

УДК 622.7, 553.556 : 622.353.4.004

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ТЕХНОЛОГИЙ ОБОГАЩЕНИЯ И МОДИФИКАЦИИ
ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

К. К. Размахнин

*Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН
E-mail: igdranchita@mail.ru, ул. Александрo-Заводская, 30, 672032, г. Чита, Россия*

Рассмотрены вопросы применения к цеолитсодержащим породам Восточного Забайкалья акустических и термических методов воздействия. Представлен химический и минеральный состав крупнейших месторождений природных цеолитов Забайкальского региона. Выявлены оказывающие влияние на качество цеолитов основные компоненты пород, к которым относятся: железосодержащие примеси, монтмориллонит, гидрослюда, кварц, кальцит, микроклин, кристобалит и пироксены. Приведены результаты экспериментальных работ по изучению эффективности обработки цеолитсодержащих пород направленными методами воздействия. Разработана технология обогащения цеолитовых пород с учетом ранее проведенных исследований по применению обработки ускоренными электронами и мощными электромагнитными импульсами. Определены параметры модификации свойств минералов, входящих в состав цеолитсодержащих пород. Установлено изменение магнитных свойств железосодержащих минералов в составе пород, положительно влияющих на эффективность извлечения вмещающих примесей. Показана эффективность применения рекомендуемых методов воздействия в технологических схемах обогащения природных цеолитов Восточного Забайкалья с целью повышения их адсорбционной способности.

Цеолитсодержащие породы, обогащение, модификация, направленные методы, адсорбционная способность, перспективы использования

DOI: 10.15372/FTPRPI20210314

Цеолитсодержащие породы, благодаря своим уникальным свойствам, находят широкое применение в различных сферах производства. В перспективе они могут занять важное место в развитии таких секторов экономики, как горнопромышленная экология, строительство, сельское хозяйство, фармацевтика, нефтяное и газовое производство. Масштабное использование природных цеолитов обуславливает создание минерально-сырьевых кластеров в местах расположения крупнейших месторождений. К породам, содержание цеолитов в которых составляет ниже 60 %, применяют технологии обогащения, обеспечивающие максимальное извлечение вмещающих примесей, как правило, представленных окислами железа, кварцем, полевыми шпатами и остатками органики. Очистка природных цеолитов от примесей позволяет изменить их физические и физико-химические свойства, основным из которых является адсорбционная способность, определяющая эксплуатационную ценность всех без исключения типов сорбентов.

Наиболее распространенные методы обогащения в практике переработки цеолитсодержащих пород — дробление, грохочение, электромагнитное обогащение, а также воздействие различными химическими реагентами для модификации поверхностных и приповерхностных слоев минералов цеолитов — в большинстве случаев не обеспечивают необходимую чистоту цеолитовой продукции, соответствующую техническим условиям в нефтегазовом производстве, фармацевтике, изготовлении биологически активных добавок, очистке сточных и оборотных вод и т. д. Требуемое качество цеолитов природного происхождения может быть обеспечено за счет их более глубокой очистки от вмещающих примесей путем применения различных методов разупрочнения, дезинтеграции и модификации, к которым принято относить энергетические, акустические, химические и иные воздействия. Известно, что наиболее эффективными направленными методами воздействия на минеральное сырье с целью повышения контрастности и раскрываемости минералов являются: обработка ультразвуком, СВЧ, ускоренными электронами, мощными электромагнитными импульсами и химическими реагентами.

Разработка технологий обогащения и модификации цеолитсодержащих пород зависит от их минералого-технологических свойств, вещественного состава, текстурных и структурных особенностей. Основные характеристики природных цеолитов Восточного Забайкалья, региона, где сосредоточено до 70 % российских запасов данного типа сырья, достаточно подробно описаны в работах [1–4]. Отмечается, что цеолитовые месторождения представлены клиноптилолитом, морденитом и шабазитом. Наиболее крупные месторождения цеолитсодержащих пород в Забайкалье — Холинское, Бадинское, Шивиртуйское и Талан-Гозагорское — образуют крупную минерально-сырьевую базу (17 млрд т) [2]. По минеральному составу цеолитовые породы достаточно разнообразны (табл. 1) [5]. Они характеризуются тонкой вкрапленностью вмещающих примесей, что усложняет глубокую очистку минералов цеолитов с использованием традиционных методов обогащения.

