ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



*Научная статья*

# Повышение качества цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья на основе применения направленных энергетических воздействий

**К.К.РАЗМАХНИН ✉, А.Н.ХАТЬКОВА, Л.В.ШУМИЛОВА**

*Забайкальский государственный университет, Чита, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В. Повышение качества цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья на основе применения направленных энергетических воздействий // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 129-139. EDN VNPZCT

***Аннотация.*** Приведены результаты исследований по изучению возможности применения направленного воздействия ускоренными электронами на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья для повышения эффективности отделения цеолитов от породообразующих минералов методом электромагнитной сепарации. Анализируется эффективность вскрытия цеолитовых минералов с применением воздействия потоком ускоренных электронов. Отражены результаты сухой электромагнитной сепарации цеолитсодержащих пород, установлены зависимости извлечения железосодержащих минералов из цеолитсодержащих пород электромагнитной сепарацией от напряженности магнитного поля при различных классах крупности. Определены основные методы обогащения и рудоподготовки цеолитсодержащих пород. Представлена технологическая схема переработки цеолитсодержащих пород, основанная на применении обработки ускоренными электронами на стадии рудоподготовки, обеспечивающая существенное повышение качества цеолитовой продукции.

***Ключевые слова*:** цеолитсодержащие породы; обогащение; ускоренные электроны; адсорбционная способность; повышение качества; горнопромышленные отходы

***Благодарность.*** Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022-2023).

***Поступила: 20.05.2022*** ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 30.10.2023*** ***Опубликована: 29.02.2024***

**Введение.** Интенсивное развитие горной промышленности сопровождается применением технологий, при которых образуется значительное количество техногенных отходов, не подлежащих утилизации и переработке [1, 2]. Происходит накопление значительных объемов отвальных пород и хвостов обогащения, что определяет возникновение серьезных экономических и экологических проблем в районах их размещения [3, 4]. Основное количество отвалов горных пород и хвостохранилищ, являющихся наследием 1990-х и 2000-х годов, не имеет хозяйствующего субъекта и в совокупности с вновь образованными отходами горнопромышленного комплекса наносит значительный ущерб окружающей среде [5, 6].

Решение проблемы негативного влияния отходов горноперерабатывающей промышленности на окружающую среду лежит в плоскости использования эффективных инструментов управления техногенным сырьем [7, 8]. К ним относится внедрение наилучших доступных технологий и материалов, способных снизить содержание токсичных и радиоактивных элементов в отходах, предотвратить или существенно сократить количество выбросов пыли и газа от них, а также восстановить нарушенные за счет антропогенного воздействия земли с соблюдением принципов сохранения минерально-сырьевых ресурсов, рациональности и комплексности их использования [9, 10].

Одним из наиболее эффективных инструментов многоцелевого назначения при реализации мероприятий природоохранного характера являются сорбенты, обладающие набором необходимых



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Отозвана

свойств, в первую очередь адсорбционных [11, 12]. Среди сорбентов природного происхождения существенно эффективны цеолитсодержащие породы (ЦСП), доступные как по ресурсам, так и по стоимости [13, 14]. Уникальные сорбционные и ионообменные свойства природных цеолитов в полной мере могут эффективно использоваться в системах управления отходами горного производства [15].

В настоящее время ЦСП применяются в основном при закладке выработанного пространства (шахт, карьеров) с использованием пустых пород и минерального сырья хвостохранилищ, а также при отсыпке автодорог технического назначения [14, 15]. Потенциал природных цеолитов, с учетом их уникальных свойств, позволяет определить эффективные подходы к их применению в системах обращения с отходами горного производства для существенной минимизации и предотвращения негативного влияния техногенных образований на окружающую среду [16, 17]. К числу таких задач относятся очистка отходящих газов, сточных и оборотных вод, рекультивация и консервация хвостохранилищ и отвальных пород, захоронение токсичных и радиоактивных отходов [18, 19].

Основной причиной ограниченности применения цеолитсодержащих пород является относительно низкое качество минерального сырья (содержание минералов цеолита от 35 до 60 %) при значительных запасах, а также существующие требования промышленности к качеству природных цеолитов, в том числе гармонизированные с международными и связанные с членством России в различных торговых организациях, в соответствии с которыми содержание примесей в цеолитовых продуктах должно составлять не более 1-3 % [20, 21]. Подавляющая часть запасов цеолитсодержащих пород России представлена средне- и низкокачественными рядовыми породами, содержащими высокий процент породообразующих минералов (основные – кварц, полевые шпаты и оксиды железа), что ограничивает возможность широкого применения данного вида сырья [22, 23]. Возникает необходимость разработки эффективных технологий обогащения и модификации цеолитсодержащих пород для получения цеолитовых продуктов, которые позволят более рационально подойти к решению многогранной проблемы комплексного использования, утилизации, обезвреживания и переработки отходов горного производства, с одной стороны, и созданию технологий управления физико-химическими свойствами природных цеолитов для получения продукции высокого качества – с другой [24, 25].

Ранее проведенными исследованиями [20, 26] установлено, что применение предварительного воздействия ускоренными электронами на минеральное сырье является достаточно эффективным методом направленного изменения его физико-химических и механических свойств, обеспечивающим снижение прочностных характеристик руд, повышение их селективной дезинтеграции, а также значительное сокращение продолжительности последующих рудоподготовительных операций (измельчение). Воздействие ускоренными электронами способствует селективному раскрытию сростков минералов и повышает эффективность последующего обогащения руд [20, 27].

Обогатимость ЦСП зависит от сходства и различия технологических свойств цеолитовых и породообразующих минералов, их текстуры и структуры, а также от минеральных форм железа и кремнезема, которые содержатся в породах в виде изоморфных включений, и собственных минералов [20, 28]. Необходимость применения воздействия ускоренными электронами и определение оптимальных режимов радиационной обработки заключаются в направленном изменении свойств ЦСП Восточного Забайкалья для повышения эффективности их очистки от породообразующих минералов, в частности, методом магнитной сепарации и увеличения адсорбционной способности минералов цеолитов (клиноптилолита, морденита, шабазита) [20, 29].

Методическая и теоретическая основы исследований в данной области науки заложены в трудах известных отечественных ученых [26, 30]. Целью работы является изучение возможности применения энергетических воздействий для существенного повышения качества цеолитсодержащих пород и получения цеолитовой продукции с высокими сорбционными свойствами.

