

УДК 544.723

## ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ CU (II) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КОМПОЗИЦИОННЫМ СОРБЕНТОМ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**В. А. Горбунова<sup>1</sup>, Л. М. Слепнева<sup>2</sup>, А. О. Черная<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> К. х. н., доцент кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ecology@bntu.by

<sup>2</sup> К. х. н., доцент кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>3</sup> Аспирант кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

### Реферат

Синтезированы образцы термически модифицированного при разных температурах композиционного сорбента на основе крупнотоннажных карбонат- и силикатсодержащих техногенных отходов. Определены значения статической сорбционной емкости этих материалов по ионам Cu(II), при этом получены кинетические зависимости сорбции катионов меди из модельных водных растворов CuSO<sub>4</sub>. В исследованном диапазоне температуры обработки и дисперсности образцов сорбционная емкость по ионам Cu(II) составила 4,0–12,5 мг/г. Максимальная скорость сорбции, по оценочным данным, достигается в первые 30 минут процесса взаимодействия с раствором. Максимальную статическую сорбционную емкость по ионам меди показал образец сорбента с дисперсностью частиц менее 1 мм, прокаленный при 973 К, и с предварительной щелочной активацией силикатной составляющей использованного сорбционного материала.

**Ключевые слова:** отходы, карбонат кальция, силикат кальция, сорбент, сорбционная емкость, катионы меди.

## REMOVAL OF CU (II) IONS FROM WATER SOLUTIONS BY COMPOSITIONAL SORBENTS FROM TECHNOGENIC MATERIALS

**V. A. Gorbunova, L. M. Slepneva, A. O. Chernaya**

### Abstract

The samples of composite sorbent thermally modified at different temperatures, obtained on the basis of large-tonnage carbonate- and silicate-containing technogenic waste, were synthesized. The values of static sorption capacity of these materials for Cu(II) ions were determined, and the kinetic dependences for copper cations' sorption from model aqueous solutions of CuSO<sub>4</sub> were obtained. For the studied interval of processing temperature and sample particle sizes, the sorption capacity for Cu(II) ions was in the 4.6–12.6 mg/g range. The maximum sorption rate, according to estimated data, was achieved in the first 30 minutes of the interaction with the solution. The maximal static sorption capacity for copper ions was shown by a sorbent sample with a particle size of less than 1 mm, calcined at 973 K, and with preliminary alkaline activation of the silicate component of the used sorption material.

**Keywords:** waste, calcium carbonate, calcium silicate, sorbent, sorption capacity, copper cations.

### Введение

В результате хозяйственной деятельности промышленных предприятий (горнодобывающих, машиностроительных, приборостроительных) образуются содержащие ионы тяжелых металлов (ТМ) технологические сточные воды, которые обязательно подвергаются обработке с целью исключить попадание токсичных металлов в окружающую среду. Для извлечения ТМ из сточных вод применяются различные методы и подходы. При выборе способа очистки учитываются такие факторы, как тип производства, объемы стоков, концентрация и вид катионов ТМ, затраты на реализацию. Чаще всего используются реагентные, электрохимические, ионообменные, сорбционные методы очистки, обладающие как своими преимуществами, так и недостатками. Для более глубокой очистки промстоков от ТМ часто используют комбинированные способы очистки (реагентный + сорбционный, электрокоагуляция + наночистота и др.). Эффективность сорбционной очистки от ионов ТМ в значительной степени определяется выбором подходящего сорбционного материала, его происхождением (природный, синтетический, техногенный отход), стоимостью, эксплуатационными характеристиками, условиями регенерации и/или утилизации. Использование недорогих доступных природных материалов, а также различных отходов и вторичных продуктов производства минерального, органического и органоминерального происхождения является экономически более выгодным и целесообразным. Адсорбционный массоперенос – это процесс, при котором ионы ТМ переходят из жидкой фазы на поверхность твердого сорбента и связываются либо вандерваальсовыми силами (физическая адсорбция) или за счет химического взаимодействия образуют с различными функциональными группами сорбента труднорастворимые и/или координационные соединения (хемосорбция). Наибольшей сорбционной способностью среди природных материалов обладают различные глинистые

алюмосиликатные породы, оксиды алюминия, железа, марганца, карбонатные минералы также могут участвовать в поглощении ионов ТМ, образуя труднорастворимые соли и гидроксиды. Эффективные сорбенты, изготовленные на основе побочных промышленных продуктов и отходов, помимо решения проблем очистки воды, способствуют утилизации многочисленных и часто крупнотоннажных отходов, снижая тем самым экологическую нагрузку на окружающую среду.

