

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

К. К. Размахнин¹, А. Н. Хатькова¹, Л. В. Шумилова¹

¹ ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

Аннотация: Рассмотрены вопросы применения направленного энергетического воздействия ускоренными электронами на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья, представленные месторождениями Шивиртуйское и Талан-Гогагорское, с целью повышения эффективности отделения цеолитов от породообразующих минералов методом электромагнитной сепарации. Получены результаты по определению эффективности вскрытия цеолитовых минералов с применением воздействия потоком ускоренных электронов, установлены зависимости, характеризующие влияние радиационного воздействия пучком ускоренных электронов на гранулометрический состав цеолитсодержащих пород, минералов клиноптилолита и шабазита в них и на коэффициент раскрытия минералов цеолита при измельчении без радиационной обработки и с таковой. Выявлены зависимости извлечения минералов железа из цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья от напряженности магнитного поля сепаратора при различных классах крупности. Определены зависимости извлечения минералов железа электромагнитной сепарацией от крупности цеолитсодержащих пород при радиационном воздействии и содержания минералов железа от крупности цеолитсодержащих пород, подвергшихся радиационной обработке после электромагнитной сепарации. Получены результаты электромагнитной сепарации цеолитсодержащих пород, а также результаты электромагнитной сепарации тонкодисперсных цеолитсодержащих пород в изодинамическом поле. Установлено влияние обработки ускоренными электронами на сорбционную емкость цеолитсодержащих пород. Разработана 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, сорбционная емкость, повышение качества, горнопромышленные отходы, техногенные образования, очистка.

Благодарности: 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 гг.)

Для цитирования: Размахнин К. К., Хатькова А. Н., Шумилова Л. В. Повышение качества цеолитсодержащих пород восточного забайкалья на основе применения направленных энергетических воздействий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 361–376. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_361.

Improving the quality of zeolite-containing rocks of the Eastern Transbaikal region on the basis of the application of directed energy impacts

K. K. Razmakhnin¹, A. N. Khatkova¹, L. V. Shumilova¹

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia

Abstract: The issues of application of directed energy impact by accelerated electrons on zeolite-containing rocks of Eastern Transbaikalia, represented by the Shivyrtyuyskoye and Talan-Gozagorskoye deposits, are considered in order to increase the efficiency of separating zeolites from rock-forming minerals by the method of electromagnetic separation. Results have been obtained to determine the efficiency of opening zeolite minerals using the impact of an accelerated electron flow, dependences have been established that characterize the effect of radiation exposure by an accelerated electron beam on the granulometric composition of zeolite-containing rocks, clinoptilolite and chabazite minerals in them and on the coefficient of opening of zeolite minerals during grinding without radiation treatment and with such. The dependences of the extraction of iron minerals from zeolite-containing rocks of Eastern Transbaikalia on the strength of the magnetic field of the separator for various size classes have been revealed. The dependences of the extraction of iron minerals by electromagnetic separation on the size of zeolite-containing rocks under radiation exposure and the content of iron minerals on the size of zeolite-containing rocks subjected to radiation treatment after electromagnetic separation are determined. The results of electromagnetic separation of zeolite-containing rocks, as well as the results of electromagnetic separation of finely dispersed zeolite-containing rocks in an isodynamic field are obtained. The effect of treatment with accelerated electrons on the sorption capacity of zeolite-containing rocks has been established. A technological scheme for the processing of zeolite-containing rocks has been developed, based on the use of accelerated electron processing at the stage of ore preparation, which provides a significant increase in the quality of zeolite products.

Key words: zeolite-containing rocks, enrichment, accelerated electrons, sorption capacity, quality improvement, mining waste, technogenic formations, purification.

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation project 22-17-00040 “Scientific substantiation and development of environmentally friendly waste-free technologies for processing natural and technogenic mineral raw materials” (2022–2023).

For citation: Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V. Improving the quality of zeolite-containing rocks of the eastern transbaikal region on the basis of the application of directed energy impacts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):361–376. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_361.

Введение

Современная горнодобывающая промышленность характеризуется интенсивным развитием и связана с применением технологий, способствующих существенному увеличению объема техногенных образований, что обуславливает значительное усиление экологической нагрузки на окружающую среду [1, 2]. При этом основная

часть образуемых техногенных отходов, как правило, не подлежит переработке и утилизации [3, 4]. Накопление значительных объемов хвостов обогащения и отвальных пород, наряду с техногенными минеральными отходами, представляющими собой наследие 90-х и 2000-х гг. и не имеющими ответственного собственника, определяет, помимо экологических проблем

в районах их размещения, возникновение серьезных экономических вопросов и трудностей [5, 6].

Необходимо отметить, что эффективное решение проблемы техногенной нагрузки на окружающую среду, создаваемой отходами горной промышленности, базируется на использовании наилучших доступных технологий (НДТ), к которым, помимо направленных на повышение экологичности производства технологических решений, следует отнести применение материалов, способных в значительной степени снизить негативное воздействие на атмосферу, воду и почву. В частности, использование природных и синтетических сорбентов позволяет предотвратить или существенно сократить количество загрязняющих веществ в выбросах и сбросах, в том числе токсичных и радиоактивных, а также восстановить нарушенные антропогенным воздействием земли [7, 8]. В этой связи можно сделать вывод о том, что сорбенты, характеризующиеся высокими адсорбционными свойствами, являются многоцелевым инструментом для эффективного осуществления природоохранных мероприятий [7, 9]. При этом такие природные сорбенты, как цеолитсодержащие породы, обладают, помимо уникальных сорбционных и ионообменных свойств, доступностью по наличию ресурсов и по стоимости, и, соответственно, могут эффективно использоваться при обращении с отходами горной промышленности [9, 10].

