



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 546.05: 544.72

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11864

Исследование адсорбции ионов меди, никеля и цинка на цеолитсодержащем сорбенте, синтезированном из отходов ТЭС

Елена Леонидовна Усова[✉], Антонина Александровна Решетова,
Ирина Николаевна Полещук, Людмила Анатольевна Пимнева

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия, usovael@tyuiu.ru[✉]

Аннотация. В работе исследовалась возможность применения золошлаковых отходов теплоэлектростанций в качестве альтернативного сырьевого источника для получения недорогого цеолитсодержащего сорбента, который был синтезирован методом гидротермального синтеза путем добавления 20% гидроксида натрия при температуре 120 С в течение 24ч. Методом РФА было установлено, что синтезированный материал в основном состоит из каркасного алюмосиликатного минерала гидросодалита. На полученном материале изучалась сорбция катионов меди, цинка и никеля из водных сред с использованием моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. Были определены константы этих уравнений, рассчитаны величины изобарно-изотермического потенциала и свободной энергии адсорбции ионов. Установлено, что сорбция ионов металлов имеет физическую природу. Найдено, что уравнение Дубинина – Радушкевича лучше описывает процесс адсорбции цинка и никеля, а уравнение Ленгмюра – сорбцию ионов меди. Определено уменьшение степени сродства сорбированных ионов к поверхности синтезированного цеолитсодержащего сорбента следующим образом: $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$.

Таким образом, на основании полученных значений сорбции ионов меди, цинка и никеля установлена принципиальная возможность применения золошлаковых отходов в качестве сырьевого источника для получения недорогих и эффективных цеолитсодержащих сорбентов для извлечения вышеуказанных ионов металлов из водных сред.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, цеолит, гидросодалит, сорбция, ионы меди (II), ионы цинка (II), ионы никеля (II).

Для цитирования: Усова Е.Л., Решетова А.А., Полещук И.Н., Пимнева Л.А. Исследование адсорбции ионов меди, никеля и цинка на цеолитсодержащем сорбенте, синтезированном из отходов ТЭС // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 6. С. 1034-1041. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11864>

Original article

Study of the adsorption of copper, nickel and zinc ions on a zeolite-containing sorbent synthesized from thermal power plant waste

Elena L. Usova[✉], Antonina A. Reshetova, Irina N. Poleshchuk, Lyudmila A. Pimneva
Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, usovael@tyuiu.ru[✉]

Abstract. The study investigated the possibility of using ash and slag waste from thermal power plants as an alternative raw material source to obtain an inexpensive zeolite-containing sorbent, which was synthesized by hydrothermal synthesis by adding 20% sodium hydroxide at a temperature of 120°C for 24 hours. Using X-ray diffraction, it was established that the synthesized material mainly consists of the framework aluminosilicate mineral hydrosodalite. Using the obtained material, the sorption of copper, zinc, and nickel cations from aqueous media was studied using the Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich models. The constants of these equations were determined, the values of the isobaric-isothermal potential and the free energy of ion



adsorption were calculated. It has been established that the sorption of metal ions is of a physical nature. It was found that the Dubinin–Radushkevich equation better describes the process of adsorption of zinc and nickel, and the Langmuir equation better describes the sorption of copper ions. The decrease in the degree of affinity of sorbed ions to the surface of the synthesized zeolite-containing sorbent was determined as follows: $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$.

Thus, based on the obtained values of sorption of copper, zinc, and nickel ions, the fundamental possibility of using ash and slag waste as a raw material source for obtaining inexpensive and effective zeolite-containing sorbents for extracting the above metal ions from aqueous media was established.

Keywords: ash and slag waste, zeolite, hydrosodalite, sorption, copper (II) ions, zinc (II) ions, nickel (II) ions.

For citation: Usova E.L., Reshetova A.A., Poleshchuk I.N., Pimneva L.A. Study of the adsorption of copper, nickel and zinc ions on a zeolite-containing sorbent synthesized from thermal power plant waste. *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(6): 1034-1041. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2023.23/11864>

Введение

В настоящее время в России скопилось более 1 млрд. тонн золошлаковых отходов, что приводит к ухудшению состояния окружающей среды. Существует много направлений утилизации отходов ТЭС, одно из перспективных направлений является получение материалов, обладающих сорбционными свойствами. Утилизация золошлаковых отходов в технологии получения сорбентов позволит не только решить экологические проблемы, связанные с содержанием золоотвалов, но и снизить себестоимость продукции.