### Композиционный силикатно-карбонатный сорбент, получение, сорбция ионов меди

Минеральные отходы промышленности (строительной, энергетической, горнодобывающей, металлургической) делятся на карбонатные, силикатные, известковые, железистые, гипсовые, щелоче-содержащие, часто они по своему составу близки к природному карбонат- и силикатсодержащему сырью. Возможности использования различных кальций- и кремнийсодержащих отходов в качестве вторичных ресурсов для получения разнообразных полезных продуктов, в том числе и сорбентов ионов ТМ, отражены в работе [1]. Среди минеральных сорбентов (природных и синтетических) с кристаллическим строением максимальной сорбцией по отношению к катионам ТМ обладают цеолиты, затем идут основные соли ТМ и потом разнообразные глинистые материалы. Кроме этого установлено, что сорбционная способность природных минералов (кварца, глины), содержащих соединения железа, выше, чем без них [2].

Научные публикации по сорбционной очистке промышленных сточных вод от ТМ, в том числе и от Cu (II), обширны и разнообразны [3–9]. Так, в работе [10] представлены результаты изучения кинетики сорбции ионов меди и эффективности очистки глинистыми материалами на основе монтмориллонита, максимальная сорбционная емкость по ионам Cu(II) составила 0,8–1 мг/г, сорбция катионов

меди диатомитом в зависимости от температуры варьировалась 0,77 – 1 мг/г. Анализ научно-технической информации по данной теме показал [11–13], что в качестве сорбентов ионов ТМ изучаются и уже успешно применяются сорбенты на карбонат- и силикатсодержащих природных минералах (известняк, доломит, мрамор и др.), а также подобных отходах, в кристаллических решетках которых катионы ТМ замещают ионы  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ . Минеральные строительные отходы, содержащие  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Ca(Mg)SiO_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaSO_4$ , могут активно связывать ионы ТМ в труднорастворимые соли и основания. Максимальная сорбционная емкость материала на основе бетонной крошки [14] по ионам меди составила 20,43 мг/г, механизм связывания меди – хемосорбция, на поверхности бетонных частиц образуется слой труднорастворимых основных солей меди. Многочисленные исследования минеральных сорбентов природного и синтетического происхождения показывают, что, несмотря на термостабильность и радиационную стойкость, селективность к ионам ТМ, эти материалы часто имеют неудовлетворительные эксплуатационные характеристики (механические, гидродинамические, кинетические). Современные научно-практические исследования в области очистки воды от тяжелых металлов указывают на возросший интерес к композиционным (модифицированным) сорбентам неорганической, органической или смешанной природы. В многочисленных работах [15] показано, что именно сложные композиции различных веществ позволяют получать сорбционные материалы, сочетающие в себе высокую сорбционную емкость, селективность к ионам ТМ и удовлетворительные эксплуатационные характеристики. Среди таких сложных материалов стоит отметить композиции на основе модифицированных глинистых материалов, фосфат-, карбонатсодержащие сорбенты на минеральной основе с органическими модификаторами, серосодержащие органоминеральные сорбенты, модифицированные силикаты, а также сорбенты с активной нанодисперсной оксидной и гидроксидной фазой и др. [16]. Благодаря достижениям хемоинформатики все чаще используется моделирование процессов сорбционной очистки и целенаправленный дизайн композиционных (модифицированных) сорбентов. Модифицирован-

ные нанокomпозитные углеродные нанотрубки с высокой удельной поверхностью имеют емкость по  $Cu(II)$  – 40–47 мг/г [17]. Композиционный сорбент на основе шлама содового производства ( $CaCO_3$ ,  $Ca(OH)_2$ ) [18] обладает значительной сорбционной емкостью по  $Cu(II)$  – 35 мг/г. В данной работе на основе отходного карбонатсодержащего шлама разработан гранулированный сорбент с высокой прочностью на истирание за счет использования в качестве вяжущего жидкого стекла. Композиционный органоминеральный магнитный сорбционный материал на основе ферритизированного гальваношлама, терморасширенного графена и хитозана показал максимальную сорбционную емкость по  $Cu(II)$  – 6,9 ммоль/г. [19].