В настоящее время цеолитсодержащие породы (ЦСП) находят применение в большей степени в строительной индустрии, строительстве автомобильных дорог, сельском хозяйстве, а также при закладке выработанного пространства горных выработок, в том числе в составе смесей с минеральным

сырьем отвалов пород и хвостохранилищ [11, 12]. Однако высокий потенциал ЦСП (цеолитов), основанный на их уникальных сорбционных свойствах, позволяет определить более широкий спектр направлений их применения, в частности, в системах управления отходами горнопромышленных предприятий. С помощью ЦСП может быть решена такая задача, как существенная минимизация и предотвращение негативного влияния техногенных отходов на компоненты окружающей среды [13, 14]. Известно, что применение природных цеолитов возможно при очистке сточных и оборотных вод, отходящих дымовых газов котельных и ТЭЦ предприятий горного сектора промышленности, при рекультивации и консервации хвостохранилищ и отвалов пород и др. [15, 16]. Вместе с тем ограниченное применение цеолитсодержащих пород основано на достаточно низком качестве исходного минерального сырья (содержание минералов цеолита в ЦСП составляет от 15 до 62%). Кроме того, к качеству природных цеолитов для использования их в природоохранных технологиях предъявляются достаточно высокие требования, которые регламентируют содержание примесей в цеолитовой продукции на уровне 1–3% [12, 14]. При этом основная часть сосредоточенных в Российской Федерации запасов ЦСП представлена низко- и среднекачественными породами с достаточно высоким содержанием таких порообразующих минералов, как кварц, оксиды железа и полевые шпаты, что снижает возможность широкого применения природных цеолитов. С целью повышения качества ЦСП и расширения направлений их практического применения требуется разработать эффективные технологии обогащения цеолитсодержащих пород.

Установлено, что обработка минерального сырья ускоренными электронами позволяет направленно воздействовать на его физико-химические и механические свойства, обеспечивая снижение прочностных характеристик рудного сырья, повышение раскрываемости минералов и их селективной дезинтеграции [17]. Кроме того, воздействие ускоренными электронами существенно сокращает продолжительность последующих операций рудоподготовки (дробление и измельчение) и в значительной степени повышает эффективность дальнейшего обогащения минерального сырья [17].

Воздействие ускоренными электронами является перспективным методом направленного изменения свойств ЦСП с целью повышения эффективности их очистки от порообразующих минералов с помощью различных методов обогащения, а также для увеличения сорбционной емкости цеолитовых минералов.

Наибольший вклад в развитие методической и теоретической основы исследований в области применения воздействия ускоренными электронами на минеральное сырье внесли такие известные отечественные ученые, как: И. Н. Плаксин, В. А. Чантурия, И. Ж. Бунин, С. Б. Леонов, В. И. Ростовцев и др. [17].

Методы

В качестве объектов исследований приняты ЦСП Шивыртуйского, Талан-Гозагорского и Холинского месторождений. Методика проведения исследований по изучению эффективности воздействия ускоренными электронами на ЦСП заключалась в следующем: посредством бункера-дозатора и транспортера цеолитсодержащие породы крупностью 0,05–0,07 мм подавались в уско-

ритель электронов серии ИЛУ (разработка Института ядерной физики СО РАН) и подвергались воздействию пучком ускоренных электронов при дозе облучения от 2 до 5 кГр. Масса проб составляла 50–70 мг. Расход электроэнергии при радиационной обработке ЦСП составил 0,6 кВт·ч/т. Мессбауэровская спектроскопия проводилась на спектрометре М5–1104Em с дальнейшей обработкой спектров в программе Univem MS. Исследования термических характеристик ЦСП после обработки ускоренными электронами осуществлялись при температуре от 20 до 1400 °С на установке STA 449C, определение теплоемкости происходило при температуре от 40 до 400 °С. Для определения сорбционной активности использовались колориметрический и кондуктометрический методы, а также метод высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Коэффициент раскрытия минералов цеолита (клиноптилолит, шабазит) определялся после измельчения в лабораторной шаровой мельнице посредством оптической микроскопии. При этом измельчение проводилось в двух режимах: 1 — измельчение цеолитсодержащих пород без радиационного воздействия, 2 — с предварительной обработкой ускоренными электронами на ускорителе электронов ИЛУ. Анализ полученных экспериментальных данных осуществлялся с помощью математической обработки с построением соответствующих функций и графиков.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента раскрытия минералов цеолита (клиноптилолит, шабазит) при измельчении ЦСП месторождений Восточного Забайкалья без воздей-

ствия ускоренными электронами (а) и с радиационной обработкой (б) представлены на рис. 1. Зависимости 1 и 1.1 определяют крупность цеолитсодержащих пород после измельчения, которая выражается графиками 2 и 2.2, при этом коэффициент раскрытия минера-

лов клиноптилолита и шабазита определяется отношением площадей под функциями.

