**Mikhaylova E.S.** – PhD (Chemical), Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Director of the NBKS Institute of Technology, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: e\_s\_mihaylova@mail.ru

**Timoshchuk I.V.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: irina\_190978@mail.ru

**Semenova S.A.** – PhD (Chemical), Leading Researcher of the Department for the Implementation of a Comprehensive Scientific and Technical Program, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: semlight@mail.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

#### Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024