**Цель работы:** оценить возможность получения композиционного силикатного сорбента из крупнотоннажных отходов: карбонатного шлама водоподготовки ТЭЦ и мелкодисперсного (менее 20 мкм) гранитного отсева; получить твердофазным взаимодействием в трех режимах образцы композиционного карбонат-силикатного сорбента и изучить способность этого материала к сорбции ионов меди из модельных водных растворов сульфата меди.

Мелкодисперсный шлам водоподготовки (ТЭЦ 4, г. Минск) содержит в основном  $Ca(Mg)CO_3$  – 80–82 мас. % и  $Fe_2O_3$  – 10–15 мас. %. Гранитный мелкий отсев (гранитная пыль) образуется в больших объемах при добыче и переработке гранита, его состав зависит от месторождения, нами использовался отсев РУП «Гранит» (г. Микашевичи), основные компоненты:  $SiO_2$  – 60–62 %,  $Al_2O_3$  – 10–15 %,  $Fe_2O_3$  – 10–15 %, кроме этого небольшие количества  $FeO$ ,  $K_2O$ ,  $MnO_2$ ,  $TiO_2$ .

Был выполнен предварительный термодинамический анализ на базе программы моделирования термодинамики многокомпонентных систем ТЕРРА (разработки МГТУ им. Баумана) [20] для смеси карбонатный шлам / гранитный отсев 1:1 по массе в температурном диапазоне 300–1300 К (рисунок 1). Оценочный состав композита в молях на кг композита при разных температурах представлен в таблице 1.

В мелкодисперсной твердофазной системе начиная с 550 К возможно образование силикатов магния и кальция по реакции  $Ca(Mg)CO_3 + SiO_2 = Ca(Mg)SiO_3 + CO_2$ .

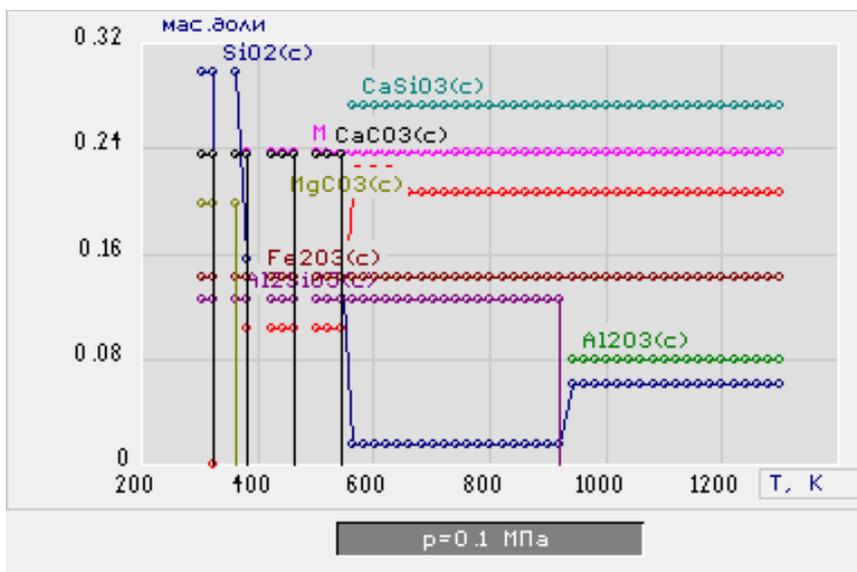


Рисунок 1 – Расчетная зависимость термодинамически равновесного компонентного состава от температуры (диапазоне 300–1300 К) для смеси карбонатный шлам + гранитный отсев при соотношении 1:1 по массе

Таблица 1 – Расчетный термодинамически равновесный состав карбонат-силикатной смеси

Основные фазы в расчетной термодинамической системе, моль/кг реакционной смеси									
Температура	$CO_2$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Al_2SiO_5$	$Fe_2O_3$	$MgSiO_3$	$CaSiO_3$	$CaCO_3$	$MgCO_3$
550 К	2,35	2,59	–	0,778	0,894	2,30	–	2,35	–
600 К	4,7	0,24	–	0,778	0,894	2,30	2,35	–	–
800 К	4,7	0,24	–	0,778	0,894	2,30	2,35	–	–
1000 К	4,7	1,018	0,778	–	0,894	2,30	2,35	–	–

Термодинамические расчеты показали, что при термообработке исходной смеси можно получить композиционный силикатный материал, содержащие силикаты кальция и магния до 70 %, а также некоторое количество  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , алюмосиликата, некоторое количество карбонатной фазы. С 500 К в системе возможно выделение  $CO_2$ , что при выборе оптимального массового соотношения по исходным компонентам и режима термообработки будет способствовать поризации сорбционного композита и увеличению удельной поверхности материала, доступной для связывания катионов меди.

