

Код МРНТИ 52.01.11:52.01.91

*А.С. Бейсебаева, С.М. Жарылкан, Е.Н. Есжан, С. Азат
Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. Горно-металлургическая промышленность является значительным источником разнообразных отходов, которые требуют утилизации или повторного использования. В последние годы возрос интерес к разработке технологий и процессов, направленных на использование этих отходов для получения новых материалов, что имеет важное значение для снижения нагрузки на окружающую среду и оптимизации ресурса потребления. В данной работе рассматриваются основные методы и технологии получения материалов из горно-металлургических отходов, их преимущества и перспективы применения. В работе представлен обзор наиболее эффективных технологий по извлечению различных видов сырья и готовой продукции из горно-металлургической промышленности. Показаны разработанные технологии извлечения ценных компонентов из отходов производства на основании проведенных лабораторных исследований. В данной работе были получены наночастицы диоксида кремния, геополимерный материал, материал, содержащий фазовый электропроводящий состав.

Ключевые слова: отходы горнодобывающей и металлургической промышленности, переработка, повторное использование, элементы, материал, кремний, безотходный процесс.

Тау-кен металлургия қалдықтарын қайта өңдеу әдістері

Андатпа. Тау-кен металлургия өнеркәсібі кәдеге жаратуы немесе қайта пайдалануды қажет ететін әртүрлі қалдықтардың маңызды көзі болып табылады. Соңғы жылдары осы қалдықтарды жаңа материалдар алу үшін пайдалануға бағытталған технологиялар мен процестерді дамытуға қызығушылық артты, бұл қоршаған ортаға түсетін зиянды азайту және ресурстарды тұтынуды оңтайландыру үшін маңызды. Бұл жұмыста тау-кен және металлургиялық қалдықтарынан материалдарды алудың негізгі әдістері мен технологиялары, олардың артықшылықтары мен қолдану перспективалары қарастырылады. Жұмыста тау-кен металлургия өнеркәсібінен шикізат пен дайын өнімдердің әртүрлі түрлерін алудың ең тиімді технологиялары қарастырылған. Өндіріс қалдықтарынан бағалы компоненттерді алудың әзірленген технологиялары зертханалық зерттеулер негізінде көрсетілген. Жұмыста сирек кездесетін металл кенінің қалдықтарынан кремний диоксиді бар материал, геополимерлі материал, құрамында электротөзігіштік фазасы бар материал алынды.

Түйінді сөздер: тау-кен металлургия өнеркәсібінің қалдықтары, қайта өңдеу, қайта пайдалану, элементтер, материал, кремний, қалдықсыз процесс.

Methods for processing mining and metallurgical production waste

Abstract. The mining and metallurgical industry is a significant source of a variety of waste that requires disposal or reuse. In recent years, there has been increased interest in the development of technologies and processes aimed at using these wastes to produce new materials, which is important for reducing the burden on the environment and optimizing resource consumption. This paper discusses the main methods and technologies for obtaining materials from mining and metallurgical waste, their advantages and prospects for application. The paper provides an overview of the most effective technologies for the extraction of various types of raw materials and finished products from the mining and metallurgical industry. The developed technologies for extracting valuable components from production waste are shown based on laboratory studies. In this work, the following materials were obtained: silicon dioxide nanoparticles, geopolymer material, material containing a phase conductive composition.

Key words: waste from the mining and metallurgical industries, recycling, reuse, elements, material, silicon, waste-free process.

Введение

Горнодобывающие и металлургические процессы производят значительное количество отходов. В Казахстане отходы горнодобывающей промышленности и металлургии являются одним из глобальных проблем для окружающей среды. Если ими не управлять должным образом, эти виды отходов могут нанести непоправимый ущерб окружающей среде и представляют опасность для человека. Несмотря на экологические проблемы, связанные с отходами горнодобывающей и металлургической промышленности, добывающие отрасли могут быть интегрированы для формирования модели экономики замкнутого цикла, который способствует нулевым отходам за счет переработки и повторного использования этих отходов материалов. Другими словами, различные потоки отходов фактически могут рассматриваться как вторичные источники ценных минералов и металлов.

