

## ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД

К.К. Размахнин<sup>1</sup>, А.Н. Хатькова<sup>1</sup>, Л.В. Шумилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет, Чита, Россия, e-mail: igdranchita@mail.ru

**Аннотация:** Изучены вопросы гидрохимической модификации цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и Холинского месторождений Восточного Забайкалья. Определена возможность использования серноокислотной модификации природных цеолитов с целью повышения их адсорбционной способности. Разработана принципиальная технология переработки и химической модификации цеолитовых пород, базирующаяся на результатах ранее проведенных исследований по применению направленных методов рудоподготовки (обработки ультразвуком, ускоренными электронами, мощными электромагнитными импульсами) в сочетании с традиционными методами обогащения (электростатическая и электромагнитная сепарация) и кислотным воздействием (серной кислотой). Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению эффективности обработки цеолитсодержащих пород раствором серной кислоты. Определены параметры модификации цеолитов. Установлена зависимость кремниевого модуля и степени деалюминирования природных цеолитов Восточного Забайкалья от концентрации реагента модифицирования. Представлены результаты основанного на квантово-химическом взаимодействии частиц компьютерного моделирования и визуализации минералов шабазита, клиноптилолита и морденита, входящих в состав цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья, до и после кислотного деалюминирования. Разработана аппаратная схема реализации технологии химического модифицирования природных цеолитов. Установлены основные принципы алгоритма создания технологии химической модификации цеолитсодержащих пород. Определены параметры использования получаемой по разработанной технологии обогащения и модифицирования цеолитовой продукции в технологиях управления отходами горной промышленности.

**Ключевые слова:** цеолитсодержащие породы, природные цеолиты, обогащение, гидрохимическое модифицирование, деалюминирование, серная кислота, адсорбционная способность, моделирование, аппаратурное оформление, перспективы использования.

**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 гг.).

**Для цитирования:** Размахнин К. К., Хатькова А. Н., Шумилова Л. В. Гидрохимическая модификация цеолитсодержащих пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12. – С. 34–45. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_34.

### Hydrochemical modification of zeolite-bearing rocks

K.K. Razmakhnin<sup>1</sup>, A.N. Khatkova<sup>1</sup>, L.V. Shumilova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Transbaikal State University, Chita, Russia, e-mail: igdranchita@mail.ru

---

**Abstract:** The article discusses hydrochemical modification of zeolite-bearing rocks at Shyvyrtui and Khola deposits in East Transbaikalia. The sulfuric acid modification of natural zeolites toward enhancing their adsorbability is considered. The new process flow diagram developed for processing and chemical modification of zeolite rocks is based on the earlier research findings on the directional pretreatment techniques (ultrasounds, accelerated electrons, high-power electromagnetic impulses) in combination with the conventional methods (electrostatic and electromagnetic separation) and acid effect (sulfuric acid). The experimental studies into efficiency of zeolite-bearing rock treatment by a sulfuric acid solution are described. The process variables of modification of zeolites are determined. The relationship between the silicon module and the dealumination degree of natural zeolites of East Transbaikalia and the modification agent concentration is found. The computer-assisted modeling and visualization based on the quantum-chemical particle interaction is performed for shabasite, clinoptilolite and mordenite in composition of zeolite-bearing rocks of East Transbaikalia before and after acidic dealumination. The hardware environment is developed for implementation of the chemical modification technology of natural zeolites. The algorithm of the chemical modification technology for zeolite-bearing rocks is set. The application range is delineated for the zeolite product of the developed processing and modification technology in mining waste management and control.

**Key words:** zeolite-bearing rocks, natural zeolites, processing, hydrochemical modification, dealumination degree, sulfuric acid, adsorbability, modeling, hardware environment, application prospects.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-17-00040: Scientific Substantiation and Development of Clean and Waste-Free Processing Technologies for Natural Minerals and Manmade Materials (2022–2023).

**For citation:** Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., Shumilova L. V. Hydrochemical modification of zeolite-bearing rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12):34-45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_34.

---

## Введение

Сорбенты природного происхождения, такие как цеолитсодержащие породы (ЦСП), представляют собой доступное сырье многоцелевого назначения. Данный вид сырья за счет уникальных адсорбционных свойств может с высокой степенью эффективности применяться при реализации природоохранных мероприятий, в том числе в системах управления горнопромышленными отходами [1, 2].