**Технология получения композиционного силикатного сорбента:** карбонатный шлам и гранитный отсев смешивали по массе 1:1 в ступке, механически смесь активировали тщательным перетиранием с добавлением в качестве связующего 3–4 мас. % жидкого стекла. Один образец сорбента получали из гранитного отсева, прошедшего предварительную активацию в растворе NaOH при температуре 60 °C в течение 30 минут. Щелочная активация приводит к подтраиванию и поверхностной аморфизации минеральных гранитных частиц за счет выщелачивания из кристаллической решетки оксида алюминия и оксида кремния, которые, накапливаясь в растворе, могут образовать в дальнейшем на поверхности частиц гранита гидроалюмосиликаты натрия. Гранулирование проводили либо окатыванием смеси в ступке, либо перетертую пластичную массу пропускали через мелкоячеистое сито. Гранулы сорбента сушили на воздухе в течение суток, затем образцы сорбента термообработывали при температурах 300 °C, 500 °C, 700 °C в течение 1 часа. После прокаливания образцы сортировали на две фракции по дисперсности гранул – до 1 мм и 1–5 мм. Остаточное содержание в сорбенте карбонатов оценивали по выделению  $CO_2$  при взаимодействии материала с раствором HCl. Все образцы сорбента содержали остаточное количество карбонатной фазы, минимальное ее содержание 7–8 % присутствовало в образце, термообработанном при 700 °C. Таким образом, можно предположить, что синтезированный сорбент, по-видимому, представляет силикатно-карбонатный композит, содержащий некоторое количество  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , алюмосиликата.

Сорбцию ионов  $Cu(II)$  изучали на модельном растворе  $CuSO_4$  с концентрацией меди 300 мг/л и pH = 4,5–5 в статических условиях. Образцы сорбента заливали модельным раствором сульфата меди в соотношении 1:100, пробы на анализ отбирали каждые 30 минут до момента достижения равновесия, концентрацию катионов меди определяли йодометрическим методом. Рассчитывали адсорбцию в мг/г сорбента (таблица 2), кинетические зависимости представлены на рисунке 2.