Загрязнение окружающей среды отходами металлургических и горно-обогатительных предприятий – одна из наиболее острых экологических проблем. Рациональным способом устранения отходов является их утилизация и использование в качестве вторичного сырья с созданием новых малоотходных технологий производства целевых материалов.

Сложившаяся ситуация с накопленными отходами обогатительных фабрик, хвостохранилищ и рудных месторождений подчеркивает необходимость продолжения исследований их возможного использования для получения альтернативных продуктов.

По химическому составу отходы можно разделить на неорганические, органические и смешанные отходы.

Современные технологии позволяют практически полностью утилизировать эти отходы, получая различные виды сырья и готовой продукции. В статье рассмотрены варианты переработки кремния из кремниевых шлаков, чистые частицы нанопористого кремнезема из фосфорного шлака, функциональных материалов из затвердевших шлаков и т.д. Однако лучший способ утилизации горно-металлургических отходов – это использование их для получения товарной продукции – сырья для промышленности, материалы для электроники, нанотехнологий и производства биоэнергетики. Утилизировать окружающую среду от вредных веществ, и найти эффективное решение извлечения элементов от техногенных отходов.

Объекты исследования

Объектом исследования являлись пробы редкометаллической руды (Отход №5), золотосодержащей руды (Отход №6) месторождения РК, также пробы золошлаковых отходов (Отход №3), отличающиеся веществественным составом.

Изучение веществественного состава проб выполнено с использованием физико-химических, фазовых, рентгенодифрактометрических анализов, а также замерами размеров частиц, элементного состава проб до и после синтеза.

Цель – изучить веществественный состав проб, исследовать физико-химические свойства, получить новые материалы из исследуемых отходов.

Принципиальная схема (рис. 1) показывает концепцию данной работы с указанием планируемых и конечных результатов.



Рис. 1. Принципиальная схема переработки горно-металлургических отходов и получение конечных продуктов.

Сурет 1. Тау-кен және металлургиялық қалдықтарды өңдеу және соңғы өнім алу схемасы.

Figure 1. Schematic diagram of processing mining and metallurgical waste and obtaining final products.

Методы исследования и результаты

Отбор проб для выполнения анализов выполнен с использованием высокопроизводительного сканирующего электронного микроскопа (JSM-6490LA) по химическому составу.

Был синтезирован диоксид кремния из отхода редкометаллической руды. Образцы были тщательно промыты дистиллированной водой для удаления пыли, а затем измельчены в порошок. Образцы поместили в печь и нагрели при температуре 800 °С в течение 1 часа. Затем золу извлекли из печи и охладили до комнатной температуры, а затем обработали горячим 3 М раствором соляной кислоты для удаления остаточных металлических примесей из образца. Оставшееся твердое вещество было промыто дистиллированной водой до нейтрализации.

Проведена экстракция кремнезема из отхода с использованием метода щелочного выщелачивания. Определенное количество образца добавляли в колбу, содержащую 4,0 М раствор гидроксида натрия (*NaOH*). Затем образец кипятили при температуре 100 °С в течение 6 ч при постоянном перемешивании. Раствор центрифугировали для отделения твердых остатков и фильтровали через фильтр для удаления любых примесей металла и углерода. В результате процесса фильтрации был получен бесцветный

и прозрачный раствор. Раствор разбавляли до 2,0 мл с использованием деионизированной воды.

Осаждение наночастиц кремнезема из полученного силикатного раствора с использованием соляной (*HCl*). Раствор силиката добавляли по каплям в 2,0 М раствор кислоты при постоянном перемешивании. Для контроля pH раствора использовался pH-метр. В процессе гелеобразования силикатный раствор вступает в реакцию с кислотой и образует аквагель. Аквагель выдерживался в течение 24 часов при постоянной температуре. Затем гели промывали деионизированной водой и центрифугировали не менее трех раз для удаления растворенных солей. Образец высушивали при 80 °С в течение 48 ч и измельчали в порошок для получения чистых наночастиц кремнезема.

Произведен элементный и структурный анализ (SEM-EDS) и структурный анализ (XRD) полученных образцов.