В работах [1-3] показана возможность применения золы уноса как сырьевого источника для получения цеолитов методом гидротермального синтеза, а также установлена возможность извлечения катионов NH_4^+ , Ba^{2+} и Sr^{2+} [1], катионов Pb^{2+} [2], катионов Cd^{2+} [3] из водных сред. Цеолиты широко применяются в различных областях для защиты окружающей среды, в частности, в качестве сорбентов для очистки водных объектов.

Целью данной работы является исследование закономерностей сорбции на синтезированном из золошлаковых отходов цеолитсодержащем сорбенте по отношению к ионам меди, цинка и никеля и обоснование механизма сорбции данных ионов. Таким образом, будет установлена принципиальная возможность применения золошлаковых отходов в качестве

сырьевого источника для получения недорогих сорбентов для извлечения вышеуказанных ионов металлов из водных сред.

Теоретическая часть

Для оценки селективности сорбента были построены изотермы сорбции с применением метода переменных концентраций. Количественно сорбцию можно описать с применением различных моделей [4]. В таблице 1 приведены модели, используемые в данной работе.

Модель изотермы Ленгмюра основана на том, что на поверхности катионита образуется мономолекулярный сорбционный слой и все активные места обладают равной энергией и энтальпией сорбции [4]. Сорбция на гетерогенной поверхности описывается моделью Фрейндлиха. Согласно этой модели, сначала происходит заполнение активных сорбционных положений, обладающих меньшей энергией, в результате чего энергия сорбции непрерывно изменяется.

Более широкую картину о природе сорбции ионов позволяет получить модель Дубинина-Радушкевича, которая учитывает гетерогенность поверхности и переменность потенциала адсорбции [5,6].

Экспериментальная часть

В работе использовались золошлаковые отходы Томской ГРЭС в качестве алюмосиликатного сырья для синтеза

Таблица 1. Модели изотерм сорбции
 Table 1. Sorption isotherm models

| Модель | Уравнение | Номер уравнения |
|-----------------------|--|-----------------|
| Ленгмюра | $C_R = \frac{C_{\max} \cdot C_S \cdot K_L}{1 + K_L \cdot C_S}$ | (1) |
| | $\frac{1}{C_R} = \frac{1}{C_{\max}} + \frac{1}{K_L \cdot S \cdot C_S}$ | (2) |
| Фрейндлиха | $C_R = K_F \cdot C_S^{1/n}$ | (3) |
| | $\ln C_R = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_S$ | (4) |
| Дубинина-Радуш-кевича | $C_R = C_{\max} \cdot \exp(-k \cdot \varepsilon^2)$ | (5) |
| | $\ln C_R = \ln C_{\max} - k \cdot \varepsilon^2$ | (6) |

C_R – равновесная концентрация сорбированного иона металла на единицу массы сорбента; C_{\max} – максимальная емкость сорбента, ммоль/г, C_S – концентрация ионов в растворе, моль/дм³, n , k – константы, определяемые опытным путем; ε – потенциал Поляни (кДж/моль), рассчитанный по уравнению $\varepsilon = RT \ln(1 + |C|)$, R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; T – абсолютная температура, К.

Таблица 2. Химический состав золошлаковых отходов
 Table 2. Chemical composition of ash and slag waste

| Содержание, масс.% | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|-----|------------------|------------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | MgO | MnO ₂ | K ₂ O |
| 50.5 | 39.3 | 4.2 | 0.9 | 3.1 | 0.7 | 0.5 | 0.8 |

цеолитоподобных фаз. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии был установлен химический состав золошлаковых отходов, представленный в таблице 2.

Исходя из химического состава, исследуемое золошлаковое сырье относится к кислым, инертным золошлаковым материалам. Содержание оксидов кремния и алюминия в исследуемом техногенном сырье совпадает с содержанием данных оксидов в каолинах, что позволяет его опробовать как альтернативный источник сырья для синтеза цеолитов. В работе [7] исследовались способы активации каолина по извлечению катионов меди из водных объектов.