Установлено, что применение радиационного воздействия малыми дозами (2–4 кГр) посредством обработки ЦСП пучком ускоренных электронов перед

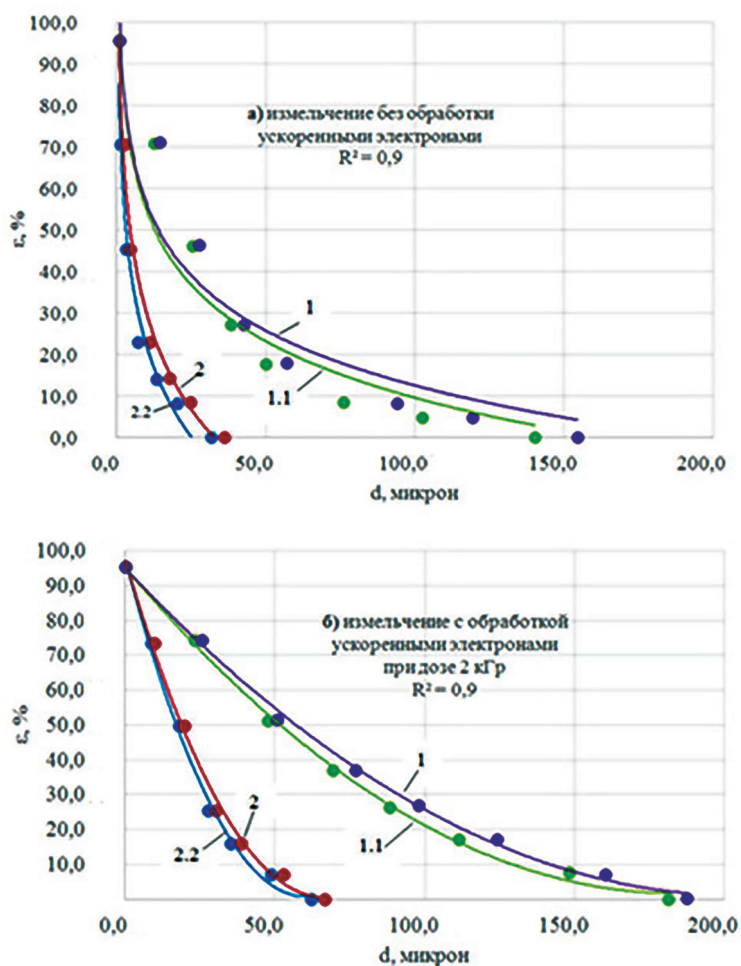


Рис. 1. Влияние радиационного воздействия пучком ускоренных электронов на гранулометрический состав цеолитсодержащих пород (1), минералов клиноптилолита и шабазита в них (2) и на коэффициент раскрытия минералов цеолита: а) измельчение без радиационной обработки; б) измельчение с радиационной обработкой

Fig. 1. The effect of radiation exposure by an accelerated electron beam on the granulometric composition of zeolite-containing rocks (1), clinoptilolite and chabazite minerals in them (2) and on the coefficient of zeolite minerals opening: а) grinding without radiation treatment; б) grinding with radiation treatment

измельчением позволяет повысить коэффициент раскрытия клиноптилолита с 38 до 54%, а шабазита с 46 до 62%, что свидетельствует об эффективности данного метода рудоподготовки.

На основании данных, полученных в результате измерения теплоемкости исходных и подвергшихся радиационной обработке цеолитсодержащих пород Шивиртуйского месторождения, установлено, что их начальная теплоемкость имеет одинаковые значения (~1,6 Дж/г) с максимумом при температуре 130 °С. При этом максимальное значение абсолютной величины теплоемкости цеолитсодержащих пород Шивиртуйского **месторождения** значительно ниже данного показателя пород **Талан-Гозагорского** месторождения (~2,3 Дж/г) с более высоким содержанием гематита.

Полученные результаты мессбауэровской спектроскопии исходных и обработанных пучком ускоренных электронов пород **Талан-Гозагорского месторождения позволили определить**, что секстеты **спектров соответствуют гематиту, дублеты — глинистому монтмориллониту. При этом радиационное воздействие на** цеолитсодержащие породы **обеспечивает значительное уменьшение доли тонкодисперсного гематита и увеличение крупнокристаллического. Вместе с тем определено, что обработка пучком ускоренных электронов** приводит к повышению содержания железа в цеолитсодержащих породах, обусловленного удалением летучих компонентов, и **изменению величины резонансного эффекта.**

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что направленные радиационные энергетические воздействия на цеолитсодержащие породы интенсифицируют про-

цесс раскрытия минеральных сростков и разделения цеолитовых (клиноптилолит, шабазит) и породообразующих минералов. При этом наибольший эффект по изменению технологических свойств цеолитсодержащих пород месторождений Восточного Забайкалья достигается в диапазоне малых доз радиационного воздействия (2–4 кГр). В результате проведения исследований выявлено, что при обработке цеолитсодержащих пород пучком ускоренных электронов в режиме невысоких плотностей также достигается образование в них незначительных дефектов. При дальнейшем повышении с 1 до 10 Дж/г величины поглощенной породами энергии накапливается заряд, который обуславливает возникновение в них электрических пробоев пульсирующего характера, что приводит к возникновению микротрещин, образующих системы [17]. Данные системы микротрещин обуславливают значительное разупрочнение цеолитсодержащих пород по границам срастания цеолитовых и породообразующих минералов, влияя тем самым на эффективность их селективной дезинтеграции [17].