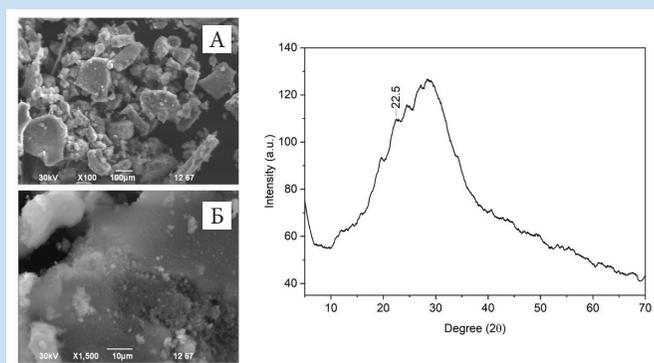


Рис. 2. Микроизображения SEM (А – 100 мкм, В – 10 мкм) и дифрактограмма диоксида кремния.

Сурет 2. Микросуреттер SEM (А – 100 мкм, В – 10 мкм) және кремний диоксиді дифракция үлгісі.

Figure 2. Microimages SEM (A – 100 mkm, B – 10 mkm) and silicon dioxide diffraction pattern.

По результатам анализа EDS синтезированного кремния диоксида образец состоит из ~63% диоксида кремния, а также был зарегистрирован аморфный пик с эквивалентным углом Брэгга при $2\theta = 22,5^\circ$. Пик доказывает, что материал содержит диоксид кремния.

Талица 1

Результаты поэлементного анализа исследуемых проб

Кесте 1

Зерттелетін үлгілердің элементті талдау нәтижелері

Table 1

Results of element-by-element analysis of the studied samples

Наименование пробы	Массовая доля, %									
	<i>F</i>	<i>Na</i>	<i>Se</i>	<i>Br</i>	<i>Rb</i>	<i>Cd</i>	<i>In</i>	<i>Pb</i>	<i>Si</i>	<i>Ge</i>
Отход №3 пробы золотосодержащих отходов	-	-	7,89	38,05	-	-	-	-	14,48	-
Отход №5 пробы редкометаллической руды	<i>F</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>K</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Si</i>	<i>Er</i>
	3,27	4,06	0,45	7,30	4,06	0,34	0,13	1,11	30,93	0,19
Отход №6 пробы золотосодержащей руды	3,07	1,66	0,42	3,23	7,42	0,61	0,03	3,34	33,47	0,35

Для получения геополимерного материала раствор щелочного активатора готовили смешиванием раствора силиката натрия с гранулами $NaOH$ в массовом соотношении 6,69:1,00 в течение ночи до получения мольного соотношения $SiO_2/Na_2O \approx 1,2$. Геополимерную пену готовили по следующей схеме: МК и раствор щелочного активатора смешивали в массовом соотношении 1,00:1,36 с помощью смесителя с большими сдвиговыми усилиями (КА Eurostar 20) при скорости перемешивания 3000 об/мин в течение 4 мин. Затем добавляли H_2O_2 (1,28 мас.% МК) и перемешивание продолжали еще 2 мин при 3000 об/мин. Сформированную пасту отливали в форму колонны из акрилового пластика (высота 10,2 см и внутренний диаметр 4,3 см), закрытую с одного конца. Затем форму поместили в полиэтиленовый пакет и отвердели в печи при температуре 60 °С в течение 4 часов.

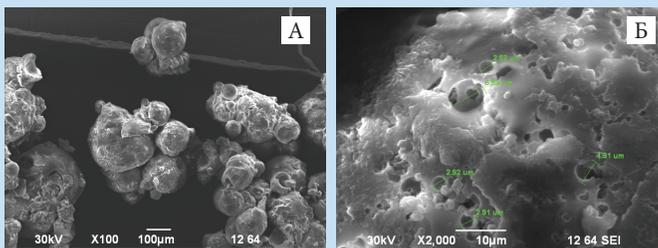


Рис. 3. Микроизображения SEM геополимера (А – 100 мкм, В – 10 мкм).

Сурет 3. Геополимердің SEM микробейнелері (А – 100 мкм, В – 10 мкм).

Figure 3. SEM microimages of polymer (А – 100 mkm, В – 10 mkm).

На рисунке 3 видна пористая структура с неоднородным распределением пор размером от 2.52 до 6.89 мкм. Частицы имеют преимущественно неправильную форму и разный размер. Наблюдаются области с различной плотностью, что может указывать на различные фазы или компоненты в материале. Видны как мелкие частицы, так и более крупные агрегаты. Различные участки изображения указывают на наличие нескольких фаз. Некоторые области выглядят более светлыми, что может свидетельствовать о наличии более плотных или различных по составу фаз. Такие микроструктурные особенности могут отрицательно влиять на механическую прочность материала, особенно в условиях циклического нагружения.