**Методы.** В качестве объектов исследований использованы монтмориллонит-клиноптилолитсодержащие породы Шивыртуйского, клиноптилолитсодержащие породы Холинского и шабазитсодержащие породы Талан-Гозагорского месторождений. Методика проведения исследований включала воздействие на ЦСП ускоренными электронами в ускорителе электронов ИЛУ, разработанном в Институте ядерной физики СО РАН.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 265. С. 129-139
© К.К.Размахнин, А.Н.Хатькова, Л.В.Шумилова, 2024

ЦСП подавались в ускоритель посредством бункера-дозатора и транспортера, где подвергались воздействию пучком ускоренных электронов. Величина дозы облучения варьировалась от 2 до 5 кГр. Измерения мессбауэровских спектров осуществлялись на спектрометре Ms-1104Em. Крупность исследуемых пород в пробах составляла 0,05-0,07 мм при массе навесок 50-70 мг. Обработка мессбауэровских спектров проводилась в программе Univem MS. Термические исследования ЦСП Восточного Забайкалья после обработки ускоренными электронами велись в атмосфере аргона в диапазоне температур 20-1400 °С на установке STA 449C (Германия). Определение теплоемкости осуществлялось в диапазоне 40-400 °С по базовой линии, стандарту (сапфир) и образцу.

Определение коэффициента раскрытия минералов цеолита осуществлялось с применением оптической микроскопии после измельчения в лабораторной шаровой мельнице МШЛ в двух режимах – обычное измельчение ЦСП и с предварительной обработкой ускоренными электронами. Полученные данные подвергались математической обработке с построением соответствующих функций и графиков. Электромагнитная сепарация ЦСП проводилась на электромагнитном сепараторе 138-СЭ и сепараторе с изодинамическим полем высокой напряженности СИМ-1 (класс крупности 0,1 мм). При проведении исследований применялись гранулометрический, минералогический, химический и фазовый рентгенографический анализы, использовалась ИК-спектроскопия, растровая электронная микроскопия и оптико-геометрический анализ изображений.

Исследование ЦСП проводилось с применением аналитического электронного микроскопа Jeol-5300 с энергодисперсионной приставкой Link-ISIS, позволяющей определить химический состав входящих в ЦСП минералов. Минеральный состав ЦСП исследован путем количественного рентгенофазового анализа с применением дифрактометра АДРОН-1. Исследование минералогических характеристик ЦСП включало определение минерального состава с установлением особенностей включения минералов цеолита и их срастания с породообразующими минералами, свойств входящих в состав пород минералов, извлеченных посредством применения направленной рудоподготовки в комбинации с классическими методами обогащения (гравитационными, магнитными и электрическими).

Посредством оптической микроскопии определены текстурно-структурные характеристики ЦСП Восточного Забайкалья, выявлены особенности их фазового состава, исследованы свойства и формы входящих в состав минералов, установлен характер их раскрытия. Для рентгенографического анализа использовался дифрактометр АДП-1,5. Технологическая оценка ЦСП, изучение характера распределения в них и продуктах их переработки минералов осуществлялись путем анализа изображений, базирующегося на методике оптико-геометрического исследования с применением комплекса «Видео-Мастер».

Железосодержащие минералы, входящие в состав ЦСП Восточного Забайкалья, находятся в виде механических микровключений и изоморфных примесей, поэтому для их анализа применялась мессбауэровская спектроскопия (ЯГРС). Сорбционные характеристики ЦСП изучались посредством метода адсорбции азота на приборе ASAP-2400 (США) при 77 К.

**Обсуждение результатов.** Данные химического анализа ЦСП месторождений Восточного Забайкалья представлены в табл.1. Основные компоненты ЦСП: $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$, оксиды магния, натрия и калия. Результаты определения коэффициента раскрытия минералов цеолитов при измельчении ЦСП исследуемых месторождений без радиационного воздействия и с воздействием приведены на рис.1. Крупность пород после измельчения определялась кривыми 1 и 2, крупность минералов цеолитов выражается кривыми 3 и 4, коэффициент раскрытия минералов цеолитов определяется отношением площадей под функциями.

Установлено, что посредством использования направленного воздействия ускоренными электронами перед измельчением в диапазоне малых доз (2-4 кГр) увеличивается коэффициент раскрытия минералов клиноптилолита Шивыртуйского месторождения с 38 до 54 % и шабазита Талан-Гозагорского месторождения с 46 до 62 %, что подтверждает эффективность данного метода рудоподготовки. Получены функции зависимости извлечения от крупности минеральных частиц при измельчении ЦСП Восточного Забайкалья, позволяющие определить увеличение значений коэффициента раскрытия минералов цеолита при предварительной обработке ускоренными электронами:



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© К.К.Размахнин, А.Н.Хатькова, Л.В.Шумилова, 2024

*Таблица 1*

**Химический состав ЦСП Восточного Забайкалья**

| Компоненты | Среднее содержание компонентов в месторождениях, % | | |
|---|---|---|---|
| | Шивыртуйское | Холинское | Талан-Гозагорское |
| $SiO_2$ | 62,90 | 65,62 | 53,12 |
| $P_2O_5$ | 0,08 | 0,0004 | 0,33 |
| $Al_2O_3$ | 13,61 | 12,21 | 16,63 |
| $TiO_2$ | 0,34 | 0,07 | 1,50 |
| $Fe_2O_3$ | 3,00 | 1,25 | 11,40 |
| FeO | 0,14 | 0,06 | 0,32 |
| CaO | 0,61 | 2,07 | 5,82 |
| MgO | 1,51 | 0,64 | 1,97 |
| $Na_2O$ | 1,36 | 1,90 | 3,45 |
| $K_2O$ | 4,04 | 4,14 | 1,78 |
| $S_{общ}$ | 0,007 | 0,016 | 0,041 |
| MnO | 0,11 | 0,14 | 0,08 |
| $H_2O$ | 3,88 | 3,82 | 1,08 |
| п.п.п. | 8,173 | 8,0636 | 2,479 |