Установлено, что радиационная обработка при измельчении ЦСП Восточного Забайкалья в значительной степени изменяет их гранулометрический состав и позволяет селективно раскрывать минералы клиноптилолита и шабазита, повышая эффективность применения магнитной и электростатической сепараций для снижения содержания железосодержащих минералов в цеолитовых продуктах (концентратах). При этом содержанием минералов железа в цеолитсодержащих породах Шивиртуйского месторождения снижается с 3,14 до 0,36%, а в породах Талан-Гозагорского месторождения — с 11,2 до 0,12%. Кроме того, установлено, что воздействие пучком ускоренных

электронов приводит к увеличению содержания крупнокристаллического гематита в цеолитсодержащих породах, а также к повышению показателя его магнитной восприимчивости с $14-25 \cdot 10^{-8}$ до $460-660 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, что обуславливает эффективное применение электромагнитной сепарации при обогащении ЦСП.

В результате анализа данных, полученных при проведении исследований по изучению эффективности радиационного воздействия путем обработки цеолитсодержащих пород ускоренными электронами, выявлены технологические зависимости, представленные на рис. 2–5. В частности, на рис. 2 представлена зависимость извлечения минералов, содержащих железо, из пород Шивиртуйского месторождения от напряженности магнитного поля.

Выявленная зависимость извлечения минералов железа из цеолитсодержащих пород Талан-Гогагорского месторождения от напряженности магнитного поля представлена на рис. 3.

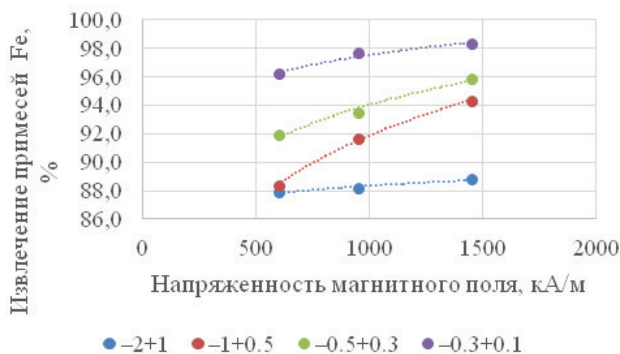


Рис. 2. Зависимость извлечения минералов железа из цеолитсодержащих пород Шивиртуйского месторождения от напряженности магнитного поля сепаратора при различных классах крупности (-2+1 мм; -1+0,5 мм; -0,5+0,3 мм; -0,3+0,1 мм)

Fig. 2. The dependence of the extraction of iron minerals from the zeolite-containing rocks of the Shivirtuiskoye deposit on the magnetic field strength of the separator at different size classes (-2 + 1 mm; -1 + 0.5 mm; -0.5 + 0.3 mm; -0.3 + 0, 1 mm)

На рис. 4 приведена эффективность обезжелезнения электромагнитной сепарацией от крупности цеолитсодержащих пород (при радиационной обработке).

Данные, представленные на рис. 4 показывают, что при уменьшении крупности обработанных ускоренными электронами ЦСП с 2,0 мм до 0,3 мм происходит значительное увеличение степени извлечения из них железосодержащих примесей (обезжелезнение) методом электромагнитной сепарации. При этом с уменьшением размеров ЦСП снижается и содержание минералов железа в них (рис. 5).

Установлено, что электромагнитное обогащение цеолитсодержащих пород в изодинамическом поле характеризуется наиболее высокими показателями извлечения железосодержащих минералов при крупности 0,1 мм (табл. 1).

Сравнительная оценка адсорбционной способности ЦСП до и после обработки ускоренными электронами приведена в табл. 2.

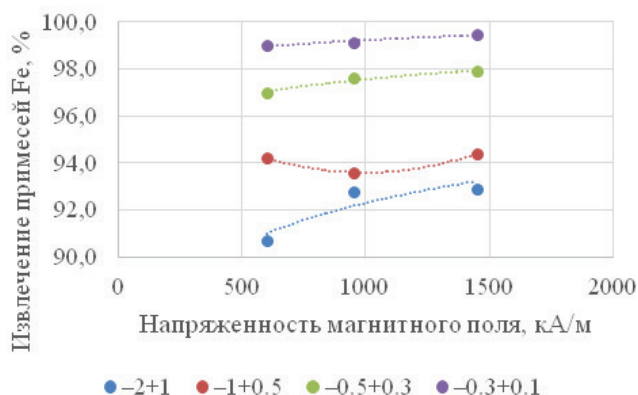


Рис. 3. Зависимость извлечения минералов железа из цеолитсодержащих пород Талан-Гогагорского месторождения от напряженности магнитного поля сепаратора при различных классах крупности (-2+1 мм; -1+0,5 мм; -0,5+0,3 мм; -0,3+0,1 мм)

Fig. 3. The dependence of the extraction of iron minerals from the zeolite-containing rocks of the Talan-Gozagorskoye deposit on the magnetic field strength of the separator at different size classes (-2+1 mm; -1+0.5 mm; -0.5+0.3 mm; -0.3+ 0.1mm)