К одним из распространенных компонентов ГМК отходов относится кремний с содержанием от 10 до >50 %. В работе исследованы хвосты редкометаллической руды и золотосодержащей руды для получения полупроводникового материала. Образцы поместили в печь, процесс нагревания в течение 3 часов до температуры 650 °С. Затем отходы извлекли из печи и охладили до комнатной температуры, а затем обработали раствором HCl и в течение 5 часов перемешивали при 80 °С для удаления остаточных металлических примесей из образца. Затем добавляли HF (2,5%) и перемешивание продолжали еще в течение 2 часов при 1200 об/мин при 80 °С. Полученная смесь очищена дистиллированной водой до нейтрализации. Отходы были высушены при 80 °С в течение 24 ч.

Для исследования физико-химических свойств полученных образцов произведен элементный и структурный анализ и структурный анализ.

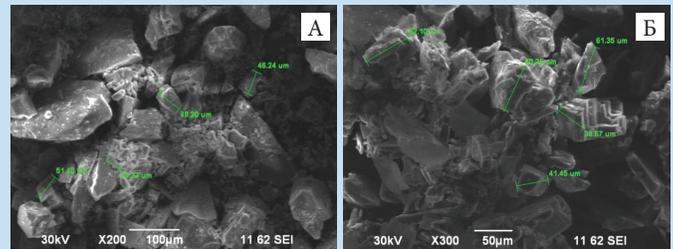


Рис. 4. Микроизображения SEM полученного материала (хвосты редкометаллической руды). А – 100 мкм (содержание кремния 34.61%), В – 50 мкм (содержание кремния 35.67%).

Сурет 4. Алынған материалдың SEM микробейнелері (сирек металл кенінің қалдықтары). А – 100 мкм (кремний мөлшері 34,61%), В – 50 мкм (кремний құрамы 35,67%).

Figure 4. SEM microimages of the resulting material (rare metal ore tailings).

А – 100 mkm (silicon content 34.61%), В – 50 mkm (silicon content 35.67%).

Размер зерен варьируется от 46.24 мкм до 51.40 мкм, что указано на рисунке 4. Зерна выглядят твердыми и плотными, с четко выраженными границами. Визуально можно различить отдельные зерна, но внутри каждого зерна видимых фазовых различий нет. Возможно, зерна представляют собой кристаллические структуры. Поверхность зерен выглядит шероховатой, с наличием мелких неровностей. Видны трещины и сколы на поверхности зерен, что может свидетельствовать о механическом воздействии или процессе разрушения. Наблюдаются трещины и сколы, что указывает на возможные дефекты в структуре зерен. На изображении видны участки с разной степенью плотности, что может свидетельствовать о наличии различных минеральных включений.

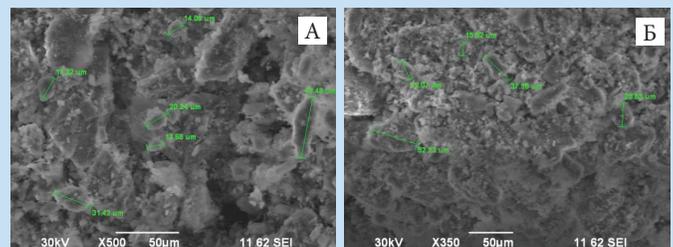


Рис. 5. Микроизображения SEM полученного материала (хвосты золотосодержащей руды). А – 50 мкм (содержание кремния 33.26%), В – 50 мкм (содержание кремния 33.47%).

Сурет 5. Алынған материалдың SEM микросуреттері (алтын кенінің қалдықтары). А – 50 мкм (кремний мөлшері 33,26%), В – 50 мкм (кремний құрамы 33,47%).

Figure 5. SEM microimages of the resulting material (gold ore tailings). А – 50 mkm (silicon content 33.26%), В – 50 mkm (silicon content 33.47%).