Предварительно была определена сорбирующая способность исходного золошлакового отхода по извлечению катиона меди (II) из водного раствора, которая составила порядка 0.05 ммоль/г. Низкое значение сорбции катионов меди на золошлаке не позволяет применить его в качестве сорбента, поэтому для увеличения сорбирующей способности необходимо его активирование.

Для получения сорбента золошлаковые отходы предварительно были подвержены магнитной сепарации. Навески немагнитной части золошлака смешивали с 20% раствором гидроксида натрия. Смесь помещали в автоклав и выдерживали при 120°C в течение 24 часов. Затем продукты гидротермального синтеза промывали до нейтральной реакции среды дистиллированной водой и высушивали при температуре 105°C в течение 3 ч. Кислотность растворов контролировали с помощью рН-метра «рН-340» по методике [8].

Исследования минералогических составов образцов проводились рентгенофазовым методом анализа на дифрактометре ДРОН-6 при 40 кВ и 40 мА, излучением CuK α с фильтром Ni (k 1.5406 Å). На полученной дифрактограмме исследуемых отходов ГРЭС (рис.1 а) видно, что его минералогический состав представлен минералами кварца, муллита. После термической обработки золошлаковых отходов в щелочной среде наблюдается появление новой кристаллической фазы

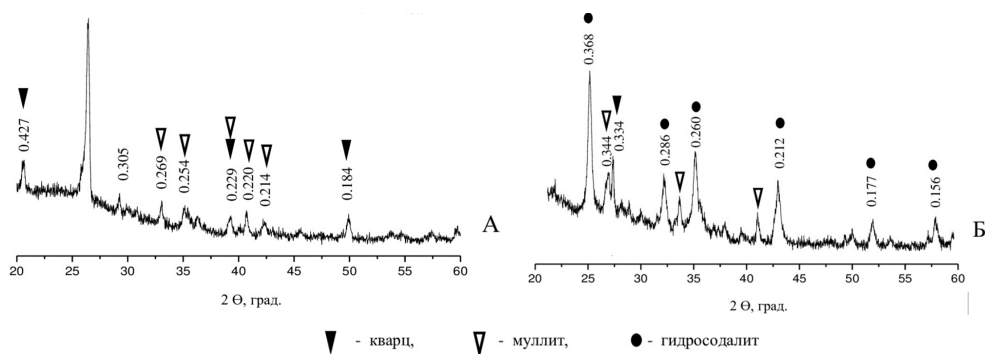


Рис. 1. Дифрактограммы исходного золошлакового материала (а) и продукта гидротермального синтеза, полученного при температуре 120°C в течение 24 часов (б)
 Fig. 1. Diffraction patterns of the initial ash and slag material (a) and the hydrothermal synthesis product obtained at a temperature of 120°C for 24 hours (b)

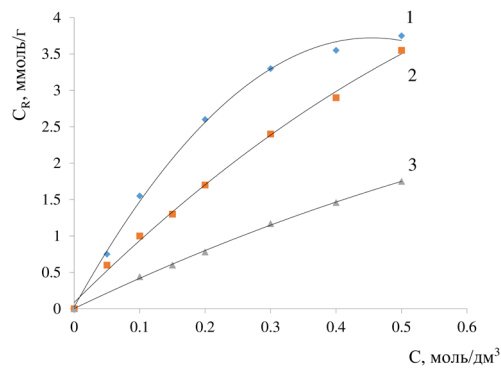


Рис. 2. Изотерма сорбции на синтезированном золошлаковом сорбенте:
 1 – ионы меди (II); 2 – ионы цинка (II); 3 – ионы никеля (II)
 Fig. 2. Sorption isotherm on synthesized ash and slag sorbent

типа гидросодалита (рис.1 б). Гидросодалит является алюмосиликатным минералом, входящим в состав группы содалита, обладающего цеолитоподобной каркасной структурой.

На цеолите, полученном в результате гидротермального синтеза при выше указанных условиях, исследовалась его сорбционная способность к ионам меди, цинка и никеля.