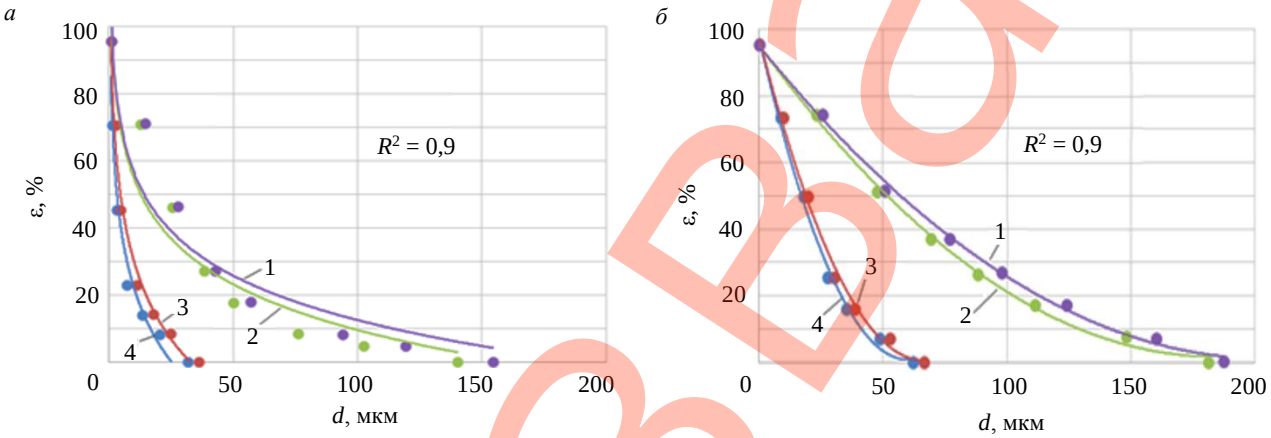



Рис.1. Влияние воздействия ускоренными электронами на гранулометрический состав ЦСП (1, 2), минералов цеолитов в них (3, 4) и на коэффициент раскрытия цеолитов (клиноптилолита и шабазита): *а* – измельчение без обработки ускоренными электронами; *б* – измельчение с обработкой при дозе 2 кГр

• измельчение без обработки ускоренными электронами – ЦСП Шивыртуйского месторождения, крупность измельченной породы $y = -24{,}08\ln(x) + 77{,}6$, крупность цеолита в измельченной породе $y = -19{,}67\ln(x) + 100{,}1$; ЦСП Талан-Гозагорского месторождения, крупность измельченной породы $y = -19{,}13\ln(x) + 100{,}5$, крупность цеолита в измельченной породе $y = -25{,}46\ln(x) + 88{,}7$;

• измельчение с обработкой ускоренными электронами – ЦСП Шивыртуйского месторождения, крупность измельченной породы $y = 0{,}027x^2 - 3{,}2307x + 97{,}4$, крупность цеолита в измельченной породе $y = 0{,}0223x^2 - 2{,}9383x + 97{,}5$; ЦСП Талан-Гозагорского месторождения, крупность измельченной породы $y = 0{,}0028x^2 - 1{,}0157x + 95{,}2$, крупность цеолита в измельченной породе $y = 0{,}0022x^2 - 0{,}9164x + 95$.

На рис.2 приведены зависимости изменения теплоемкости исходного и обработанных ЦСП Талан-Гозагорского месторождения от температуры. Установлено, что воздействие ускоренными электронами на ЦСП оказывает существенное влияние на данный параметр.

Результаты измерения теплоемкости исходных и подвергшихся обработке ускоренными электронами ЦСП Шивыртуйского месторождения позволили установить, что начальная теплоемкость исходных и подвергшихся воздействию ускоренными электронами цеолитсодержащих пород имеет идентичные значения (1,6 Дж/г) с максимумом при температуре 130 °С. Максимальное значение абсолютной величины теплоемкости ЦСП Шивыртуйского месторождения существенно ниже по сравнению с ЦСП Талан-Гозагорского месторождения, теплоемкость которых составляет 2,3 Дж/г, что объясняется более высоким содержанием гематита в породах Талан-Гозагорского месторождения.

ОЗ ВГТУ


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 265. С. 129-139
© К.К.Размахнин, А.Н.Хатькова, Л.В.Шумилова, 2024

Анализ мессбауэровской спектроскопии исходных и подвергшихся воздействию ускоренными электронами ЦСП Талан-Гозагорского месторождения показал, что секстеты соответствуют гематиту, а дублеты – монтмориллониту (табл.2).

Воздействие ускоренными электронами на ЦСП оказывает существенное влияние на уменьшение доли тонкодисперсного гематита и увеличение крупнокристаллического. Установлено, что воздействие ускоренными электронами приводит к повышению содержания железа в ЦСП за счет удаления летучих компонентов, изменению величины резонансного эффекта, связанного с общим содержанием железа.

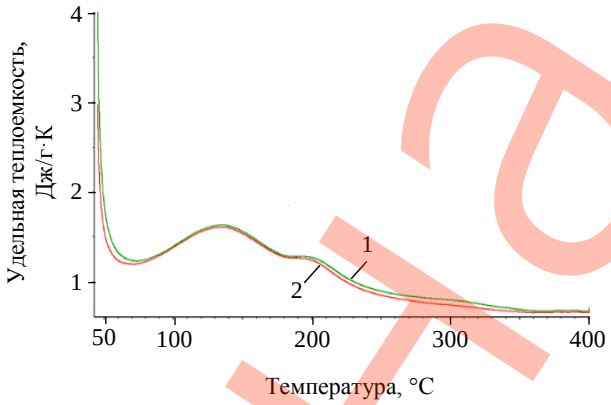



Рис.2. Зависимость теплоемкости ЦСП Талан-Гозагорского месторождения от температуры
1 – исходных; 2 – после воздействия ускоренными электронами