Применение ЦСП в горной промышленности в настоящее время ограничивается в основном использованием при закладке выработанного пространства

в смеси с пустыми породами и минеральным сырьем хвостохранилищ [3–5]. Однако уникальные физико-химические свойства цеолитов природного происхождения определяют перспективы их эффективного использования в технологиях существенного сокращения, ликвидации и предотвращения негативного влияния отходов горной промышленности на окружающую среду. В частности, данный вид минерального сырья может применяться при очистке сточных и оборотных вод, отходящих дымовых газов, рекультивации техногенных образований и т.д. Ограниченность широкого применения ЦСП

обуславливается, в первую очередь, низким качеством минерального сырья, содержащим от 35 до 60% минералов цеолита [6]. В связи с высокой потенциальной востребованностью качественной цеолитовой продукции актуализируется вопрос создания эффективных технологий переработки, модифицирования и обогащения ЦСП [7, 8].

В качестве объектов исследований использованы монтмориллонит-клиноптилолитсодержащие породы Шивиртуйского и клиноптилолитсодержащие породы Холинского месторождений. При этом моделирование цеолитовых минералов ЦСП Восточного Забайкалья выполнялось для наиболее распространенных типов: шабазита (Талан-Гозагорское месторождение), клиноптилолита (Холинское и Шивиртуйское месторождения) и морденита (Бадинское месторождение).

### Методы

Ранее проведенными исследованиями установлено [3, 9, 10], что технологии обогащения и модификации ЦСП должны базироваться на сочетании классических методов удаления минералов-примесей (магнитная и электрическая сепарации) с направленной рудоподготовкой (акустическое (ультразвуковое) воздействие, обработка потоком ускоренных электронов, мощными электромагнитными импульсами (МЭМИ), обжиг), позволяющих в значительной степени повысить эффективность их раскрытия и извлечения за счет увеличения контрастности разделяемых минералов. При этом извлечение из ЦСП минералов монтмориллонита, окислов железа, кварца, кальцита и микроклина не обеспечивает в полной мере эффективное управление физико-химическими свойствами природных цеолитов, что существенно снижает потенциал их широкого применения в адсорбционных

технологиях, в том числе в технологиях обращения с отходами горной промышленности, и определяет необходимость исследования возможности химического модифицирования свойств природных цеолитов как дополнительного способа повышения их адсорбционной способности.

Одним из наиболее доступных и эффективных способов управления физико-химическими свойствами природных цеолитов в необходимом направлении является dealюминирование [5, 11, 12]. Данный метод позволяет получать высококачественную продукцию с повышенной адсорбционной способностью. Применение dealюминирования с целью модифицирования природных цеолитов позволит в значительной степени расширить направления их практического применения, в том числе в технологиях снижения негативного воздействия горнопромышленных отходов на окружающую среду. Частичное удаление алюминия из ЦСП обеспечит возможность существенного увеличения продолжительности их эффективного использования в процессах адсорбции, а также повысит химическую устойчивость цеолитов и замедлит процесс десорбции поглощенных элементов [5, 13–16]. С целью определения эффективности применения химического модифицирования ЦСП Восточного Забайкалья проведены исследования по применению метода dealюминирования в комплексе с классическими методами обогащения по технологии, включающей операцию обработки цеолитовых пород 5%-й серной кислотой (рис. 1). На рис. 1 представлены показатели обогащения ( $\gamma$  – выход,  $\beta$  – содержание,  $\varepsilon$  – извлечение) и сорбционные параметры цеолитов ( $A_d$  – сорбционная емкость,  $D$  – диаметр входного окна).

Исследования проводились по методике, включающей измельчение ЦСП в

мельнице стержневого типа, грохочение на классы крупности (-0,1+0,044 мм) и обесшламливание по классу крупности 0,05 мм. Цеолитовые породы обрабатывались ультразвуком с применением низкочастотного диспергатора УЗДН-1. При этом частота ультразвуковых волн составила 40 кГц, продолжительность воздействия – 5 мин.

Полученный осадок подвергался сушке и последующей электромагнитной сепарации, посредством которой извлекались железосодержащие минералы, основными из которых являются оливин и гематит. Согласно разработанной схеме, немагнитная фракция электромагнитной сепарации направлялась на электростатическую сепарацию для из-

влечения минералов кварца и полевых шпатов. При этом разделение осуществлялось с предварительной обработкой минерального сырья парами салициловой кислоты с концентрацией от  $0,2 \cdot 10^{-3}$  до  $0,4 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup>. Далее предусматривалось объединение непроводящей фракции электростатической сепарации с продуктами отмучивания и обесшламливания. Проводящая фракция электростатической сепарации, представляющая собой цеолитовый продукт (концентрат), подвергалась dealюминированию раствором серной кислоты с концентрацией от 5 до 20% при температуре от 70 до 75 °С с целью получения продукции с высокими ионообменными и сорбционными свойствами.