Содержание ионов металлов определяли комплексонометрическим титрованием. Концентрация исходных растворов меди, цинка и никеля варьировалась от 0.05 до 0.5 моль/дм³. Навески CuSO₄ · 5H₂O, NiCl₂ · 6H₂O и ZnSO₄ · 7H₂O (квалификация «х.ч.») растворяли в бидистилляте. Растворы с меньшей концентрацией готовили разбавлением исходных.

Изучение адсорбционных свойств проводили в статических условиях. Исследуемый цеолитсодержащий сорбент

массой 1 г помещали в полиэтиленовые стаканы с добавлением 20 см³ исследуемого раствора и выдерживали при комнатной температуре 72 часа. Затем сорбент отфильтровывали и в фильтрате определяли содержание катионов металлов. Величину сорбции (C_R, ммоль/г) определяли по формуле:

$$C_R = (C - C_S) \cdot V/m,$$

где C – содержание ионов металла в модельном растворе, моль/дм³; C_S – содержание ионов металла в состоянии равновесия, моль/дм³; V – объем раствора, см³; m – масса цеолитсодержащего сорбента, г.

Обсуждение результатов

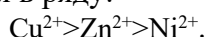
На рисунке 2 представлены изотермы сорбции исследуемых ионов металлов на активированном сорбенте. Пропорциональный характер зависимости сорбции от концентрации на начальном этапе

Таблица 3. Константы изотерм Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича
 Table 3. Constants of Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich isotherms

| Модель Ленгмюра | | | | |
|-----------------------------|--------|-----------------------|-------|-------|
| Ион | K_L | C_{max} | R_L | R^2 |
| Cu^{2+} | 1.833 | 9.091 | 0.845 | 0.992 |
| Zn^{2+} | 2.130 | 5.555 | 0.824 | 0.989 |
| Ni^{2+} | 0.964 | 6.250 | 0.912 | 0.996 |
| Модель Фрейндлиха | | | | |
| Ион | K_F | ΔG , кДж/моль | n | R^2 |
| Cu^{2+} | 7.029 | -21.945 | 1.428 | 0.961 |
| Zn^{2+} | 5.529 | -21.351 | 1.290 | 0.998 |
| Ni^{2+} | 4.096 | -20.607 | 1.143 | 0.998 |
| Модель Дубинина-Радушкевича | | | | |
| Ион | k | C_{max} | E | R^2 |
| Cu^{2+} | -0.033 | 4.904 | 3.892 | 0.999 |
| Zn^{2+} | -0.037 | 3.743 | 3.676 | 0.947 |
| Ni^{2+} | -0.043 | 2.489 | 3.410 | 0.996 |

(участок Генри) свидетельствует о количественной сорбции. Кривая изотермы сорбции для ионов меди идет выше, чем для ионов цинка и никеля, что говорит об уменьшении сродства синтезированного сорбента к ионам металлов в ряду: $Cu^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$.

В таблице 3 показаны найденные значения параметров из моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина – Радушкевича. Найденные по модели Фрейндлиха величины K_F и n показывают, что сродство сорбированного иона к поверхности цеолитсодержащего сорбента и интенсивность взаимодействия адсорбент-адсорбат изменяется в ряду:



Полученная закономерность хорошо согласуется с литературными данными по сорбции данных ионов на синтезированных и природных цеолитах [9-12].

Также об уверенном характере сорбции и хорошем закреплении ионов на поверхности можно судить по полученным отрицательным значениям энергии Гиббса.

Полученные высокие значения максимальной сорбции при низкой величине K_L в уравнении изотермы Ленгмюра характеризуют сорбент как хороший [13].

О благоприятном протекании адсорбции можно судить по коэффициенту разделения (или параметру равновесия), R_L , найденному по уравнению:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}, \quad (8)$$

где C_0 – начальная концентрация ионов металла в растворе, моль/дм³.

Адсорбция считается необратимой, когда $R_L = 0$, благоприятной, когда $0 < R_L < 1$ [5]. Полученные значения коэффициентов R_L говорят о благоприятном процессе адсорбции.