Размер пор варьируется от 13.68 мкм до 49.48 мкм, что указано на рисунке 5. Зерна и поры имеют преимущественно неправильную форму, что может быть результатом механического воздействия или условий формирования. Визуально можно различить различные области с разной плотностью, что может указывать на наличие различных фаз или компонентов в материале. В некоторых областях видны мелкие включения, что может свидетельствовать о наличии различных минеральных компонентов.

Фазовый состав отхода исследовали с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре *PANalytical X'Pert Pro* в медном излучении, с использованием программы Pdf2.

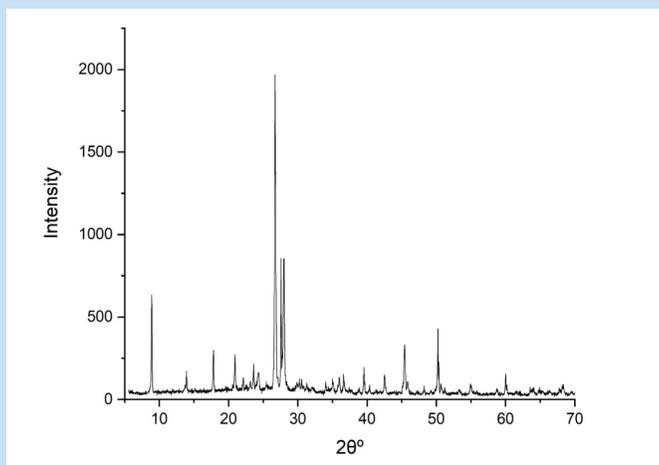


Рис. 6. Дифракционная рентгенограмма полученного материала (хвосты редкометаллической руды).

Сурет 6. Алынған материалдың рентгендік дифракциялық үлгісі (сирек металл кенінің қалдығы).

Figure 6. X-ray diffraction pattern of the resulting material (rare metal ore tailings).

Установлено присутствие на рентгенограмме рефлексов отражения таких кристаллических фаз как диоксид кремния. Основной пик наблюдается около угла $2\theta = 27^\circ$, с интенсивностью около 2000 единиц.

Высокие пики указывают на присутствие кристаллических фаз в материале. Наличие нескольких пиков свидетельствует о сложной фазовой композиции отхода.

Дополнительные пики могут указывать на наличие других минералов, таких как кальцит (CaCO_3) или другие алюмосиликаты.

Выводы

В статье приведен обзор некоторых исследований и новые тенденции переработки отходов. В работе сделан обширный обзор получения из отходов новых материалов: чистых частиц нанопористого кремнезема, функциональных материалов, кремния, различных материалов.

В работе обобщаются данные о переработке различных ГМК отходов, чтобы защитить окружающую среду от вредных веществ и о дальнейшем прогрессивном развитии техногенного мира.

Необходимо систематизировать результаты исследования эффективно выгодным условиям и технико-экономическим эффектам. В области технологий переработки отходов целесообразно переходить на комплексные, композитные технологии, сущность которых заключается в совмещении двух и более отходов в одной продукции, когда использование одного компонента (одного вида отходов) в сочетании с другим компонентом помогает достичь необходимого положительного качества конечной продукции.

Микроструктурные особенности, наблюдаемые на SEM-изображении, указывают на пористую структуру с заметными дефектами, такими как трещины и поры. Это может влиять на механические свойства материала, такие как прочность и устойчивость к нагрузкам. Наличие различных фаз или компонентов также может указывать на сложный процесс формирования материала и его неоднородность.

Рентгеновская дифракция показывает наличие кристаллических фаз, с основным пиком на 27° и несколькими дополнительными пиками. Это указывает на сложный состав материала, включающий различные минеральные компоненты.

Получены новые материалы: наночастицы диоксида кремния из отходов редкометаллической руды, геополимерный материал из золошлаковых отходов, материал, содержащий фазовый электропроводящий состав из отходов редкометаллической и золотосодержащей руды.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21881939).