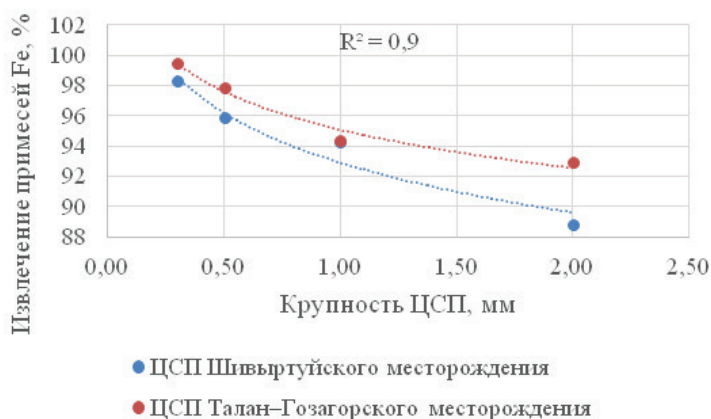


Рис. 4. Зависимость извлечения минералов железа электромагнитной сепарацией от крупности цеолитсодержащих пород (при радиационном воздействии)

Fig. 4. The dependence of the extraction of iron minerals by electromagnetic separation on the size of zeolite-containing rocks (under radiation exposure)

Применение направленной радиационной обработки ускоренными электронами в технологических схемах обогащения и модификации цеолитсодержащих пород существенно повышает сорбционную емкость цеолитов (со 147 до 164 мг/г у пород Шивыртуйского месторождения;

с 246 до 287 мг/г у пород Талан-Гогагорского месторождения). Повышение сорбционной емкости цеолитсодержащих пород достигается за счет извлечения минералов железа, а также очистки порового пространства природных цеолитов от органических веществ.

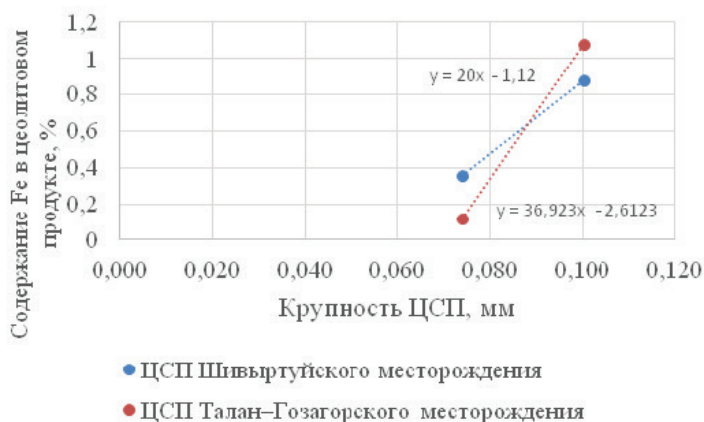


Рис. 5. Зависимость содержания минералов железа от крупности цеолитсодержащих пород, подвергшихся радиационной обработке (после электромагнитной сепарации)

Fig. 5. The dependence of the content of iron minerals on the size of zeolite-containing rocks subjected to radiation treatment (after electromagnetic separation)

Таблица 1

Результаты электромагнитной сепарации тонкодисперсных цеолитсодержащих пород в изодинамическом поле

Results of electromagnetic separation of finely dispersed zeolite-containing rocks in an isodynamic field

Минеральное сырье	Напряженность магнитного поля Н, кА/м	Сила тока, А	Класс крупности, мм	Извлечение минералов Fe в магнитный продукт, %	Массовая доля Fe в магнитном продукте
ЦСП Шивьртуртуйского месторождения	600	0,50	-0,1+0,074	89,7	92,4
			-0,074+0,05	96,4	94,4
	950	1,0	-0,1+0,074	93,3	95,6
			-0,074+0,05	97,9	96,2
	1450	1,57	-0,1+0,074	95,4	96,7
			-0,074+0,05	98,2	97,1
ЦСП Талан-Гозагорского месторождения	600	0,50	-0,1+0,074	98,7	96,3
			-0,074+0,05	99,1	96,8
	950	1,0	-0,1+0,074	98,5	96,2
			-0,074+0,05	99,2	98,1
	1450	1,57	-0,1+0,074	98,3	97,4
			-0,074+0,05	99,6	98,7

Кроме того, достигаемые при обработке ускоренными электронами ЦСП размеры входных окон цеолитов определяют возможность их применения для сорбции компонентов жидких и газообразных отходов: радионукли-

дов (цезий, стронций, торий), мышьяка, нефтепродуктов, диоксида серы и т.д. (табл. 3).

Установлено, что методология разработки технологических схем обогащения и модификации цеолитсодержа-

Таблица 2

Сравнительная оценка адсорбционной способности природных цеолитов Восточного Забайкалья до и после радиационной обработки
Comparative evaluation of the adsorption capacity of natural zeolites of Eastern Transbaikalia before and after radiation treatment

Месторождение (тип)	Адсорбционная способность, мг/г	
	необработанный	обработанный
Шивиртуйское (клиноптилолит)	147	164
Талан-Гозагорское (шабазит)	246	284

Таблица 3

Параметры использования высококачественной цеолитовой продукции в технологиях управления горнопромышленными отходами
Parameters for the use of high quality zeolite products in mining waste management technologies

Цеолитовый минерал	Размер входных окон, нм	Сорбируемые вещества
Клиноптилолит	0,6–0,75	Cs ¹³⁷ , Sr ⁹⁰ , мышьяк, торий, нефтепродукты
Шабазит	0,6–0,7	