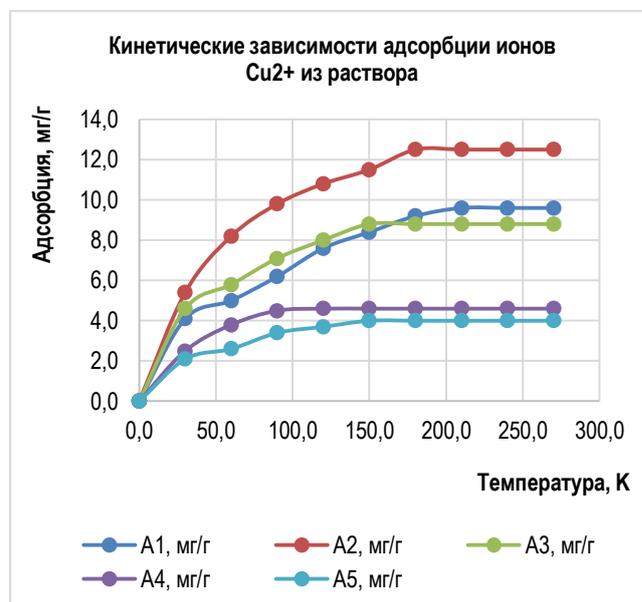
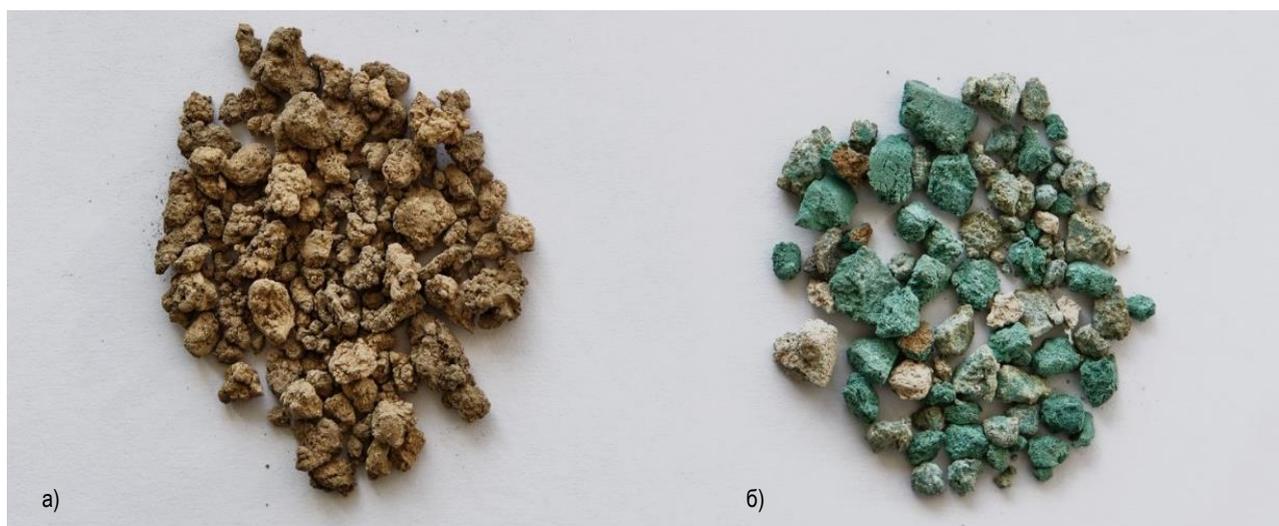


Рисунок 2 – Кинетические зависимости скорости адсорбции ионов  $Cu^{2+}$  (в мг меди/г сорбента) из раствора от времени (в минутах)

Таблица 2 – Результаты сорбции ионов  $Cu(II)$  из модельного раствора образцами композитного сорбента

Образец сорбента (режим получения)	Среднее остаточное содержание $CO_3^{2-}$ (масс. %)	Время достижения сорбционного равновесия, часов	CCE, мг/г
300 °C (менее 1 мм) A4	25,4	1,5	4,6
500 °C (менее 1 мм) A3	12,5	2,5–3	8,8
700 °C (менее 1 мм) A1	10,3	3	9,6
Щелочная активация, 700 °C (менее 1 мм) A2	8,7	2,5–3	12,5
700 °C (1–5 мм) A5	9,3	2	4,0

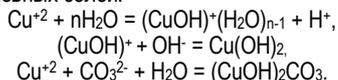


а – исходный сорбент; б – сорбент после сорбции  $Cu^{2+}$  из водного раствора

Рисунок 3 – Гранулы композиционного сорбента

Анализ кинетических кривых (рисунок 2) позволяет отметить, что в среднем сорбционное равновесие для всех образцов материалов достигается за 2–3 часа. Максимальная статическая сорбционная емкость (CCE) по ионам меди составила 12,5 мг/г для образца сорбента дисперсностью менее 1 мм, прокаленного при 700 °С с предварительной щелочной активацией гранитного отсева. Минимальную CCE по меди показал сорбент крупнокристаллический (1–5 мм, температура обработки 700 °С) – 4 мг/г, сорбционное равновесие было достигнуто за 2 часа. Связывание катионов меди из раствора наиболее интенсивно для всех образцов сорбентов протекает первые 30 минут процесса. Через час для композиции наблюдалось снижение скорости сорбции меди, что, по-видимому, связано с диффузионными ограничениями, скоростью заполнения пор сорбента раствором. На рисунке 3 представлены фотографии образцов сорбента до и после сорбции ионов меди из раствора. Поверхность гранул сорбента практически полностью покрыта плотным зеленовато-голубым слоем труднорастворимых соединений меди (растворимость в воде  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  –  $5 \cdot 10^{-7}$  моль/л,  $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$  –  $1,2 \cdot 10^{-8}$  моль/л), слой хорошо сцеплен с поверхностью сорбента, что говорит о преимущественно химическом связывании ионов меди данным композиционным карбонат-силикатным материалом.