ТАБЛИЦА 1. Минеральный состав цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья [1, 2]

Минерал	Содержание минеральных фаз по месторождениям, %			
	Шивиртуйское	Холинское	Бадинское	Талан-Гозагорское
Клиноптилолит	45–65	60–66	63–74	—
Морденит	—	—	7	—
Шабазит	—	—	—	8–10
Монтмориллонит	15–20	3–5	3–5	8–10
Гидролюда	3–5	—	—	2–3
Кварц	3–10	3–5	1–3	5–10
Кальцит	2–5	—	—	~2
Микроклин	3–5	3–5	—	—
Плагиоклазы	—	—	—	—
Кристаллит	2–3	10–12	15–18	—
Пироксены	—	—	—	~21
Рентгеноаморфная фаза	<5	10–12	<10	—
Распределение железа по фазам, % отн. вес.:				
гематит	32.3/0.40	6.7/0.06	3.8/0.02	59.3/4.88
монтмориллонит	56.4/0.71	40/0.37	40/0.21	9.4/0.77
гидролюда, тонкодисперсные гидроксиды железа	11.3/0.14	53.3/0.49	5.62/0.30	21.2/1.74
оливин	—	—	—	10.1/0.83

Из приведенных данных следует, что основными элементами цеолитов Восточного Забайкалья являются железосодержащие примеси, монтмориллонит, гидрослюда, кварц, кальцит, микроклин, кристобалит и пироксены. Негативное влияние на сорбционную способность природных цеолитов, наряду с минеральными загрязнениями, оказывает органическая составляющая в порах и на поверхности минералов.

Важную роль при выборе технологий переработки, обогащения и модификации цеолитсодержащих пород играют технологические свойства породообразующих и цеолитовых минералов: плотность, твердость, удельная магнитная восприимчивость, электропроводность, а также вкрапленность и характер срастания [1]. Существенное значение имеют такие свойства природных цеолитов, как ионообменная емкость, растворимость в воде, кислотах, щелочах и взаимодействие с другими электролитами, а также адсорбционная способность, термостойкость.

Технологии обогащения и модификации цеолитсодержащих пород должны включать классические операции удаления вмещающих примесей, к которым в первую очередь следует отнести магнитную и электрическую сепарации. Эффективность извлечения железосодержащих примесей зависит от параметров применения подготовительных операций в виде направленных методов воздействия (обработка ультразвуком, ускоренными электронами и т. д.), дробления и грохочения, приводящих к повышению контрастности разделяемых минералов и их раскрытию. Глубокая очистка природных цеолитов от примесей кварца и полевых шпатов может быть обеспечена за счет повышения контрастности, достигаемой применением различных методов химического воздействия, в частности обработкой парами салициловой кислоты [2].

Следует отметить, что ранее проведенные исследования по изучению влияния энергетических методов воздействия на цеолитсодержащие породы, таких как обработка мощными электромагнитными импульсами (МЭМИ) [3] и ускоренными электронами [4] на обогатимость цеолитсодержащих пород, показали свою эффективность. Значительные результаты достигнуты при извлечении железосодержащих примесей из цеолитовых пород с применением магнитной сепарации (табл. 2, 3). Однако применение данных методов воздействия не обеспечивает очистку от немагнитных примесей и органики за счет направленного влияния на контрастность минералов, содержащих оксиды железа. В этой связи требуется внедрение в технологию обогащения цеолитсодержащих пород операций, обеспечивающих отделение минералов кварца, полевых шпатов и других примесей.

Результаты глубокого обогащения природных сорбентов показал, что одним из наиболее эффективных способов очистки от вмещающих примесей, в том числе органических, является ультразвуковая обработка, что предопределило проведение научных исследований по изучению возможности применения данного метода к цеолитсодержащим породам Восточного Забайкалья.