щих пород базируется на возможности извлечения из них породообразующих минералов, комплексной переработки и изменении их физико-химических свойств. Выявленные закономерности при проведении исследований цеолитсодержащих пород Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений позволили определить необходимые операции и их последовательность в технологической схеме обогащения: дробление, повышение контрастности и изменение физико-химических свойств посредством радиационной обработки, измельчения, магнитной и электростатической сепарации с получением высококачественного цеолитового концентрата. Кроме того, продуктами обогащения ЦСП Восточного Забайкалья являются магнитный (железосодержащий) продукт, в который входят такие минералы, как гематит, гидрогетит, оливин и пироксен, а также полиминеральный продукт, содержащий минералы кварца, плагиоклазы, кальцит и монтмориллонит. Необходимо отметить, что все получаемые в результате обогащения ЦСП продукты имеют перспективу

практического использования: железосодержащий продукт — для получения железа, полиминеральный продукт — для производства смеси для закладки выработанного пространства [18, 19].

Вместе с тем основные принципы разработки технологических схем обогащения цеолитсодержащих пород базируются на:

- направленном энергетическом воздействии перед рудоподготовкой для дезинтеграции и изменения контрастности свойств, входящих в состав ЦСП минералов;
- максимальном извлечении железосодержащих минералов посредством электромагнитной сепарации;
- извлечении немагнитных минералов-примесей электростатической сепарацией.

Полученные в результате проведения теоретических и экспериментальных исследований данные позволили определить основные методы сепарации и рудоподготовки Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений (табл. 4), являющиеся базовыми для выбора технологии обогащения цеолитсодержащих пород Восточного

Таблица 4

Методы сепарации цеолитсодержащих пород в зависимости от минерального состава
Methods for separating zeolite-containing rocks depending on the mineral composition

Выделяемый минерал	Преобладающие минералы-примеси	Способы обогащения и концентрирования
Цеолит (клиноптилолит, шабазит)	Полевые шпаты, слюды > 50 мкм	Дробление в роторных дробилках и измельчение в шаровых мельницах
		Ускоренные электроны
		Электромагнитная сепарация (для тонкодисперсных ЦСП на электромагнитном сепараторе с изодинамическим полем)
	Глинистые минералы < 50 мкм	Электростатическая сепарация
		Ускоренные электроны
		Электромагнитная сепарация на электромагнитном сепараторе с изодинамическим полем
Цеолит (клиноптилолит, шабазит)	Минералы группы кварца, глинистые минералы	Дробление в роторных дробилках и измельчение в шаровых мельницах
		Ускоренные электроны
		Электростатическая сепарация

Забайкалья. Применение данной систематизации определяет возможность оптимизировать количество стадий и параметров рудоподготовки, выбрать необходимый вид энергетического воздействия на цеолитсодержащие породы и процесс их обогащения.

Разработанные в результате проведения исследований научно-методологические основы обогащения цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья прошли апробацию в промышленных условиях на производственном комплексе ООО «НПВО «Цеолит»» (г. Краснокаменск) с получением высококачественной цеолитовой продукции. Для достижения необходимого качества получаемых цеолитовых продуктов (в соответствии с ТУ), в технологической схеме обогащения ЦСП следует применить:

– операцию направленного воздействия ускоренными электронами на цеолитсодержащие породы перед их измельчением;

– электромагнитную сепарацию с целью максимального извлечения минералов железа;

– операцию электростатической сепарации с электризацией цеолитсодержащих пород парами салициловой кислоты после электромагнитной сепарации.

Разработанная технологическая схема обогащения цеолитсодержащих пород Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений представлена на рис. 6.

Заключение

Таким образом, разработанная технология обогащения цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья, включающая радиационную энергетическую обработку потоком ускоренных электронов в качестве операции рудоподготовки, позволяет получить высококачественную продукцию. Получаемые цеолитовые продукты имеют размер входных