Преобладающим механизмом поглощения ионов меди – это гидролиз катионов металла, а затем осаждение гидратированных гидроксоионов меди на поверхности сорбента в виде гидроксида меди или ее основных солей.



Известно, что на поверхности силикатов, алюмосиликатов может формироваться отрицательный заряд за счет присутствия на ребрах кристаллов функциональных анионов, которые и отвечают за способность связывать катионы ТМ в труднорастворимые или координационные соединения, чем больше отрицательно заряженных участков на поверхности сорбента, тем выше его поглощающая способность по ионам металлов.

### Заключение

Синтезированный силикатно-карбонатный композиционный термически модифицированный сорбент из крупнотоннажных доступных и недорогих отходов показал максимальную CCE по ионам  $\text{Cu}(\text{II})$  из модельных растворов – 12,5 мг/г; максимальная скорость сорбции для всех образцов сорбентов установлена в первые 30 минут процесса; сорбционное равновесие достигается в среднем за 2–3 часа. Извлечение ионов меди сорбентом из водного раствора протекает в результате сложного гетерогенно-диффузионного процесса, на поверхности гранул образуются хорошо связанные с материалом осадки основных солей меди или гидроксида. Карбонатные шламы, образующиеся при водоподготовке на ТЭС, мелкодисперсные гранитные отсева (гранитная пыль) можно рассматривать в качестве сырья для синтеза сорбционных материалов. Используя возможности хемоинформатики можно разрабатывать на базе этих отходов технологии изготовления и модификации (термической, химической) различных по составу и назначению дешевых сорбентов.

### Список цитированных источников

- Акатьева, Л. Н. Развитие химико-технологических основ процессов переработки сырья для получения силикатов кальция и композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.11 / Акатьева Лидия Викторовна ; Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова, Российская академия наук. – Москва, 2014. – 328 л.
- Путилина, В. С. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: аналит. обзор / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова // Серия «Экология». Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2009. – Вып. 90. – 155 с.
- Шадрунова, И. В. Технология извлечения меди из стоков горнорудных предприятий окмкованными пиритными концентратами / И. В. Шадрунова, Е. А. Емельяненко, М. М. Емельяненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 276–281.