В качестве подготовительной операции перед магнитной и электростатической сепарацией для повышения эффективности отделения минералов цеолитов от вмещающих примесей разработан способ предварительной ультразвуковой обработки суспензии пород. Основой послужили результаты проведенных экспериментальных исследований, включавших рассев цеолитсодержащих пород на классы крупности, обработку водной суспензии ультразвуком в течение 0.5–7.0 мин на установке УЗДН-1 при варьировании частоты ультразвука в пределах 20–44 кГц с дальнейшей декантацией взвешенных частиц. Для оценки эффективности ультразвукового воздействия на цеолитсодержащие породы использовался метод фотоседиментационного анализа, отражающий изменение размера частиц обрабатываемой породы. Степень диспергирования частиц цеолитового сырья в результате ультразвуковой обработки определялась по коэффициенту светопропускания через суспензию (водная смесь с породой), зависящему от количества в осадке минеральных частиц, накопленных за определенный временной интервал.

ТАБЛИЦА 2. Результаты магнитной сепарации цеолитсодержащих пород крупностью 0.1 – 1.0 мм

Месторождение	Класс крупности, мм	Содержание в продукте, %		
		цеолитов	примесей железа	иных примесей
Ультразвуковая обработка				
Шивыртуйское	– 1.0 + 0.5	83.10	2.21	14.69
	– 0.5 + 0.3	85.70	1.98	19.32
	– 0.3 + 0.1	88.90	1.81	9.73
Талан-Гозагорское	– 1.0 + 0.5	75.20	3.74	21.06
	– 0.5 + 0.3	83.70	3.21	13.09
	– 0.3 + 0.1	88.60	2.09	9.31
Обжиг				
Шивыртуйское	– 1.0 + 0.5	83.50	1.19	15.31
	– 0.5 + 0.3	85.30	0.92	13.78
	– 0.3 + 0.1	88.70	0.55	10.75
Талан-Гозагорское	– 1.0 + 0.5	74.80	3.25	21.95
	– 0.5 + 0.3	83.90	1.00	15.10
	– 0.3 + 0.1	88.90	0.08	11.02
МЭМИ				
Шивыртуйское	– 1.0 + 0.5	83.10	1.05	15.85
	– 0.5 + 0.3	85.20	0.80	14.00
	– 0.3 + 0.1	88.60	0.31	11.09
Талан-Гозагорское	– 1.0 + 0.5	74.90	3.70	21.40
	– 0.5 + 0.3	84.10	1.01	14.89
	– 0.3 + 0.1	89.50	0.06	10.44
Обработка ускоренными электронами				
Шивыртуйское	– 1.0 + 0.5	84.20	1.11	14.69
	– 0.5 + 0.3	85.90	0.88	13.22
	– 0.3 + 0.1	88.90	0.36	10.74
Талан-Гозагорское	– 1.0 + 0.5	75.20	3.74	21.06
	– 0.5 + 0.3	84.90	1.08	14.02
	– 0.3 + 0.1	89.60	0.12	10.28

Примечание. Среднее содержание примесей железа в исходном материале Шивыртуйского; месторождения — 3.14, Талан-Гозагорского — 11.20 %

Изучено воздействие ультразвука на концентрацию минералов примесей в сливе в зависимости от времени обработки и от частоты ультразвука, а также определена зависимость содержания мономинералов цеолита от крупности пород после их ультразвуковой обработки. Результаты исследований представлены на рис. 1, 2, знаками обозначены экспериментальные точки. Видно, что концентрация минералов примесей в декантационном сливе увеличивается с ростом продолжительности воздействия ультразвуком, а также при повышении частоты ультразвука до 40 кГц. Использование ультразвукового воздействия усиливает диспергирующий эффект за счет точечной эрозии твердой поверхности на границе фаз, ускоряя процесс концентрирования цеолитов. Ультразвуковая обработка цеолитсодержащих пород обеспечивает высокую степень отделения глинистого компонента.