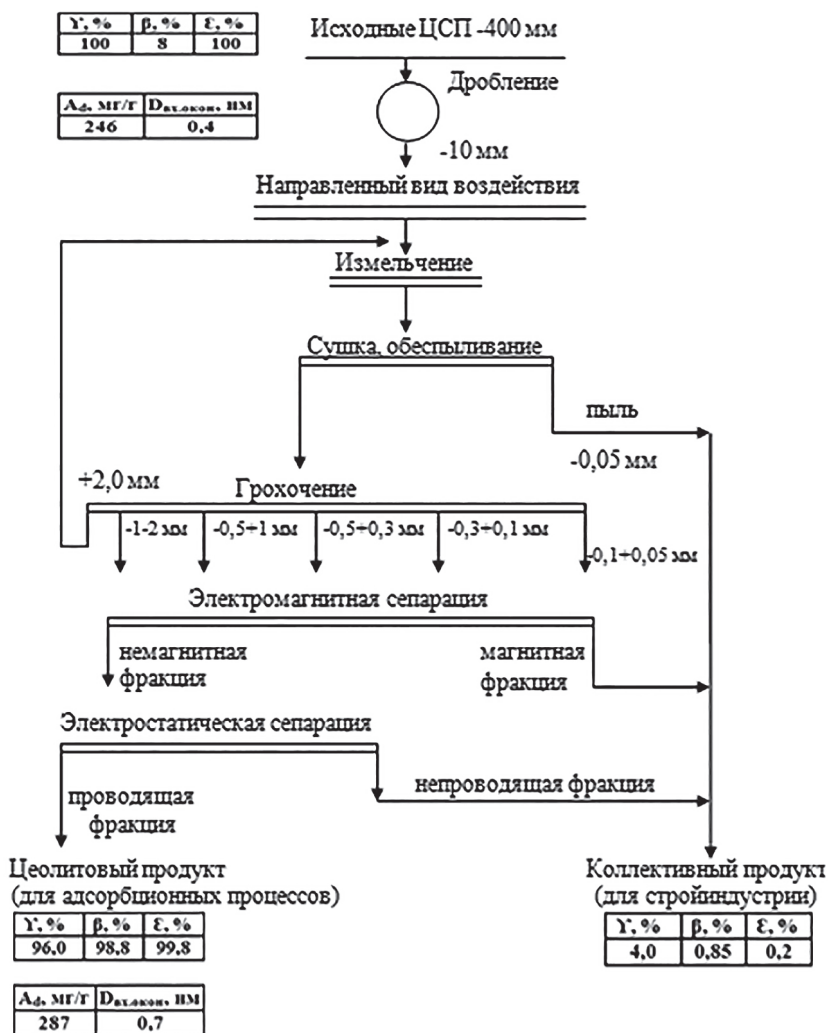


Рис. 6. Технологическая схема переработки цеолитсодержащих пород на обогатительном комплексе ООО «НПВО «Цеолит»»

Fig. 6. Technological scheme for the processing of zeolite-containing rocks at the enrichment complex LLC «Scientific Production and Innovation Society» Zeolite»»

онок порядка 0,7 нм и характеризуются высокой сорбционной емкостью, которая существенно увеличивается при обработке цеолитсодержащих пород ускоренными электронами, что обуславливает возможность их применения в технологиях очистки и обезвреживания сточных и оборотных вод горнопромышленных предприятий от мышьяка, радионукли-

дов и нефтепродуктов, очистки отходящих дымовых газов котельных и ТЭС от диоксида серы, а также при захоронении и рекультивации отходов, в том числе отвалов пород и хвостохранилищ. Вместе с тем применением разработанной технологии достигается высокая степень комплексности использования цеолитсодержащих пород за счет вовле-

чения в переработку железосодержащего и полиминерального продуктов обогащения. В этой связи повышение качества ЦСП Восточного Забайкалья предопределяет высокую эффективность их применения в мероприятиях

обеспечения экологической безопасности горнопромышленных предприятий, что в значительной степени расширяет спектр направлений применения цеолитов и обуславливает наиболее полное освоение МСБ региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Kudelko J.* Effectiveness of mineral waste management // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2018. No. 1–9. P. 440–448. DOI:10.1080/17480930.2018.1438036.

3. *Солодوخина М. А., Дорошкевич С. Г.* Почвы степных ландшафтов Шерловогорского рудного района (Восточное Забайкалье) // Геосферные исследования. 2019. С. 24–34. <https://doi.org/10.17223/25421379/13/3>.

4. *Shadrunkova I. V., Gorlova O. E., Zhilina V. A.* The new paradigm of an environmentally-oriented resourcesaving technologies for processing of mining // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 687 (2019) 066048. DOI:10.1088/1757-899X/687/6/066048.

5. *Abdrakhmanova R. N., Orehkova N. N., Gorlova O. E.* Adaptation of the SAVMIN process for mine watertreatment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 687 (2019) 066077. DOI:10.1088/1757-899X/687/6/066077.

6. *Gorlova O. E., Shadrunkova 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 Proceedings Congress. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 2019. P. 3279–3287. DOI:10.21285/1814-3520-2021-1-97–107.

7. *Sivashankari L., Rajkishore S. K., Lakshmanan A.* Optimization of Dry Milling Process for Synthesizing Nano Zeolites // International Journal of Chemical Studies. 2019. vol. 7, no. 4. P. 328–333.

8. *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 // Groundwater for Sustainable Development. 2020. Vol. 10. P. 100311. DOI:10.1016/j.gsd.2019.100311.

9. *Li H., Watson J., Zhang Y., Lu H., Liu Zh.* Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review // Bioresource Technology. 2020. Vol. 298. P. 122421. DOI:10.1016/j.biortech.2019.122421.

10. *Uçkun S.* Activation of Malatya Hekimhan Zeolites with Mechanochemical Method and Usage in Heavy Metal Adsorption // Journal of Mining Science. Vol. 56. P. 1010–1023 (2020). DOI: 10.1134/S1062739120060137.

11. *Hong M., Yu L., Wang Y., Jian Zhang.* Heavy Metal Adsorption with Zeolites: The Role of Hierarchical Pore Architecture // Chemical Engineering Journal. 2019. Vol. 359. P. 363–372. DOI: 10.1134/S1062739120060137.

12. *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.

13. *Wang P., Sun Z., Hu Y.* Eaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 695. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.133893.

14. *Шушков Д. А., Шуктомова И. И.* Сорбция радиоактивных элементов цеолитсодержащими породами // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2013. Вып. 1. С. 69–73.

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

16. *Milyutin V. V., Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., Nekrasova N. A.* 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.

17. *Ростовцев В. И., Брызгин А. А., Коробейников М. В.* Повышение селективности измельчения и комплексности использования минерального сырья на основе радиационной модификации его свойств // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 6. С. 136–146.