Для того, чтобы определить характер сорбционного процесса, было определено значение свободной энергии адсорбции E. Полученная величина свободной энергии $E < 8$ кДж/моль говорит о слабом взаимодействии активных центров поверхности активированного сорбента и ионов металла, а, следовательно, о физической природе сорбции [6].

Значительную разницу в полученных термодинамических параметрах изобарно-изотермического потенциала ΔG и энергии E взаимодействия адсорбирующихся ионов металлов с сорбентом по уравнениям изотерм Ленгмюра и Дубинина-Радушкевича можно объяснить разным подходом к описанию этих моделей и взглядом на природу поверхности сорбирующего слоя.



Заключение

Изотермы сорбции ионов меди, цинка и никеля на синтезированном цеолитсодержащем сорбенте, полученного из золошлаковых отходов, были описаны моделями Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича. Определены константы этих уравнений, на основе которых были рассчитаны величины изобарно-изотермического потенциала и свободной энергии адсорбции ионов на полученном сорбенте. Установлено, что сорбция ионов металлов имеет физическую природу. Найдено, что уравнение Дубинина-Радушкевича лучше описывает процесс адсорбции цинка и никеля, а уравнение Ленгмюра – сорбцию ионов меди. Определено уменьшение степени

Список литературы

1. Котова О.Б., Шабалин И.Л., Котова Е.Л. Фазовые трансформации в технологиях синтеза и сорбционные свойства цеолитов из угольной золы уноса // *Записки Горного института*. 2016. Т. 220. С.526-531.
2. Luo J., Zhang H., Yang J. Hydrothermal Synthesis of Sodalite on Alkali-Activated Coal Fly Ash for Removal of Lead Ions // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31. P. 605-614.
3. Wang C., Feng K., Wang L. et al. Characterization of coal gangue and coal gangue-based sodalite and their adsorption properties for Cd²⁺ ion and methylene blue from aqueous solution // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2023. Vol. 25. P. 1622-1634.
4. Пимнева Л.А., Нестерова Е.Л. Изотермы сорбции ионов бария, меди и иттрия на карбоксильном катионите КБ-4Пх2 // *Современные наукоемкие технологии*. 2008. № 4. С. 1-5.
5. Филатова Е.Г., Матиенко О.И. Исследование адсорбции ионов никеля (II) природными сорбентами // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, №1. С. 116-128.

сродства сорбированных ионов к поверхности синтезированного сорбента следующим образом: Cu²⁺>Zn²⁺>Ni²⁺.

Полученные значения сорбции свидетельствуют об эффективном извлечении исследуемых ионов на цеолитсодержащем сорбенте и возможности применения золошлаковых отходов в качестве сырьевого источника для получения недорогих сорбентов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

6. Шумилова М. А., Петров В.Г. Адсорбционные модели для описания равновесия в системе арсенит-ион – почва // *Теоретическая и прикладная экология*. 2017. № 4. С. 32-38.
7. Пимнева Л. А., Андреев О.В. Модифицированные формы каолинита для извлечения ионов меди из природных и сточных вод // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 5. С. 13-17.
8. ГОСТ 33776-2016 Межгосударственный стандарт. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение pH, кислотности и щелочности. Введ. 2017-03-01. М., 2019. 8с.
9. Белова Т.П., Ершова Л.С., Ратчина Т.И. Рентгенофазовое исследование изменения структуры природного цеолита в результате сорбции тяжелых металлов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2019. Т. 19. № 6. С. 673-681.
10. Белова Т.П., Ратчина Т.И., Гавриленко Ю.С. Адсорбция меди, никеля и кобальта натуральным цеолитом из водных растворов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 12. С. 76-80.
11. Марченкова Т.Г., Кунилова И.В. Исследование сорбции меди, никеля, цинка и серебра на модифицированном



Сибайском цеолите // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2004. № 11. С. 298-301.

12. Asma S. Al-Wasidi, Ahmed M. Naglah, Fawaz A. Saad et al. Modification of sodium aluminum silicate hydrate by thioglycolic acid as a new composite capable of removing and preconcentrating Pb(II), Cu(II), and Zn(II) ions from food and water samples // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15, no. 10. 104178.