*Таблица 2*

**Результаты мессбауэровских исследований ЦСП Восточного Забайкалья**

| ЦСП | Компонента спектра | Изомерный сдвиг δ, мм/с | Магнитные поля на ядрах $Fe^{57}$Н, кЭ | Площадь компонент *S*, % | Величина эффекта ε, % | Интерпретация |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Талан-Гозагорское месторождение, исходные | С1($Fe^{3+}$) | 037 | 512 | 55,9 | 3,185 | Гематит |
| | С2($Fe^{3+}$) | 0,39 | 491 | 18,4 | | |
| | С3($Fe^{3+}$) | 0,36 | 362 | 0,6 | | Гетит-гидрогетит |
| | Д1($Fe^{3+}$) | 0,38 | 0 | 10,1 | | Монтмориллонит, |
| | Д2($Fe^{3+}$) | 0,38 | 0 | 15,0 | | гидрослюды |
| Талан-Гозагорское месторождение, обработанные | С1($Fe^{3+}$) | 0,37 | 512 | 51,4 | 3,262 | Гематит |
| | С2($Fe^{3+}$) | 0,37 | 492 | 24,5 | | |
| | С3($Fe^{3+}$) | 0,36 | 362 | 1,5 | | Гетит-гидрогетит |
| | Д1($Fe^{3+}$) | 0,38 | 0 | 9,4 | | Монтмориллонит, |
| | Д2($Fe^{3+}$) | 0,36 | 0 | 13,2 | | гидрослюды |
| Шивыртуйское месторождение, исходные | С1($Fe^{3+}$) | 037 | 513 | 6,8 | 1,069 | Гематит |
| | Д1($Fe^{2+}$) | 1,16 | 0 | 1,8 | | Оливин |
| | Д2($Fe^{2+}$) | 1,07 | 0 | 4,5 | | Хлорит |
| | Д3($Fe^{3+}$) | 0,43 | 0 | 7,7 | | Монтмориллонит, |
| | Д4($Fe^{3+}$) | 0,37 | 0 | 12,8 | | гидрослюды |
| | Д5($Fe^{3+}$) | 0,37 | 0 | 66,4 | | |
| Шивыртуйское месторождение, обработанные | С1($Fe^{3+}$) | 0,37 | 512 | 5,5 | 1,250 | Гематит |
| | Д1($Fe^{2+}$) | 1,16 | 0 | 1,7 | | Оливин |
| | Д2($Fe^{2+}$) | 1,07 | 0 | 4,4 | | Хлорит |
| | Д3($Fe^{3+}$) | 0,41 | 0 | 9,3 | | Монтмориллонит, |
| | Д4($Fe^{3+}$) | 0,37 | 0 | 7,6 | | гидрослюды |
| | Д5($Fe^{3+}$) | 0,37 | 0 | 71,5 | | |

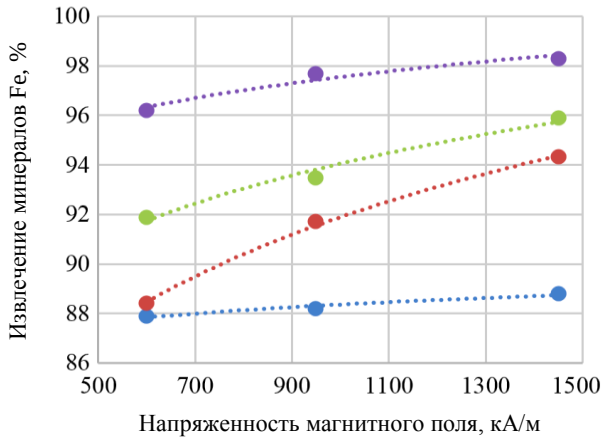
Определено, что воздействие ускоренными электронами на ЦСП интенсифицирует процесс раскрытия сростков и разделения цеолитовых и породообразующих минералов. Наибольший эффект изменения технологических свойств ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений наблюдается в диапазоне малых доз воздействия ускоренными электронами – 2-4 кГр. При обработке ЦСП потоком ускоренных электронов в режиме невысоких плотностей тока достигается образование дефектов в них. С дальнейшим повышением величины поглощенной энергии (от 1 до 10 Дж/г) аккумулируется заряд, который определяет возникновение электрических пробоев в ЦСП. В данном случае разряд имеет пульсирующий характер, что приводит к возникновению систем микротрещин [21, 26], обуславливающих значительное разупрочнение пород, в частности по границам срастания минералов цеолитов и породообразующих минералов, определяя эффективность последующей селективной дезинтеграции [30, 31].

ОТЗЫВ



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

*а*




*б*

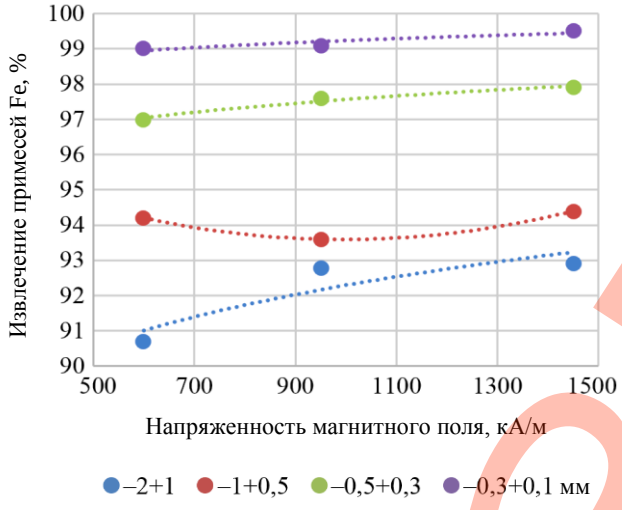



Рис.3. Зависимость извлечения железосодержащих минералов из ЦСП Шивыртуйского (*а*) и Талан-Гозагорского (*б*) месторождений от напряженности магнитного поля при различных классах крупности

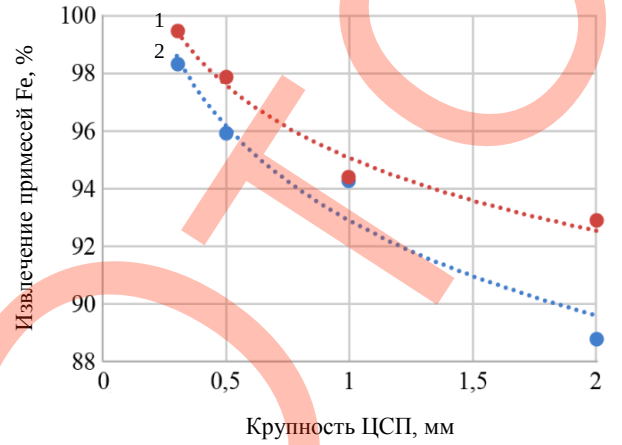



Рис.4. Зависимость извлечения железосодержащих минералов электромагнитной сепарацией от крупности ЦСП
1 – Талан-Гозагорское месторождение; 2 – Шивыртуйское

Выявлено, что воздействие ускоренными электронами на ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений существенно изменяет гранулометрический состав при их измельчении и позволяет более селективно раскрывать минералы цеолитов (клиноптилолита и шабазита), в значительной степени интенсифицируя последующие процессы магнитной и электростатической сепараций. Расход электроэнергии составил 0,6 кВт·ч/т. Применение радиационной обработки в качестве операции рудоподготовки в сочетании с методами электромагнитной и электростатической сепараций способствует снижению содержания железосодержащих минералов в концентратах для ЦСП Шивыртуйского месторождения с 3,14 до 0,36 %, для ЦСП Талан-Гозагорского месторождения с 11,2 до 0,12 %. Радиационная обработка определяет увеличение содержания крупнокристаллического гематита и увеличение показателя магнитной восприимчивости гематита с $14\text{-}25\cdot10^{-8}$ до $460\text{-}660\cdot10^{-8}$ м$^3$/кг, что характеризует эффективное применение электромагнитной сепарации при обогащении ЦСП.