ТАБЛИЦА 3. Результаты магнитной сепарации тонкодисперсных цеолитсодержащих пород крупностью менее 0.1 мм

Месторождение	Класс крупности, мм	Извлечение примесей Fe в магнитном продукте, %	Массовая доля Fe в магнитном продукте, %
Ультразвуковая обработка			
Шивыртуйское	$-0.100 + 0.074$	94.5	95.6
	$-0.074 + 0.050$	98.8	96.2
Талан-Гозагорское	$-0.100 + 0.074$	98.3	96.4
	$-0.074 + 0.050$	99.3	97.7
Обжиг			
Шивыртуйское	$-0.100 + 0.074$	95.8	97.1
	$-0.074 + 0.050$	98.6	97.4
Талан-Гозагорское	$-0.100 + 0.074$	99.3	98.0
	$-0.074 + 0.050$	99.7	98.8
МЭМИ			
Шивыртуйское	$-0.100 + 0.074$	95.5	96.9
	$-0.074 + 0.050$	98.5	97.2
Талан-Гозагорское	$-0.100 + 0.074$	99.1	98.3
	$-0.074 + 0.05$	99.7	98.9
Обработка ускоренными электронами			
Шивыртуйское	$-0.100 + 0.074$	95.4	96.7
	$-0.074 + 0.050$	98.2	97.1
Талан-Гозагорское	$-0.100 + 0.074$	98.3	97.4
	$-0.074 + 0.050$	99.6	98.7

Примечание. Удельная магнитная сила в изодинамической зоне — 0.0153 Н/с²; ширина изодинамической зоны — 8.0 мм; сила тока — 1.57 А

Доказано, что после дробления и измельчения, воздействия ультразвуком, сушки, грохочения и обеспыливания цеолитовые породы крупностью более 0.1 мм обогащались на электромагнитном сепараторе марки 138-ТСЭ, крупностью менее 0.1 мм — на сепараторе СИМ-1 (см. табл. 2, 3). Электромагнитная сепарация в изодинамическом поле — эффективный метод очистки тонкодисперсных пород, который позволяет снижать содержание примесей железа в классе крупности $-0.100 + 0.050$ мм с 3.14–11.72 до 0.9–1.1 %. Наиболее эффективной является электромагнитная сепарация класса крупности $-0.5 + 0.3$ мм, при которой получен продукт с содержанием цеолита до 85.9 %.

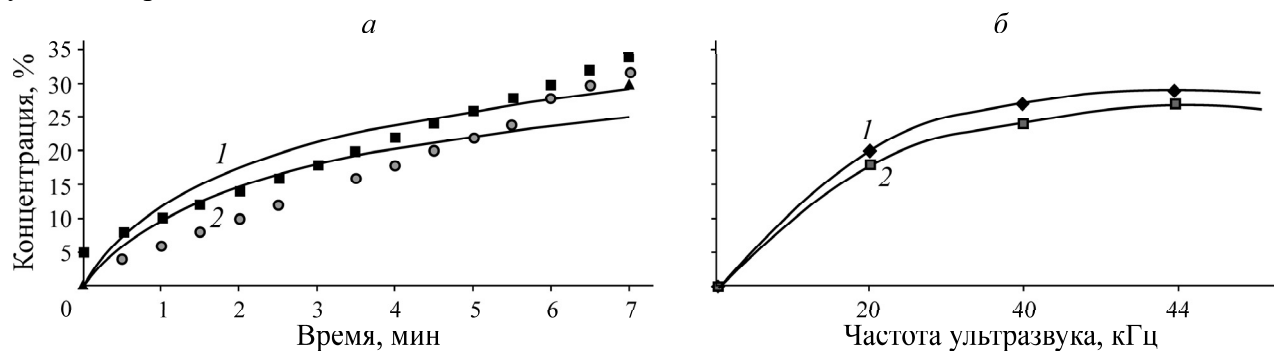


Рис. 1. Зависимость концентраций минералов примесей в сливе от времени воздействия ультразвуком (а); в декантационном сливе от частоты ультразвука (б): 1 — Шивыртуйского; 2 — Талан-Гозагорского месторождений; $R^2 = 0.7$