This research has been is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant №. BR21881939).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tan N. Определение содержания кремния в металлургическом кремниевом рафинированном шлаке с использованием метода химического анализа ступенчатого растворения. / Tan N., Han S., Wei K. et al. // *Silicon*. 2024. Вып. 16. С. 123-132 (на английском языке)
2. He Q. Отделение и переработка элементарного кремния из отходов промышленного кремниевого шлака. / He Q., Zhao H., Qian S. et al. // *Metall Mater Trans B*. 2021. №1. С. 442-453 (на английском языке)
3. Monica Moen, Terje Halvorsen, Knut Mørk, Sjur Velken. Переработка кремниевого металлического порошка из промышленных потоков порошка: отчет о металлическом порошке, 2017, Т. 72, Вып. 3, 182-187 с. (на английском языке)

4. Zoure Karshigina. Извлечение редкоземельных металлов и осажденного диоксида кремния из фосфорных шлаков. / Zoure Karshigina, Zinesh Abisheva, Yelena Bochevskaya, Ata Akcil, Elmira Sargelova. // *Minerals Engineering*. 2015. Т. 77. С. 159-166 (на английском языке)
5. Koen Binnemans. Переработка редкоземельных металлов: критический обзор. / Koen Binnemans, Peter Tom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton, Matthias Buchert. // *Журнал чистого производства*. 2013. Т. 51. С. 1-22 (на английском языке)
6. M. Panayotova, N. Mirdzveli, V. Panayotov. Полезные наночастицы из отходов горнодобывающей промышленности и кислотных дренажных вод. // *Серия конференций IOP: Науки о Земле и окружающей среде*, 2023, №1. – С. 012063 (на английском языке)
7. Daiane R.S. Cruz. Переработка горнодобывающего сырья при синтезе магнитных наноматериалов для удаления нитрофенола и полициклических ароматических углеводородов. / Daiane R.S. Cruz, Iris A.A. Silva, Rhayza V.M. Oliveira, Marco A.P. Buzinaro, Benilde F.O. Costa, Grazielle C. Cunha, Luciane P.C. Romão. // *Chemical Physics Letters*. 2021. Т. 771. № ст. 138482 (на английском языке)
8. Rojin Eghbali. Извлечение марганца из низкосортных отходов и его валоризация путем синтеза наноструктурированного магнитного феррита марганца. / Rojin Eghbali, Parsa Khanmohammadi Hazaveh, Fereshteh Rashchi, Abolghasem Ataie. // *Материаловедение и инженерия: В*. 2021. Т. 269. № ст. 115177 (на английском языке)
9. Hossain Sk S. Недавний прогресс в области нанотехнологий, полученных из шихтеса. Кремнезем: синтез, свойства и применение. / Hossain Sk S., Chang-Jun Bae, Roy P.K. // *Журнал чистого производства*. 2022. Т. 377. С. 134418 (на английском языке)
10. Matinde E. Горно-металлургические отходы: обзор практики переработки и повторного использования. / Matinde E., Simate G.S., Ndlovu, S. // *Журнал Южноафриканского института горного дела и металлургии*. 2018. №118 (8). С. 825-844 (на английском языке)