При анализе результатов исследований, полученных при обработке ЦСП Восточного Забайкалья ускоренными электронами, получены технологические зависимости, представленные на рис.3, 4. Коэффициент детерминации для установленных зависимостей составил 0,9. На рис.3, *а* приведена зависимость извлечения железосодержащих минералов из ЦСП Шивыртуйского месторождения от напряженности магнитного поля при различных классах крупности. Установленная зависимость извлечения железосодержащих минералов из ЦСП Талан-Гозагорского месторождения от напряженности магнитного поля при различных классах крупности приведена на рис.3, *б*.

На рис.4 приведена зависимость извлечения железосодержащих минералов электромагнитной сепарацией от крупности ЦСП при обработке ускоренными электронами.

Зависимости извлечения железосодержащих минералов из ЦСП, подвергшихся обработке ускоренными электронами, от напряженности магнитного поля сепаратора при различных классах крупности (см. рис.3) определены следующими функциями. ЦСП Шивыртуйского месторождения: $y = 1{,}015\ln(x) + 81{,}35$ (класс крупности –2+1 мм), $y = 6{,}693\ln(x) + 45{,}65$

ОТОЗВАНО


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 265. С. 129-139
© К.К.Размахнин, А.Н.Хатькова, Л.В.Шумилова, 2024

(класс крупности –1+0,5 мм), $y = 4{,}518\ln(x) + 62{,}84$ (класс крупности –0,5+0,3 мм), $y = 2{,}393\ln(x) + 81{,}02$ (класс крупности –0,3+0,1 мм); ЦСП Талан-Гозагорского месторождения: $y = 2{,}5232\ln(x) + 74{,}86$ (класс крупности –2+1 мм), $y = 4E - 06x2 - 0{,}01x + 97{,}45$ (класс крупности –1+0,5 мм), $y = 1{,}0241\ln(x) + 90{,}49$ (класс крупности –0,5+0,3 мм), $y = 0{,}561\ln(x) + 95{,}35$ (класс крупности –0,3+0,1 мм).

Изучение зависимости содержания железосодержащих минералов от крупности обработанных ускоренными электронами ЦСП (после магнитной сепарации) показало, что с увеличением крупности пород с 0,07 до 0,1 мм возрастает содержание в них Fe: ЦСП Шивыртуйского месторождения – с 0,35 до 0,85 %; ЦСП Талан-Гозагорского месторождения – с 0,1 до 1,1 %. Определены зависимости извлечения железосодержащих минералов из ЦСП от крупности пород (рис.4), описываемые следующими функциями (после обработки потоком ускоренных электронов): $y = -3{,}647\ln(x) + 95{,}07$ (ЦСП Шивыртуйского месторождения), $y = -4{,}74\ln(x) + 92{,}89$ (ЦСП Талан-Гозагорского месторождения).

Исследования возможности извлечения железосодержащих минералов из тонкодисперсных ЦСП Восточного Забайкалья крупностью –0,1+0,074 мм методом магнитной сепарации в изодинамическом поле, после обработки ускоренными электронами, позволили получить зависимости содержания примесей железа в цеолитовых (немагнитных) продуктах от их крупности. Определены соответствующие функции, характеризующие параметры полученной зависимости: $y = 6{,}539x + 1{,}3262$ (ЦСП Шивыртуйского месторождения); $y = 30{,}385x - 0{,}2685$ (ЦСП Талан-Гозагорского месторождения).

Выявлено, что радиационная обработка потоком ускоренных электронов ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений повышает извлечение из них железосодержащих минералов электромагнитной сепарацией до 98,3 и 99,5 % соответственно. Это обеспечивает получение высокачественных цеолитовых продуктов, которые могут быть использованы в различных отраслях промышленности и в технологиях по управлению отходами горного производства. Наибольший эффект достигается при напряженности магнитного поля сепаратора 1450 кА/м и при крупности ЦСП –0,3+0,1 мм (табл.3). Обогащение ЦСП в изодинамическом поле характеризуется высокими показателями извлечения примесей железа при крупности 0,1 мм (табл.4).

*Таблица 3*

**Результаты сухой электромагнитной сепарации ЦСП Восточного Забайкалья крупностью –2+0,1 мм**

| Месторождение | Класс крупности, мм | Среднее содержание примесей Fe в исходном материале, % | Содержание цеолитов в продукте, % | Содержание минералов Fe в цеолитовом продукте, % | Содержание иных примесей, % | Выход, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Шивыртуйское | –2+1 | 3,14 | 73,50 | 1,78 | 24,72 | 9,4 |
| | –1+0,5 | | 84,20 | 1,11 | 14,69 | 18,4 |
| | –0,5+0,3 | | 85,90 | 0,88 | 13,22 | 27,7 |
| | –0,3+0,1 | | 88,90 | 0,36 | 10,74 | 44,5 |
| Талан-Гозагорское | –2+1 | 11,2 | 70,10 | 8,17 | 21,73 | 8,8 |
| | –1+0,5 | | 75,20 | 3,74 | 21,06 | 17,1 |
| | –0,5+0,3 | | 84,90 | 1,08 | 14,02 | 23,2 |
| | –0,3+0,1 | | 89,60 | 0,12 | 10,28 | 50,9 |

*Таблица 4*

**Результаты сухой электромагнитной сепарации тонкодисперсных ЦСП в изодинамическом поле**

| Месторождение | Напряженность магнитного поля, кА/м | Сила тока, А | Класс крупности, мм | Извлечение минералов Fe из магнитного продукта, % | Массовая доля Fe в магнитном продукте | Выход, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Шивыртуйское | 600 | 0,50 | –0,1+0,074 | 89,7 | 92,4 | 44,7 |
| | | | –0,074+0,05 | 96,4 | 94,4 | 55,3 |
| | 950 | 1,0 | –0,1+0,074 | 93,3 | 95,6 | 47,5 |
| | | | –0,074+0,05 | 97,9 | 96,2 | 52,5 |
| | 1450 | 1,57 | –0,1+0,074 | 95,4 | 96,7 | 49,8 |
| | | | –0,074+0,05 | 98,2 | 97,1 | 50,2 |