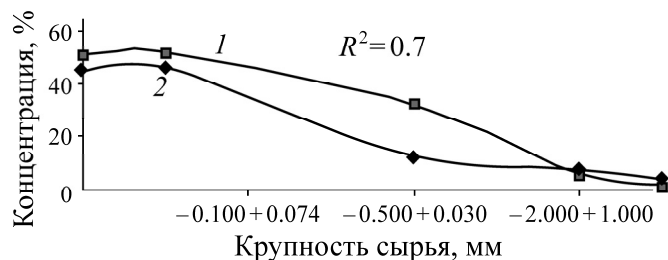


Рис. 2. Зависимость содержания мономинералов цеолита от крупности сырья после обработки ультразвуком при частоте 40 кГц: 1 — в шабазитсодержащих андезитобазальтах Талан-Гозагорского месторождения; 2 — в клиноптилолит-цеолитсодержащих породах Шивиртуйского месторождения

Наибольший эффект применения ультразвуковой обработки достигнут при обогащении шабазитсодержащих андезитобазальтов Талан-Гозагорского месторождения, что обусловлено большими различиями в магнитной восприимчивости шабазита и породообразующих минералов — пироксена, оливина и других. С помощью сухой электромагнитной сепарации фракций крупностью $-0.20 + 0.05$ мм получены концентраты с содержанием шабазита 95–98 %. Общее извлечение шабазита составило 70 %.

Установлено, что цеолитсодержащие породы Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений поддаются обогащению путем дробления, грохочения, ультразвуковой обработки, сушки и электромагнитной сепарации с получением полицеолитового концентрата, содержащего 88.4–98.0 % ценного компонента. В результате ультразвуковой обработки цеолитсодержащих пород при частоте 40 кГц в течение 5 мин повышается эффективность процесса магнитной сепарации с сокращением количества перечистных операций, а также увеличивается содержание цеолита в концентрате до 85–95 %. Предварительная акустическая обработка суспензии цеолитсодержащих пород приводит к интенсификации процесса отделения цеолита от минералов примесей (полевого шпата, монтмориллонита, кварца и др.), что обусловлено диспергирующим и звукокапиллярным эффектами, зависящими от происходящих кавитационных процессов.

В [6–9] указано, что повышение эффективности вскрываемости алюмосодержащих пород может достигаться за счет применения дегидратирующего обжига. Высокотемпературная обработка пород проводится с целью придания им необходимых физико-химических свойств, для перевода полезных компонентов в извлекаемую форму, удаления примесей и подготовки пород к последующему обогащению (магнитной сепарации). Применение предварительного обжига может рассматриваться как эффективный способ интенсификации процесса обогащения цеолитсодержащих пород за счет изменения физических свойств минералов. В этой связи проведены исследования по влиянию обжига на технологические свойства цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья.

Обжиг осуществлялся в диапазоне температур 200–1400 °С в термоанализаторе STA 449 C (ФРГ) с дальнейшим изучением свойств цеолитовых пород методом мессбауэровской спектроскопии до и после обжига (рис. 3). Определено, что термическое воздействие на цеолитсодержащие породы посредством обжига приводит к физико-химическим изменениям их поверхности. При достижении температур 750–800 °С происходит полное разрушение кристаллической решетки минералов цеолитов (шабазита, клиноптилолита, морденита), однако при температурах ниже критических обжиг способствует разделению цеолита и вмещающих его минералов. В процессе обжига происходит дегидратация цеолитсодержащих пород, и существующее равновесие нарушается, т. е. устойчивая кристаллическая структура превращается в метастабильную, изменяется структура цеолитовых пород, о чем свидетельствуют результаты мессбауэровской спектроскопии исходных и обожженных образцов при температуре 600 °С (рис. 3а–в).