11. Shuai Rao. Селективное извлечение цинка, галлия и германия из остатков цинкового завода с использованием стадии кислотного и щелочного выщелачивания. / Shuai Rao, Dongxing Wang, Zhiqiang Liu, Kuifang Zhang, Hongyang Cao, Jinzhang Tao. // *Гидрометаллургия*. 2019. Т. 183. С. 38-44 (на английском языке)
12. Farirai F. Методы извлечения кремния и кремния из золы сельскохозяйственных отходов и применение полученного кремния в солнечных элементах: мини-обзор. / Farirai F., Ozonoh M., Aniokele T.C., Eterigho-Ikelegbe O., Mura M., Zeyi B., Daramola M.O. // *Международный журнал устойчивой инженерии*. 2020. №14 (1). С. 57-78 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Tap N. Екі сатылы ерітілген химиялық талдау әдісімен металлургиялық дәрежедегі кремний тазартылған шлактағы кремний құрамын анықтау. / Tap N., Han S., Wei K. және т.б. // *Silicon*. 2024. Шығ. 16. Б. 123-132 (ағылшын тілінде)
2. He Q. Өнеркәсіптік кремний шлактарынан элементтік кремнийді бөлу және қайта өңдеу. / He Q., Zhao H., Qian S. және т.б. // *Metall Mater Trans B*. 2021. №1. Б. 442-453 (ағылшын тілінде)
3. Monica Moen, Terje Halvorsen, Knut Mørk, Sjur Velken. Өнеркәсіптік ұнтақ қалдықтарынан алынған кремний металл ұнтағын қайта өңдеу: металл ұнтағы туралы есеп, 2017, Т. 72, Шығ. 3, 182-187 б. (ағылшын тілінде)
4. Zoure Karshigina. Фосфор шлағынан сирек жер металдары мен тұндырылған кремний диоксидін қалпына келтіру. / Zoure Karshigina, Zinesh Abisheva, Yelena Bochevskaya, Ata Akcil, Elmira Sargelova. // *Минералдар инженериясы*. 2015. Т. 77. Б. 159-1608 (ағылшын тілінде)
5. Koen Binnemans. Сирек жерді қайта өңдеу: сыни шолу. / Koen Binnemans, Peter Tom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton, Matthias Buchert. // *Таза өндіріс журналы*. 2013. Т. 51. Б. 1-22 (ағылшын тілінде)
6. M. Panayotova, N. Mirdzveli, V. Panayotov. Тау-кен қалдықтары мен қышқыл шахта дренажынан алынған пайдалы нанобөлшектер. // *IOP конференциялар сериясы: Жер және қоршаған орта туралы ғылым*, 2023, №1. – Б. 012063 (ағылшын тілінде)
7. Daiane R.S. Нитрофенол мен полициклді ароматты көмірсутектерді жоюға арналған магниттік наноматериалдарды синтездеу кезінде тау-кен қалдықтарын қайта өңдеу. / Daiane R.S. Cruz, Iris A.A. Silva, Rhayza V.M. Oliveira, Marco A.P. Buzinaro, Benilde F.O. Costa, Grazielle C. Cunha, Luciane P.C. Romão. // *Chemical Physics Letters*. 2021. Шығ. 771. мақ. №138482 (ағылшын тілінде)
8. Rojin Eghbali, Parsa Khanmohammadi Hazaveh, Fereshteh Rashchi, Abolghasem Ataie. Марганецті төмен сұрыпты қалдықтардан қалпына келтіру және наноқұрылымды магниттік марганец