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Отозвано

Окончание табл.4

| Месторождение | Напряженность магнитного поля, кА/м | Сила тока, А | Класс крупности, мм | Извлечение минералов Fe из магнитного продукта, % | Массовая доля Fe в магнитном продукте | Выход, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Талан-Гозагорское | 600 | 0,50 | –0,1+0,074 | 98,7 | 96,3 | 49,6 |
| | | | –0,074+0,05 | 99,1 | 96,8 | 50,4 |
| | 950 | 1,0 | –0,1+0,074 | 98,5 | 96,2 | 47,4 |
| | | | –0,074+0,05 | 99,2 | 98,1 | 52,6 |
| | 1450 | 1,57 | –0,1+0,074 | 98,3 | 97,4 | 46,1 |
| | | | –0,074+0,05 | 99,6 | 98,7 | 53,9 |

Применение таких видов направленного воздействия, как обработка ускоренными электронами, в технологических схемах обогащения ЦСП в значительной степени повышает адсорбционную способность природных цеолитов (со 147 до 164 мг/г ЦСП Шивыртуйского месторождения, с 246 до 287 мг/г ЦСП Талан-Гозагорского месторождения) [28]. Повышение сорбционной емкости ЦСП достигается за счет извлечения железосодержащих минералов, а также очистки порового пространства природных цеолитов от органики, что определяется применением предварительной рудоподготовки направленными методами воздействия в сочетании с магнитной и электростатической сепарациями [32-34].

Определяющим фактором для методологии создания технологических схем обогащения и переработки ЦСП является возможность их комплексной переработки и отделения породообразующих минералов [30, 31]. Полученные закономерности при переработке и обогащении ЦСП Восточного Забайкалья позволили определить рациональную последовательность операций в технологической схеме: дробление; повышение контрастности и изменение физико-химических свойств направленным воздействием (обработка потоком ускоренных электронов); измельчение; магнитная и электростатическая сепарации с получением высококачественного цеолитового концентрата, железосодержащего (гематит, гидрогетит, оливин и пироксен) и полиминерального (кварц, плагиоклазы, кальцит, монтмориллонит) продуктов, направляемых на дальнейшую переработку или практическое использование. В частности, железосодержащий продукт является потенциальным источником для получения железа, а полиминеральный продукт – вяжущим в составе для закладки выработанного пространства [35-37].

Принципы создания технологических схем обогащения ЦСП: направленное воздействие перед дроблением и измельчением материала для дезинтеграции и изменения контрастности свойств минералов; максимальное извлечение Fe-содержащих минералов электромагнитной сепарацией с применением сепараторов с изодинамическим полем; извлечение немагнитных примесей посредством применения электростатической сепарации.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволили определить основные методы обогащения и рудоподготовки ЦСП, которые являются определяющими при разработке алгоритма выбора технологии обогащения ЦСП Восточного Забайкалья (табл.5).

*Таблица 5*

**Методы сепарации ЦСП в зависимости от минерального состава**

| Выделяемый минерал | Преобладающие минералы-спутники | Способы концентрирования |
|---|---|---|
| Цеолит | Полевые шпаты, слюды > 50 мкм | Дробление в роторных дробилках и измельчение в шаровых мельницах.<br>Направленные воздействия (ускоренные электроны).<br>Электромагнитная сепарация (для тонкодисперсных цеолитсодержащих пород на электромагнитном сепараторе с изодинамическим полем).<br>Электростатическая сепарация |
| | Глинистые минералы < 50 мкм | Направленные воздействия (ускоренные электроны).<br>Электромагнитная сепарация на электромагнитном сепараторе с изодинамическим полем.<br>Электростатическая сепарация с подогрев-электризацией |
| | Минералы группы кварца, глинистые минералы | Дробление в роторных дробилках и измельчение в шаровых мельницах.<br>Ускоренные электроны.<br>Электростатическая сепарация |


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 265. С. 129-139
© К.К.Размахнин, А.Н.Хатькова, Л.В.Шумилова, 2024

В предложенной систематизации заложена возможность определения количества стадий рудоподготовки, выбора необходимого вида воздействия на ЦСП и рациональных процессов их обогащения и переработки, что определяет эффективность отделения минералов цеолитов от породообразующих минералов с учетом технологических свойств (электропроводность, магнитная восприимчивость) и значений технологических показателей. Результаты экспериментальных исследований обогатимости ЦСП являются основой для разработки технологических схем их обогащения.

Разработанные научно-методологические основы переработки и обогащения ЦСП прошли апробацию в промышленных условиях. Исследовалась возможность внедрения разработанной технологии обогащения ЦСП Талан-Гозагорского и Шивыртуйского месторождений на производственном комплексе ООО «Научно-производственное внедренческое общество «Цеолит» (Краснокаменск) с получением высококачественных цеолитовых продуктов. Для достижения требуемых параметров качества цеолитовой продукции, соответствующей критериям ТУ, в технологическую схему следует ввести процессы:

- направленное воздействие на ЦСП перед измельчением;
- электромагнитную сепарацию в изодинамическом поле для максимального извлечения железосодержащих минералов;
- электростатическую сепарацию;
- электризацию ЦСП парами салициловой кислоты для повышения контрастности разделяемых электростатической сепарацией минералов.

Технологическая схема обогащения ЦСП приведена на рис.5. Практическая значимость результатов исследований подтверждена внедрением разработанной технологии обогащения ЦСП в технико-экономический расчет ООО «Научно-производственное внедренческое общество «Цеолит».