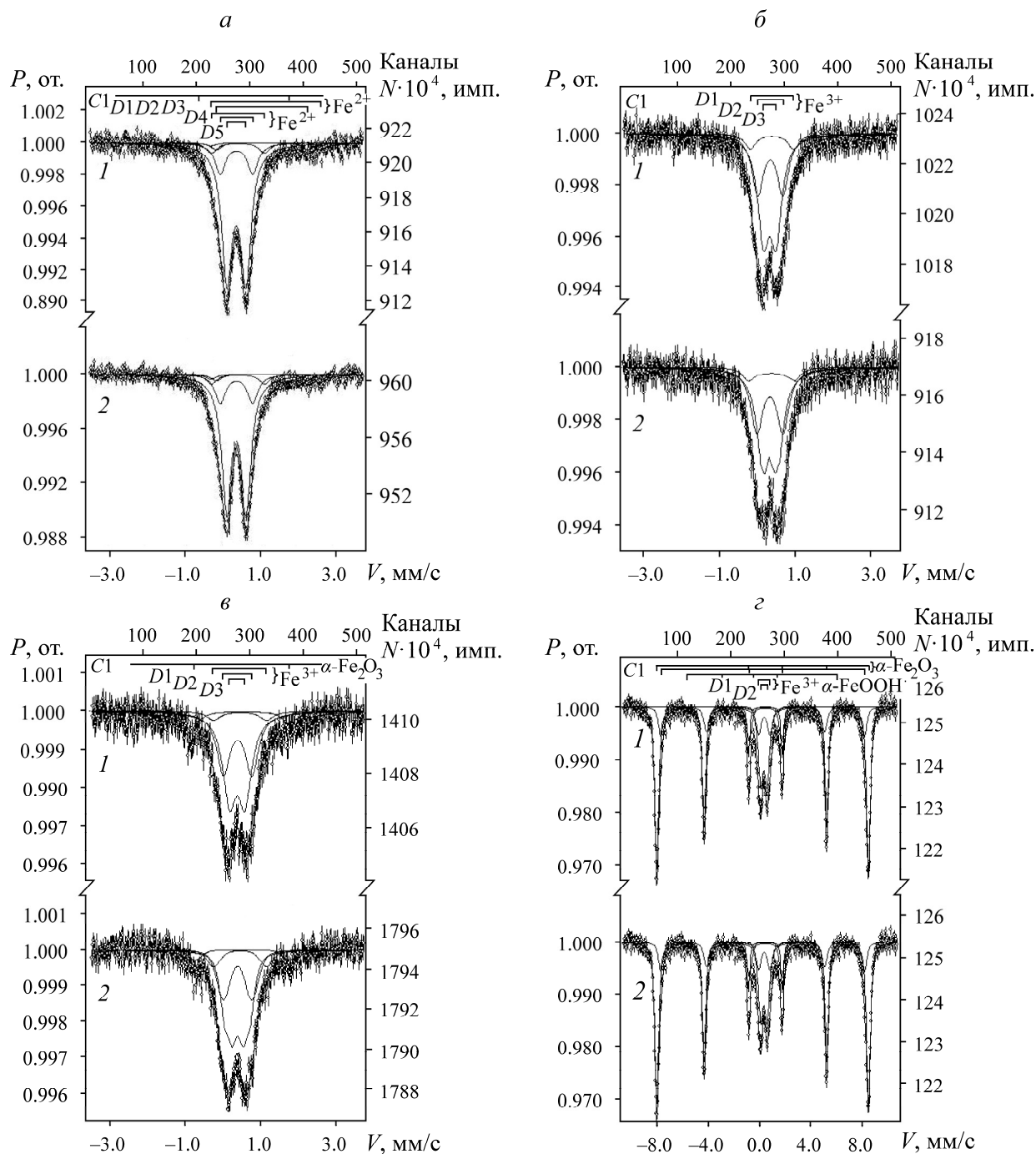


Рис. 3. Мессбауэровские спектры образцов цеолитов Шивыртуйского (а); Холинского (б); Бадинского (в); Талан-Гозагорского (з) месторождений: 1 — исходных; 2 — после обжига

Анализ полученных результатов показал, что цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья имеют достаточно сложный состав, из железосодержащих минералов обнаружен гематит различной крупности. В невысоком количестве он содержится в Бадинском месторождении, в еще меньшем — в Шивыртуйском и полностью отсутствует в Холинском. При обжиге происходит увеличение доли крупнокристаллического гематита с одновременным уменьшением тонкодисперсного.

При температуре 400–600 °С наблюдается частичное удаление химически связанной воды, подобно тому, как это происходит при обработке цеолитовых пород ускоренными электронами и при обработке мощными электромагнитными импульсами. Механизм воздействия этих видов

обработки цеолитовых пород в значительной степени схож, выбор того или иного метода обусловлен лишь экономической целесообразностью применения и возможностями аппаратного оформления при внедрении в производственный процесс.