18. Recovery of mining waste in the complex development of mineral resources: The monograph / Edited by V. A. Chanturia and I. V. Shadrinova. Moscow: Publishing house Sputnik +, 2019. 120 p.

19. *Котова О. Б., Шушков Д. А.* Процесс получения цеолитов из золы // Обогащение руд. 2015. № 5. С. 60–63. **ПИАБ**

REFERENCES

1. *Zahar'yan S. V., Gedgagov E. I., YUn A. B.* Increase in an Ecological Safety at the Entities of Non-Ferrous Metallurgy Due to Use of Sorption Processes. Ecology and Industry of Russia. 2018. T.22. no.1. P.26–32. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-26–32.

2. *Kudelko J.* Effectiveness of mineral waste management. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2018. no. 1–9. pp. 440–448. DOI:10.1080/17480930.2018.1438036

3. *Solodukhina M. A. and Doroshkevich S. G.* Soils of steppe landscapes in the Sherlovogorsk ore region (Eastern Transbaikalia), Geospher. 2019. P.24–34. [In Russ]. <https://doi.org/10.17223/25421379/13/3>.

4. *Shadrinova I. V., Gorlova O. E., Zhilina V. A.* The new paradigm of an environmentally-oriented resourcesaving technologies for processing of mining. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 687 (2019) 066048. DOI:10.1088/1757-899X/687/6/066048.

5. *Abdrakhmanova R. N., Orehkova N. N., Gorlova O. E.* Adaptation of the SAVMIN process for mine watertreatment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 687 (2019) 066077. DOI:10.1088/1757-899X/687/6/066077.

6. *Gorlova O. E., Shadrinova 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 Proceedings Congress. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 2019. pp. 3279–3287. DOI:10.21285/1814-3520-2021-1-97-107.

7. Sivashankari L., Rajkishore S. K., Lakshmanan A. Optimization of Dry Milling Process for Synthesizing Nano Zeolites. *International Journal of Chemical Studies*. 2019. vol. 7, no. 4. P. 328–333.

8. 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. *Groundwater for Sustainable Development*. 2020. Vol. 10. pp. 100311. DOI:10.1016/j.gsd.2019.100311.

9. Li H., Watson J., Zhang Y., Lu H., Liu Zh. Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 298. pp. 122421. DOI:10.1016/j.biortech.2019.122421.

10. Uçkun S. Activation of Malatya Hekimhan Zeolites with Mechanochemical Method and Usage in Heavy Metal Adsorption. *Journal of Mining Science*. Vol. 56. P. 1010–1023 (2020). DOI: 10.1134/S1062739120060137.

11. Hong M., Yu L., Wang Y., Jian Zhang. Heavy Metal Adsorption with Zeolites: The Role of Hierarchical Pore Architecture. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 359. P. 363–372. DOI: 10.1134/S1062739120060137.

12. Razmahnin K. K. Development and justification of treatment and modification technology for East Transbaikalia zeolite rocks. *Journal of Mining Sciences*. 2021. no. 3. pp. 148–157. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20210314.

13. Wang P., Sun Z., Hu Y. Eaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 695. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.133893.

14. Shushkov D. A., Shuktomova I. I. Sorption of radioactive elements by zeolite-bearing rocks. *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*. 2013, iss. 1. pp. 69–73. [In Russ].

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

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

17. Rostovtsev V. I., Bryazgin A. A., Korobeinikov M. V. Increasing the selectivity of grinding and the complexity of the use of mineral raw materials based on the radiation modification of its properties. *Journal of Mining Sciences*. 2020. no. 6. pp. 136–146. [In Russ].

18. Recovery of mining waste in the complex development of mineral resources: The monograph. Edited by V. A. Chanturia and I. V. Shadrinova. Moscow: Publishing house Sputnik +, 2019. 120 p.

19. Kotova O. B., Shushkov D. A. A process of zeolites production from fly ash. *Obogashchenie Rud*. 2015. no. 5. pp. 60–63. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Размахнин Константин Константинович — докт. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0003-2944-7642>, ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет, 672039, Чита, ул. Александрo-Заводская, д. 39, Россия, e-mail: constantin-const@mail.ru;

Хатькова Алиса Николаевна — докт. техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>, ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет, 672039, Чита, ул. Александрo-Заводская, д. 39, Россия, e-mail: alisa1965.65@mail.ru;

Шумилова Лидия Владимировна — докт. техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>, ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет, 672039, Чита, ул. Александрo-Заводская, д. 39, Россия, e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для контактов: *Размахнин К. К.*, e-mail: constantin-const@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Razmahnin K. K., Dr. Sci. (Eng.), <http://orcid.org/0000-0003-2944-7642>, Transbaikal state university, 672039, Chita, Aleksandro-Zavodskaja st., 39, Russia, e-mail: constantin-const@mail.ru

Hat'kova A. N., Dr. Sci. (Eng.), professor, <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>, Transbaikal state university, 672039, Chita, Aleksandro-Zavodskaja st., 39, Russia, e-mail: alisa1965.65@mail.ru

Shumilova L. V., Dr. Sci. (Eng.), professor, <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>, Transbaikal state university, 672039, Chita, Aleksandro-Zavodskaja st., 39, Russia, e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Получена редакцией 03.07.2023; получена после рецензии 11.08.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 03.07.2023; received after the review 11.08.2023; accepted for printing 10.10.2023.