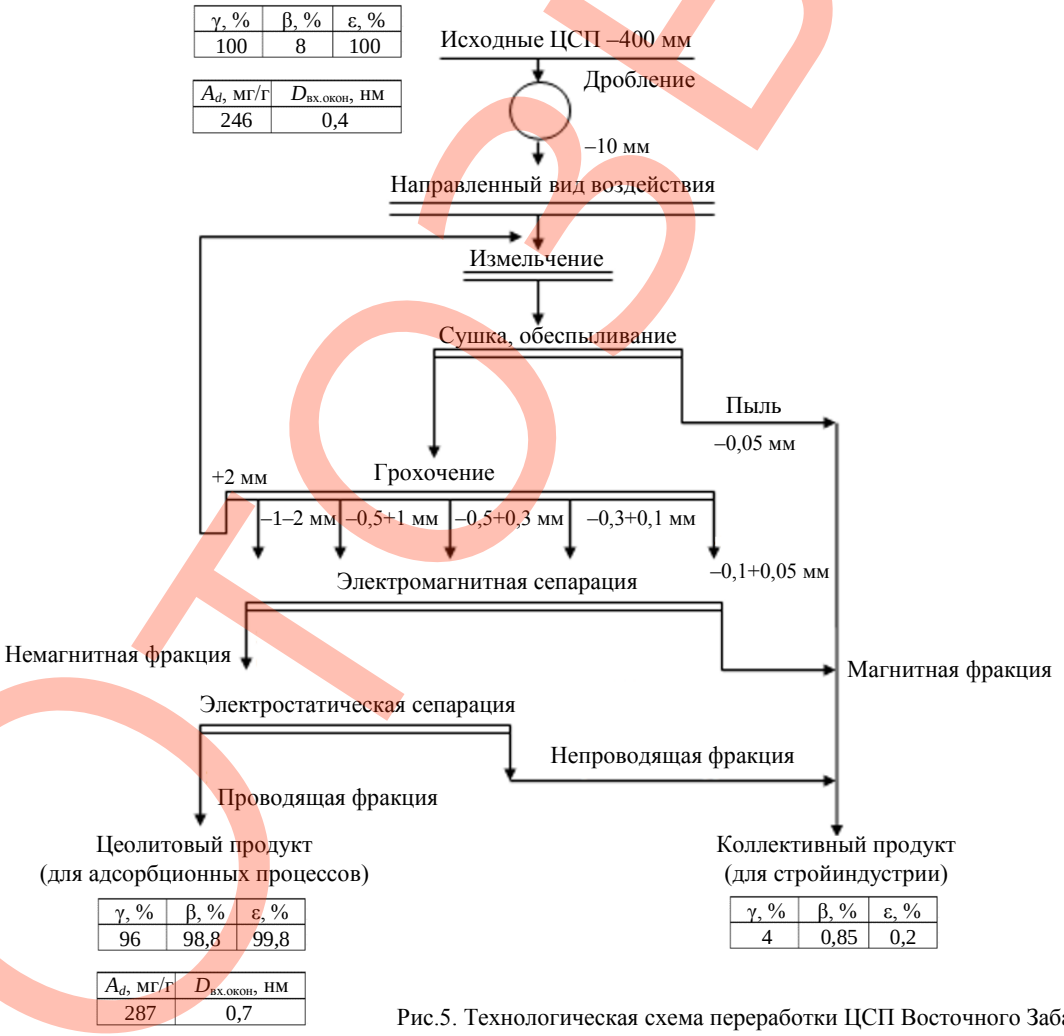



Рис.5. Технологическая схема переработки ЦСП Восточного Забайкалья [21]



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Отозвано

Оценка экономической эффективности внедрения технологии переработки ЦСП на обогатительном комплексе ООО «Научно-производственное внедренческое общество «Цеолит» показала, что затраты на получение высококачественного цеолитового продукта с содержанием минералов цеолита до 99,1 % составят порядка 10 тыс. руб. за тонну при рыночной стоимости продукции соответствующего качества до 100 тыс. руб. за тонну. В результате проведенных расчетов обоснована эколого-экономическая целесообразность применения направленных воздействий в стадии рудоподготовки ЦСП Восточного Забайкалья. Установлено, что внедрение предлагаемых технологий для обогащения и переработки ЦСП Восточного Забайкалья является в достаточной степени эффективным: дисконтированный срок окупаемости затрат составляет год.

**Заключение.** Выявлено, что воздействие ускоренными электронами на ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений существенно изменяет гранулометрический состав при их измельчении и позволяет более селективно раскрывать минералы цеолитов (клиноптилолита и шабазита), в значительной степени интенсифицируя последующие процессы магнитной и электростатической сепараций. Применение радиационной обработки в качестве операции рудоподготовки в сочетании с методами электромагнитной и электростатической сепараций способствует снижению содержания Fe-содержащих минералов в концентратах для ЦСП Шивыртуйского месторождения с 3,14 до 0,36 %, для ЦСП Талан-Гозагорского месторождения с 11,2 до 0,12 %. Выявлено, что радиационная обработка определяет увеличение содержания крупнокристаллического гематита и показателя магнитной восприимчивости гематита с $14\text{-}25 \cdot 10^{-8}$ до $460\text{-}660 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг. Это определяет эффективное применение электромагнитной сепарации при обогащении ЦСП и получение высококачественных цеолитовых продуктов, которые могут быть использованы в различных отраслях промышленности, а также в технологиях по управлению отходами горного производства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gorlova O.E., Shadrunova I.V., Zhilina V.A.* Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy // IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress, 17-21 September 2018, Moscow, Russian Federation. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. P. 3279-3287.

2. *Солодухина М.А., Юргенсон Г.А.* Мышьяк в ландшафтах Шерловогорского рудного района (Восточное Забайкалье). Чита: Забайкальский государственный университет, 2018. 176 с.

3. *Kudelko J.* Effectiveness of mineral waste management // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2018. Vol. 32. № 6. P. 440-448. DOI: 10.1080/17480930.2018.1438036

4. *Захарьян С.В., Гедгагов Э.И., Юн А.Б.* Повышение экологической безопасности на предприятиях цветной металлургии за счет использования сорбционных процессов // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 1. С. 26-32. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-26-32

5. *Shadrunova I.V., Gorlova O.E., Zhilina V.A.* The new paradigm of an environmentally-driven resourcesaving technologies for processing of mining // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Iss. 6. № 066048. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066048

6. *Кауппила П., Ряйсянен М.Л., Мюллюоя С.* Наилучшие экологические практики в горнодобывающей промышленности. Хельсинки: Центр окружающей среды Финляндии, 2013. 241 с.

7. *Abdrakhmanova R.N., Orehkova N.N., Gorlova O.E.* Adaptation of the SAVMIN process for mine water treatment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Iss. 6. № 066077. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066077

8. *Закондырин А.Е.* Наилучшие доступные технологии в горнодобывающем секторе: актуальные проблемы и пути их решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 6-1. С. 55-64. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-55-64

9. *Скобелев Д.О.* Информационно-методическая поддержка эколого-технологической модернизации экономики Российской Федерации // Управление. 2019. Т. 7. № 4. С. 5-15. DOI: 10.26425/2309-3633-2019-4-5-15

10. *Савон Д.Ю.* Совершенствование системы платного природопользования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 6. С. 314-320.