В определенном интервале температур предварительного обжига отмечено укрупнение зерен гематита, что может существенно упростить процесс извлечения электромагнитных примесей из цеолитовых пород. Установлено, что при температуре 600–800 °С замечается укрупнение частиц гематита, а в температурном интервале 800–1400 °С этот процесс увеличивается в 6 раз. Рост зерна гематита напрямую зависит от времени нагрева.

Выявленные химические преобразования при воздействии высокими температурами определили необходимость проведения исследований по влиянию обжига на цеолитсодержащие породы и изучения процесса извлечения из них железосодержащих примесей (см. табл. 2 и 3). Шабазитсодержащие андезитобазальты Талан-Гогагорского месторождения по сравнению с другими цеолитами имеют больше железосодержащих примесей (до 89 % от общей массы), в основном в виде гематита в базальтах. Рассмотрено влияние обжига на магнитные свойства цеолитов шабазитового типа Талан-Гогагорского месторождения методом мессбауэровской спектроскопии (рис. 3з).

В табл. 4 сведены параметры и интерпретация исследованных образцов шабазитов Талан-Гогагорского месторождения. Значение резонансного эффекта ε исходного образца — 3.185, после обжига — 3.251 %. Импульсная обработка приводит к увеличению содержания железа в образцах. Этот эффект обусловлен удалением летучих при дегидратации и разрыхлением структуры цеолита, обеспечивая при этом лучшую растворимость.

Анализ результатов показал достаточно сложный состав шабазитсодержащих андезитобазальтов, в которых железосодержащие минералы представлены гематитом различной дисперсности, гидрогетитом, железистым кварцем.

ТАБЛИЦА 4. Результаты мессбауэровских исследований цеолитсодержащих пород Талан-Гогагорского месторождения до и после обжига

Компонент спектра	Изомерный сдвиг δ , мм/с		Квадрупольное расщепление Δ , мм/с		Магнитные поля на ядрах $Fe^{57}N$, кЭ		Площади компонент S , %		Интерпретация
	до	после	до	после	до	после	до	после	
C1 (Fe^{3+})	0.37	0.37	–0.22	–0.24	512	512	55.9	52.7	Гематит
C2 (Fe^{3+})	0.39	0.38	–0.23	–0.21	491	492	18.4	23.8	
C3 (Fe^{3+})	0.36	0.36	–0.28	–0.28	362	362	0.6	1.3	Гетит-гидрогетит Монт-мориллонит, гидрослюда
D1 (Fe^{3+})	0.38	0.38	0.78	0.84	0	0	10.1	9.2	
D2 (Fe^{3+})	0.38	0.35	0.54	0.52	0	0	15.0	13.7	

При обжиге цеолитсодержащих пород происходит удаление гигроскопической влаги и выгорание органических примесей, что оказывает существенное влияние на повышение адсорбционной способности за счет высвобождения порового пространства. Кроме того, достигается разложение глинистых минералов, входящих в состав цеолитсодержащих пород. В частности, основной глинистый минерал в цеолитовом сырье — монтмориллонит — при температуре 500–600 °С полностью теряет химически связанную воду с одновременным разрушением кристаллической решетки и образованием смеси глинозема Al_2O_3 и кремнезема SiO_2 аморфного характера.

Необходимо отметить, что при обжиге шабазитсодержащих андезитобазальтов наблюдается увеличение количества крупнокристаллического гематита. Показатель магнитной восприимчивости гематита возрастает с $14 \cdot 10^{-8} - 25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ до $450 \cdot 10^{-8} - 680 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, что существенно интенсифицирует эффективность магнитной сепарации (см. табл. 2 и 3). В результате обогащения шабазитсодержащих пород Талан-Гозагорского месторождения с использованием магнитной сепарации получены концентраты с содержанием шабазита 95–98 % при крупности $-0.20 + 0.05 \text{ мм}$ и извлечении 70 %. Достигнутые высокие технологические показатели характеризуются значительными различиями в магнитной восприимчивости шабазита и породообразующих минералов — пироксена, оливина, гематита и других.