- Никифорова, Т. Е. Сорбция ионов меди (II) в гетерофазной системе «водный раствор – модифицированная целлюлоза» / Т. Е. Никифорова, В. А. Козлов, Д. А. Вокрува // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2023. – Т. 66, № 12. – С. 91–100. – DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6814.
- Пашкевич, М. А., Харько П. А. Применение композитной смеси для очистки кислых дренажных вод хвостового хозяйства от металлов / М. А. Пашкевич, П. А. Харько // Обогащение руд. – 2022. – № 4. – С. 40–47.
- Removal of Trace  $\text{Cu}^{2+}$  from Water by Thermo-Modified Micron Bamboo Charcoal and the Effects of Dosage / X. Li, W. Gui, U. Batzorig [et al.] // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7835.
- Sorption Extraction of Heavy Metal Ions from Wastewater by Natural and Synthetic Sorbents / R. Aubakirova, G. Daumova, N. Seraya, I. Afanasenkova // Chemical Engineering Transactions. – 2020. – Vol. 81. – P. 343–348. – DOI: 10.3303/CET2081058.
- Simultaneous adsorption of  $\text{Cu}(\text{II})$ ,  $\text{Zn}(\text{II})$ ,  $\text{Cd}(\text{II})$  and  $\text{Pb}(\text{II})$  from synthetic wastewater using NaP and LTA zeolites prepared from biomass fly ash / Mehmet Emin Küçük, Iryna Makarava, Teemu Kinnarinen, Antti Häkkinen // Heliyon. – 2023. – Vol. 9(15): e20253. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20253.
- Mlynarczykowska, A. Biosorption of Copper (II) Ions Using Coffee Grounds – A Case Study / A. Mlynarczykowska, M. Orlof-Naturalna // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7693. – DOI: 10.3390/su16177693.
- Пимнева, Л. А. Очистка природных и промышленных вод от катионов меди диатомитом / Л. А. Пимнева // Успех современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 181–185.
- Годымчук, А. Ю. Исследование сорбционных процессов на природных минералах и их термомодифицированных формах / А. Ю. Годымчук, А. П. Ильин // Химия и технология воды. – 2003. – № 6. – С. 621–632.
- Меркулова, Е. Н. Эффективность использования природных карбонатов кальция в качестве коллекторов тяжелых цветных металлов / Е. Н. Меркулова, А. М. Жижаев, М. А. Чугуевская // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 15. – С. 486–491.
- Николаева, Л. А. Исследование утилизации шлама водоподготовки ТЭС в качестве сорбента при биологической очистке сточных вод промышленных предприятий / Л. А. Николаева // Вода: химия и экология. – 2012. – № 8. – С. 80–84.
- Юрк, В. М. Механизм сорбции ионов меди на поверхности бетонной крошки / В. М. Юрк, Е. С. Коковина, Ж. В. Шальгина // Журнал физической химии. – 2022. Т. 96, № 6. – С. 888–894.
- Иканина, Е. В. Композиционные сорбенты для извлечения тяжелых металлов – итоги последних лет / Е. В. Иканина, В. Ф. Марков, М. И. Каляева // Бултеровские сообщения. – 2016. – Т. 48, № 11. – С. 101–113. – ROI: jbc-01/16-48-11-101.
- Марченко, Л. А. Влияние совместно-осажденных гидроксидов на сорбцию ионов тяжелых металлов / Л. А. Марченко, А. А. Марченко // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т. 9, № 6. – С. 868–876.
- Removal of Copper(II) and Zinc(II) Ions in Water on a Newly Synthesized Polyhydroquinone/Graphene Nanocomposite Material: Kinetics, Thermodynamics and Mechanism / I. Ali, A. E. Burakov, A. V. Melezhib [et al.] // Materials Science inc. Nanomaterials & Polymers. – 2019. – Vol. 4. – P. 12708. – DOI: 10.1002/slct.201902657.
- Глушанкова, И. С. Модифицированные сорбенты на основе шлама содового производства для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов и сточных вод / И. С. Глушанкова, Е. В. Калинина, Е. Н. Демина // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 3. – С. 100–108.
- Извлечение ионов меди и цинка из сточных вод сорбентом на основе хитозана / Е. А. Татаринцова, О. А. Арефьева, Л. Н. Ольшанская [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 1. – С. 148–153.
- Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory / M. Gorokhovskii, E. I. Karpenko, F. C. Lockwood [et al.] // Journal of the Energy Institute. – 2005. – № 4. – P. 157–171. – DOI: 10.1179/174602205x68261.