11. *Alam R., Ahmed Z., Howladar M.F.* Evaluation of heavy metal contamination in water, soil and plant around the open landfill site Mogla Bazar in Sylhet, Bangladesh // Groundwater for Sustainable Development. 2020. Vol. 10. № 100311. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100311

12. *Шушков Д.А., Шуктомова И.И.* Сорбция радиоактивных элементов цеолитсодержащими породами // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2013. Вып. 1 (13). С. 69-73.

13. *Sivashankari L., Rajkishore S.K., Lakshmanan A., Subramanian K.S.* Optimization of dry milling process for synthesizing nano zeolites // International Journal of Chemical Studies. 2019. Vol. 7. № 4. P. 328-333.

14. *Тяглов С.Г., Воскресова Г.Н.* Особенности определения технологии в качестве НДТ: российский и зарубежный опыт // Journal of Economic Regulation (Вопросы регулирования экономики). 2019. Т. 10. № 2. С. 96-112. DOI: 10.17835/2078-5429.2019.10.2.096-112

15. *Котова О.Б., Шушков Д.А.* Процесс получения цеолитов из золы уноса // Обогащение руд. 2015. № 5. С. 60-63. DOI: 10.17580/or.2015.05.10



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

16. *Manchuk J.G., Birks J.S., McClain C.N. et al.* Estimating Stable Measured Values and Detecting Anomalies in Groundwater Geochemistry Time Series Data Across the Athabasca Oil Sands Area, Canada // Natural Resources Research. 2021. Vol. 30. № 2. P. 1755-1779. DOI: 10.1007/s11053-020-09801-5

17. *Cecinati F., Matthews T., Natarajan S. et al.* Mining Social Media to Identify Heat Waves // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16. Iss. 5. № 762. DOI: 10.3390/ijerph16050762

18. *Li H., Watson J., Zhang Y. et al.* Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review // Bioresource Technology. 2020. Vol. 298. № 122421. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122421

19. *Uçkun Ş., Sarıkaya M., Top S., Timür İ.* Removal of Heavy Metals from Wastewater Solution Using a Mechanically Activated Novel Zeolitic Material // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56. № 6. P. 1010-1023. DOI: 10.1134/S1062739120060137

20. *Хатькова А.Н., Ростовцев В.И., Размахнин К.К., Емельянов В.Н.* Влияние воздействия ускоренными электронами на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 6. С. 167-174.

21. *Размахнин К.К.* Обоснование и разработка технологий обогащения и модификации цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 148-157. DOI: 10.15372/FTPRPI20210314

22. *Ping Wang, Zehang Sun, Yuanan Hu, Hefa Cheng.* Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 695. № 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893

23. *Xueyan Zou, Yanbao Zhao, Zhijun Zhang.* Preparation of hydroxyapatite nanostructures with different morphologies and adsorption behavior on seven heavy metals ions // Journal of Contaminant Hydrology. 2019. Vol. 226. № 103538. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2019.103538

24. *Mei Hong, Lingyun Yu, Yanding Wang et al.* Heavy metal adsorption with zeolites: The role of hierarchical pore architecture // Chemical Engineering Journal. 2019. Vol. 359. P. 363-372. DOI: 10.1016/j.cej.2018.11.087

25. *Yiping Su, Jing Wang , Shun Li et al.* Self-templated microwave-assisted hydrothermal synthesis of two-dimensional holey hydroxyapatite nanosheets for efficient heavy metal removal // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. Iss. 29. P. 30076-30086. DOI: 10.1007/s11356-019-06160-4

26. *Ростовцев В.И.* Теоретические основы и практика использования электрохимических и радиационных (ускоренных электронов) воздействий в процессах рудоподготовки и обогащения минерального сырья // Вестник Читинского государственного университета. 2010. № 8 (65). С. 91-99.

27. *Юсупов Т.С., Бакшеева И.И., Ростовцев В.И.* Исследование влияния различных видов механических воздействий на селективность разрушения минеральных ассоциаций // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 6. С. 182-188.

28. *Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Razmakhnin K.K., Khatkova A.N.* Natural Zeolites of Eastern Transbaikalia in Technologies for Mining Enterprises Wastewater Treatment // Journal of Environmental Research, Engineering and Management. 2020. Vol. 76. № 3. P. 62-70. DOI: 10.5755/j01.erem.76.3.24220

29. *Литвиненко В.Г., Размахнин К.К.* Природные цеолиты в технологиях обеспечения экологической безопасности горнопромышленных предприятий // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2021. Т. 8. № 2. С. 158-162. DOI: 10.15372/FPVGN2021080224

30. *Chanturia V.A., Shadrunova I.V., Zhilina V.A.* Recovery of mining waste in the complex development of mineral resources. Moscow: Publishing house Sputnik+, 2019. 120 p.

31. *Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Жилина В.А. и др.* Экологически ориентированная переработка горнопромышленных отходов. М.: ООО «Изд-во «Спутник+», 2018. 200 с.

32. *Итцель-Эрнандес Г., Эрнандес М.А., Портильо Р. и др.* Иерархическая структура нанопористости мексиканских природных цеолитов типа клиноптилолит // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 107-117. DOI: 10.18799/24131830/2018/10/2110

33. *Ying Wang, Yange Yu, Haiyan Li, Chanchan Shen.* Comparison study of phosphorus adsorption on different waste solids: Fly ash, red mud and ferric-alum water treatment residues // Journal of Environmental Sciences. 2016. Vol. 50. P. 79-86. DOI: 10.1016/j.jes.2016.04.025

34. *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. DOI: 10.18454/PMI.2016.4.526

35. *Сугоняко Д.В., Зенитова Л.А.* Диоксид кремния как армирующий наполнитель полимерных материалов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 5. С. 94-100.

36. *Богданов А.В., Федотов К.В., Качор О.Л.* Разработка научных и практических основ рекуперативной технологии экобетонирования мышьяксодержащих отходов горно-перерабатывающей промышленности. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. 182 с.

37. *Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Nikolaeva N.V.* On the Use of Microwave Treatment of Gold-Containing Concentrates for Its Efficient Processing // New Materials: Preparation, Properties and Applications in the Aspect of Nanotechnology. 2020. P. 179-188.

***Авторы*: К.К.Размахнин,** *д-р техн. наук, доцент, constantin-const@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2944-7642* (*Забайкальский государственный университет, Чита, Россия*), **А.Н.Хатькова**, *д-р техн. наук, проректор, https://orcid.org/0000-0001-6527-0026* (*Забайкальский государственный университет, Чита, Россия*), **Л.В.Шумилова**, *д-р техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0001-5991-9204* (*Забайкальский государственный университет, Чита, Россия*).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

ОТОЗВАНА