ферритін синтездеу арқылы валоризация. / Rojin Eghbali, Parsa Khanmohammadi Hazaveh, Fereshteh Rashchi, Abolghasem Ataie. // *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Шығ. 269. мақ. №115177 (ағылшын тілінде)

9. Hossain Sk S. Нано кремнийден алынған қалдықтардың соңғы барысы: Синтез, қасиеттері және қолдану. / Hossain Sk S., Chang-Jun Bae, Roy P.K. // *Таза өндіріс журналы*. 2022. Т. 377. Б. 134418 (ағылшын тілінде)
10. Matinde E. Тау-кен және металлургиялық қалдықтар: қайта өңдеу және қайта пайдалану тәжірибесіне шолу. / Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. *Оңтүстік Африка тау-кен және металлургия институтының журналы*. 2018. №118 (8). Б. 825-844 (ағылшын тілінде)
11. Shuai Rao. Екі сатылы қышқылды және сілтілі сілтісіздендіруді қолдана отырып, мырыш, галлий және германийді мырыш өңдеу зауытының қалдықтарынан іріктен алу. / Shuai Rao, Dongxing Wang, Zhiqiang Liu, Kuifang Zhang, Hongyang Cao, Jinzhang Tao. // *Гидрометаллургия*. 2019. Т. 183. Б. 38-44 (ағылшын тілінде)
12. Farirai F. Ауылшаруашылық қалдықтарынан кремний мен кремнийді алу және алынған кремнийді күн батареяларында қолдану әдістері: шағын шолу. / Farirai F., Ozonoh M., Aniokete T.C., Eterigho-Ikelegbe O., Mupa M., Zeyi B., Daramola M.O. // *International Journal of Sustainable Engineering*. 2020. №14(1). Б. 57-78 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Tan N. Determination of Silicon Content in Metallurgical-Grade Silicon Refined Slag using Two-Step Dissolution Chemical Analysis Method. / Tan N., Han S., Wei K. et al. // *Silicon*. 2024. Vol. 16. P. 123-132 (in English)
2. He Q. Separating and Recycling of Elemental Silicon from Wasted Industrial Silicon Slag. / He Q., Zhao H., Qian S. et al. // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021. №1. P. 442-453 (in English)
3. Monica Moen, Terje Halvorsen, Knut Mørk, Sjur Velken, Recycling of silicon metal powder from industrial powder waste streams: Metal Powder Report, 2017, Vol. 72, Issue 3, 182-187 p. (in English)
4. Zaurе Karshigina. Recovery of rare earth metals and precipitated silicon dioxide from phosphorus slag. / Zaurе Karshigina, Zinesh Abisheva, Yelena Bochevskaya, Ata Akcil, Elmira Sargelova. // *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 77. P. 159-166 (in English)
5. Koen Binnemans. Recycling of rare earths: a critical review. / Koen Binnemans, Peter Tom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton, Matthias Buchert. // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 51. P. 1-22 (in English)
6. M. Panayotova, N. Mirdzveli, V. Panayotov. Useful nanoparticles from mining waste and acid mine drainage. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, №1. – P. 012063 (in English)
7. Daiane R.S. Cruz. Recycling of mining waste in the synthesis of magnetic nanomaterials for removal of nitrophenol and polycyclic aromatic hydrocarbons. / Daiane R.S. Cruz, Iris A.A. Silva, Rhayza V.M. Oliveira, Marco A.P. Buzinaro, Benilde F.O. Costa, Grazielle C. Cunha, Luciane P.C. Romão. // *Chemical Physics Letters*. 2021. Vol. 771. art. №138482 (in English)
8. Rojin Eghbali. Recovery of manganese from a low-grade waste and valorization via the synthesis of a nanostructured magnetic manganese ferrite. / Rojin Eghbali, Parsa Khanmohammadi Hazaveh, Fereshteh Rashchi, Abolghasem Ataie. // *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Vol. 269. art. №115177 (in English)
9. Hossain Sk S. Recent progress of wastes derived nano-silica: Synthesis, properties, and applications. / Hossain Sk S., Chang-Jun Bae, Roy P.K. // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 377. P. 134418 (in English)
10. Matinde E. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. / Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. №118 (8). P. 825-844 (in English)
11. Shuai Rao. Selective extraction of zinc, gallium, and germanium from zinc refinery residue using two stage acid and alkaline leaching. / Shuai Rao, Dongxing Wang, Zhiqiang Liu, Kuifang Zhang, Hongyang Cao, Jinzhang Tao. // *Hydrometallurgy*. 2019. Vol. 183. P. 38-44 (in English)
12. Farirai F. Methods of extracting silica and silicon from agricultural waste ashes and application of the produced silicon in solar cells: a mini-review. / Farirai F., Ozonoh M., Aniokete T.C., Eterigho-Ikelegbe O., Mupa M., Zeyi B., Daramola M.O. // *International Journal of Sustainable Engineering*. 2020. №14 (1). P. 57-78 (in English)

Сведения об авторах:

Бейсебаева А.С., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), a.s.beisebayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0004-6097-5384>

Жарылкан С.М., магистр, МНС лаборатории инженерного профиля, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), saulzharylkan0708@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-1600-2115>

Есжан Е.Н., магистр, МНС лаборатории инженерного профиля, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), yelriza.yezhan@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4523-1211>

Азат С., PhD, ассоциированный профессор, зав. лаб. инженерного профиля, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), a.seitkhan@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>

Авторлар туралы мәліметтер:

Бейсебаева А.С., физика-математика ғылым кандидаты, «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының доценті Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Жарылкан С.М., магистр, инженерлік-бейінді зертханасының КФК, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Есжан Е.Н., магистр, инженерлік-бейінді зертханасының КФК, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Азат С., PhD, қауымдастырылған профессор, инженерлік-бейінді зертханасының меңгерушісі Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Beisebayeva A.S., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of «Materials Science, Nanotechnology and Engineering Physics» (Almaty, Kazakhstan)

Zharylkan S.M., master Junior Researcher, Engineering Laboratory (Almaty, Kazakhstan)

Yezhan Y.N., master Junior Researcher, Engineering Laboratory (Almaty, Kazakhstan)

Azat S., PhD, associate professor, Satpayev university, head of engineering laboratory (Almaty, Kazakhstan)



GO DIGITAL
EURASIA

Конференция + выставка в
формате живого общения
16-17 октября 2024

Smartgopro