## References

1. Akaeva, L. N. Razvitiye himiko-tehnologicheskikh osnov processov pererabotki syr'ya dlya polucheniya silikatov kal'ciya i kompozitsionnykh materialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.17.11 / Akaeva Lidiya Viktorovna ; Institut metallurgii i materialovedeniya im. A. A. Bajkova, Rossijskaya akademiya nauk. – Moskva, 2014. – 328 l.
2. Putilina, V. S. Adsorbciya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Karakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbicii: analit. obzor / V. S. Putilina, I. V. Galickaya, T. I. YUganova // Seriya «Ekologiya». Novosibirsk : GPNTB SO RAN, 2009. – Vyp. 90. – 155 s.
3. SHadrunkova, I. V. Tekhnologiya izvlecheniya medi iz stokov gornorudnykh predpriyatij okomkovannymi piritnymi koncentratami / I. V. SHadrunkova, E. A. Emel'yanenko, M. M. Emel'yanenko // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. – 2006. – № 1. – S. 276–281.
4. Nikiforova, T. E. Sorbciya ionov medi (II) v geterofaznoj sisteme «vodnyj rastvor – modifitsirovannaya cellyuloza» / T. E. Nikiforova, V. A. Kozlov, D. A. Vokurova // Izv. vuzov. Himiya i him. tekhnologiya. – 2023. – T. 66, № 12. – S. 91–100. – DOI: 10.6060/ivkt.20236612.6814.
5. Pashkevich, M. A., Har'ko P. A. Primeneniye kompozitnoj smesi dlya oчитki kislykh drenaznykh vod hvostovogo hozyajstva ot metallov / M. A. Pashkevich, P. A. Har'ko // Obogashchenie rud. – 2022. – № 4. – S. 40–47.
6. Removal of Trace Cu<sup>2+</sup> from Water by Thermo-Modified Micron Bamboo Charcoal and the Effects of Dosage / X. Li, W. Gui, U. Batzorig [et al.] // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7835.
7. Sorption Extraction of Heavy Metal Ions from Wastewater by Natural and Synthetic Sorbents / R. Aubakirova, G. Daumova, N. Seraya, I. Afanasenkova // Chemical Engineering Transactions. – 2020. – Vol. 81. – P. 343–348. – DOI: 10.3303/CET2081058.
8. Simultaneous adsorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) from synthetic wastewater using NaP and LTA zeolites prepared from biomass fly ash / Mehmet Emin Küçük, Iryna Makarava, Teemu Kinnarinen, Antti Häkkinen // Heliyon. – 2023. – Vol. 9(15): e20253. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20253.
9. Młynarczykowska, A. Biosorption of Copper (II) Ions Using Coffee Grounds – A Case Study / A. Młynarczykowska, M. Orlof-Naturalna // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7693. – DOI: 10.3390/su16177693.
10. Pimneva, L. A. Oчитka prirodnykh i promyshlennykh vod ot kationov medi diatomitom / L. A. Pimneva // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2022. – № 12. – S. 181–185.
11. Godymchuk, A. YU. Issledovanie sorbtsionnykh processov na prirodnykh mineralah i ih termomodifitsirovannykh formah / A. YU. Godymchuk, A. P. Il'in // Himiya i tekhnologiya vody. – 2003. – № 6. – S. 621–632.
12. Merkulova, E. N. Effektivnost' ispol'zovaniya prirodnykh karbonatov kal'ciya v kachestve kollektorov tyazhyolykh cvetnykh metallov / E. N. Merkulova, A. M. ZHizhaev, M. A. CHuguevskaya // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2009. – № 15. – S. 486–491.
13. Nikolaeva, L. A. Issledovanie utilizatsii shlama vodopodgotovki TES v kachestve sorbenta pri biologicheskoy oчитke stochnykh vod promyshlennykh predpriyatij / L. A. Nikolaeva // Voda: himiya i ekologiya. – 2012. – № 8. – S. 80–84.
14. YUr, V. M. Mekhanizm sorbtsii ionov medi na poverhnosti betonnoj kroshki / V. M. YUr, E. S. Kokovina, ZH. V. SHalygina // ZHurnal fizicheskoy himii. – 2022. T. 96, № 6. – S. 888–894.
15. Ikanina, E. V. Kompozitsionnye sorbenty dlya izvlecheniya tyazhelykh metallov – itogi poslednykh let / E. V. Ikanina, V. F. Markov, M. I. Kalyaeva // Butlerovskie soobshcheniya. – 2016. – T. 48, № 11. – S.101–113. – ROI: jbc-01/16-48-11-101.
16. Marchenko, L. A. Vliyaniye sovmestno-osazhdennykh gidroksidov na sorbtsiyu ionov tyazhelykh metallov / L. A. Marchenko, A. A. Marchenko // Sorbtsionnye i hromatograficheskie processy. – 2009. – T. 9, № 6. – S. 868–876.
17. Removal of Copper(II) and Zinc(II) Ions in Water on a Newly Synthesized Polyhydroquinone/Graphene Nanocomposite Material: Kinetics, Thermodynamics and Mechanism / I. Ali, A. E. Burakov, A. V. Melezhih [et al.] // Materials Science inc. Nanomaterials & Polymers. – 2019. – Vol. 4. – P. 12708. – DOI: 10.1002/slct.201902657.
18. Glushankova, I. S. Modifitsirovannyye sorbenty na osnove shlama sodovogo proizvodstva dlya izvlecheniya ionov tyazhelykh metallov iz vodnykh rastvorov i stochnykh vod / I. S. Glushankova, E. V. Kalinina, E. N. Demina // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2018. – № 3. – S. 100–108.
19. Izvlecheniye ionov medi i cinka iz stochnykh vod sorbentom na osnove hitozana / E. A. Tatarincova, O. A. Arefeva, L. N. Ol'shanskaya [i dr.] // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2023. – № 1. – S. 148–153.
20. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory / M. Gorokhovskiy, E. I. Karpenko, F. C. Lockwood [et al.] // Journal of the Energy Institute. – 2005. – № 4. – P. 157–171. – DOI: 10.1179/174602205x68261.

Материал поступил 15.12.2024, одобрен 30.12.2024, принят к публикации 30.12.2024