Наиболее эффективной для обогащения цеолитсодержащих пород Шивиртуйского месторождения оказалась электромагнитная сепарация для класса $-0.3 + 0.1 \text{ мм}$, при этом получены продукты с содержанием цеолита 88.6–88.9 %.

Глубокая очистка цеолитсодержащих пород от примесей железа, а также удаление из пор цеолитов содержащегося в них значительного количества органики, существенно снижающей их сорбционную емкость, может быть достигнута посредством комбинирования традиционных способов обогащения (магнитной и электростатической сепарации) с направленными методами воздействия (рис. 4).



Рис. 4. Схема переработки цеолитсодержащих продуктов Шивиртуйского и Талан-Гозагорского месторождений

Проведенные исследования по определению адсорбционной способности природных цеолитов Восточного Забайкалья показали эффективность применения рекомендуемых методов воздействия в технологических схемах их обогащения (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Адсорбционная способность природных цеолитов исходных и после обогащения

Месторождение (тип)	Адсорбционная способность цеолитов, мг/г	
	исходного	обогащенного
Шивиртуйское, Холинское (клиноптилолит)	147	164
Бадинское (морденит)	109	133
Талан-Гозагорское (шабазит)	246	287

ВЫВОДЫ

Предварительная ультразвуковая обработка цеолитсодержащих пород при частоте 40 кГц в течение 5 мин приводит к интенсификации процесса отделения цеолита от минералов примесей. Увеличивается эффективность магнитной сепарации и содержание цеолита в концентрате до 85–98 %. Установлено, что повышение эффективности извлечения железосодержащих примесей из цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья методом магнитной сепарации может быть обеспечено применением ультразвуковой обработки, способствующей увеличению магнитной восприимчивости гематита до $215\text{--}220\cdot 10^{-8}\text{ м}^3/\text{кг}$, обусловленному удалением пленок оксидов железа с его поверхности, а также разрушением монтмориллонитовой оболочки минеральных зерен.

Обжиг цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья при температуре 800–1400 °С приводит к увеличению в них доли крупнокристаллического гематита в 6 раз при повышении его магнитной восприимчивости с $14\cdot 10^{-8}\text{--}25\cdot 10^{-8}$ до $450\cdot 10^{-8}\text{--}680\cdot 10^{-8}\text{ м}^3/\text{кг}$, что позволяет достичь извлечения 89.5–99.7 %. Применение к цеолитсодержащим породам направленных энергетических и физических воздействий существенно интенсифицирует процесс извлечения железосодержащих примесей методом магнитной сепарации. В результате получены цеолитовые продукты с содержанием примесей железа не более 0.08–2.09 %, что удовлетворяет требованиям к данному виду сырья в различных отраслях экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хатькова А. Н. Минералого-технологическая оценка цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья. — Чита: ЧитГУ, 2006. — 243 с.
2. Пат. № 2229342 РФ. Способ обогащения цеолитсодержащих туфов / А. Н. Хатькова, В. П. Мязин, Е. А. Никонов, К. К. Размахнин / Оpubл. в БИ. — 2004. — № 24.
3. Чантурия В. А., Бунин И. Ж., Иванова Т. А., Хатькова А. Н. Влияние мощных электромагнитных импульсных воздействий на технологические свойства цеолитсодержащих пород // ГИАБ. — 2004. — Семинар № 21. — С. 311–313.
4. Хатькова А. Н., Ростовцев В. И., Размахнин К. К. Влияние воздействия ускоренными электронами на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 167–174.
5. Павленко Ю. В. Прогнозно-поисковые комплексы для промышленных типов цеолитсодержащих пород Читинской области. — Чита: Читагеология, 1991. — 125 с.
6. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. — М.: Химия, 1984. — 592 с.
7. Черняк А. С. Химическое обогащение руд. — М.: Недра, 1976. — 296 с.
8. Черняк А. С. Химическое обогащение руд. — М.: Недра, 1987. — 224 с.
9. Чижиков Д. М., Лайнер Ю. А. Применение в СССР процессов обжига в кипящем слое. — М.: ЦНИИНЦМ, 1960. — С. 207–216.

Поступила в редакцию 16/III 2021

После доработки 15/IV 2021

Принята к публикации 24/V 2021