13. Никифорова Т.Е. Физико-химические основы хемосорбции ионов d-металлов модифицированными целлюлозосодержащими материалами. Дисс. докт. хим. наук. Иваново: ФГБОУ ВПО ИГХТУ, 2014, 365 с.

References

1. Kotova O.B., Shabalin I.L., Kotova E.L. Phase transformations in synthesis technologies and sorption properties of zeolites from coal fly ash. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016; 220: 526-531. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.526> (In Russ.)

2. Luo J., Zhang H., Yang J. Hydrothermal Synthesis of Sodalite on Alkali-Activated Coal Fly Ash for Removal of Lead Ions. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 31: 605-614. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.105>

3. Wang C., Feng K., Wang L. et al. Characterization of coal gangue and coal gangue-based sodalite and their adsorption properties for Cd²⁺ ion and methylene blue from aqueous solution // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2023; 25: 1622-1634. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01630-x>

4. Pimneva L.A., Nesterova E.L. Isotherms of sorption of barium, copper and yttrium ions on carboxyl cationite KB-4Px2. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2008; 4: 1-5. (In Russ.)

5. Filatova E.G., Matienko O.I. Investigation of the adsorption of nickel (II) ions by natural sorbents. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023; 23(1):116-

128. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/10999> (In Russ.)

6. Shumilova M. A., Petrov V.G. Adsorption models for describing the equilibrium in the arsenite-ion-soil system. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2017; 4: 32-38. <https://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2017-4-032-038> (In Russ.)

7. Pimneva L. A., Andreev O.V. Modified forms of kaolinite for extraction of copper ions from natural and wastewater. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2018; 5: 13-17. (In Russ.)

8. GOST 33776-2016 Methods of testing chemical products that pose a danger to the environment. Determination of pH, acidity and alkalinity. М., 2019; 8. (In Russ.)

9. Belova T.P., Ershova L.S., Ratchina T.I. X-ray phase study of changes in the structure of natural zeolite as a result of sorption tyazhelykh metallov. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2019; 19(6): 673-681. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/2228> (In Russ.)

10. Belova T.P., Ratchina T.I., Gavrilenko Yu.S. Adsorption of copper, nickel and cobalt with natural zeolite from aqueous solutions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2014; 12: 76-80. (In Russ.)

11. Marchenkova T.G., Kunilova I.V. Investigation of sorption of copper, nickel, zinc and silver on modified Sibai zeolite. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2004; 11: 298-301. (In Russ.)

12. Asma S. Al-Wasidi, Ahmed M. Naglah, Fawaz A. Saad et al. Modification of sodium aluminum silicate hydrate by thioglycolic acid as a new composite capable of removing and preconcentrating Pb(II), Cu(II), and Zn(II) ions from food and water samples. *Arabian Journal of Chemistry*. 2022; 15(10): 104178. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104178>

13. Nikiforova T.E. Physico-chemical bases of chemisorption of d-metal ions by modified cellulose-containing materials. Diss. dokt. khim. nauk. Ivanovo: FGBOU VPO IGKhTU, 2014, 365 p. (In Russ.)



Информация об авторах / Information about the authors

Е.Л. Усова – к.х.н., доцент кафедры общей и специальной химии, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

E.L. Usova – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of general and special chemistry, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, e-mail: usovael@tyuiu.ru

А.А. Решетова – к.т.н., доцент кафедры общей и специальной химии, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

A.A. Reshetova – Ph.D. (technical), associate prof., department of general and special chemistry, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, e-mail: reshetovaaa@tyuiu.ru

И.Н. Полещук – к.х.н., доцент кафедры общей и специальной химии, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

I.N. Poleshchuk – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of general and special chemistry, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, e-mail: poleschukin@tyuiu.ru

Л.А. Пимнева – д.х.н., заведующий кафедрой общей и специальной химии, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

L.A. Pimneva – prof., grand Ph.D (chemistry), head of the department of general and special chemistry, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, e-mail: pimnevala@tyuiu.ru

Статья поступила в редакцию 03.08.2023; одобрена после рецензирования 04.10.2023; принята к публикации 18.10.2023.

The article was submitted 03.08.2023; approved after reviewing 04.10.2023; accepted for publication 18.10.2023.