Рис. 1. Принципиальная схема обогащения и химического модифицирования ЦСП

Fig. 1. Schematic diagram of enrichment and chemical modification of zeolite-containing rocks

Для достижения высокой степени комплексности использования ЦСП технология предусматривает возможность dealюминирования объединенного продукта непроводящей фракции, материала отмучивания и обесшламливания, что позволяет расширить направления практического применения продуктов переработки цеолитовых пород, в частности, в стройиндустрии и при закладке выработанного пространства.

### Результаты и их обсуждение

Полученные в результате проведения исследований экспериментальные данные позволили установить, что предлагаемая технология обогащения и химического модифицирования ЦСП позволяет получить высококачественную продукцию с содержанием цеолитовых минералов 98,8%. Следует отметить, что dealюминирование цеолитов приводит к существенному повышению их адсорбционной способности, значения модуля Si/Al (табл. 1), а также увеличения диаметра входных окон цеолитов до 0,6–0,75 нм.

Вместе с тем изучение данных рентгеноструктурного анализа позволило установить отсутствие значительных нарушений кристаллических решеток

минералов цеолита месторождений Восточного Забайкалья при сернокислотном модифицировании. Кроме того, воздействие кислоты обуславливает эффект появления переходных пор и увеличение количества микропор в цеолитах, существенно повышающих их адсорбционную способность.

Кислотная обработка минералов цеолита (клиноптилолита) Шивыртуйского и Холинского месторождений приводит к частичному dealюминированию и декатионированию, за счет чего происходит увеличение диаметра его входных окон до указанных выше значений. При кислотном модифицировании минерала шабазита (ЦСП Талан-Гозагорского месторождения) происходит увеличение размеров его входных окон с 0,37–0,5 до 0,6–0,7 нм, морденита (ЦСП Бадинского месторождения) с 0,67–0,70 до 0,75 нм.

При этом увеличение концентрации серной кислоты от 0,25 до 2 н обуславливает декатионирование цеолитов и значительное повышение значений кремниевого модуля Si/Al (см. табл. 1). Дальнейшее увеличение концентрации серной кислоты приводит к разрушению кристаллической решетки цеолитов и их последующей аморфизации.

Таблица 1

**Показатели dealюминирования и значения кремниевого модуля ЦСП Восточного Забайкалья при сернокислотном воздействии**  
*Dealumination indices and values of the silicon module of the CSP of Eastern Transbaikalia under sulfuric acid exposure*

Концентрация серной кислоты, <i>n</i>	Цеолитовые породы Шивыртуйского месторождения		Цеолитовые породы Холинского месторождения	
	содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	кремниевый модуль (Si/Al)	содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	кремниевый модуль (Si/Al)
–	13,61	4,62	12,21	5,37
0,25	11,22	5,60	8,31	7,90
0,5	9,74	6,45	6,74	9,74
1	6,21	10,13	6,42	10,22
2	2,05	29,26	2,15	32,00

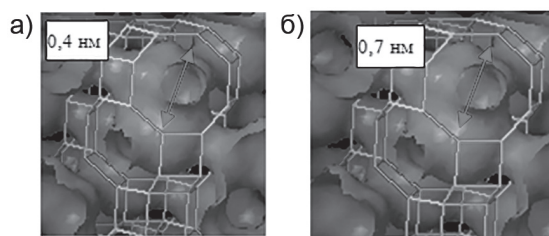


Рис. 2. Модель минерала шабазита до (а) и после (б) сернокислотного модифицирования  
 Fig. 2. Model of the mineral chabazite before (a) and after (b) sulfuric acid modification

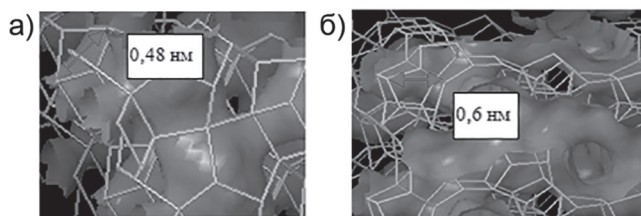


Рис. 3. Модель минерала клиноптилолита до (а) и после (б) сернокислотного модифицирования  
 Fig. 3. Model of the mineral clinoptilolite before (a) and after (b) sulfuric acid modification

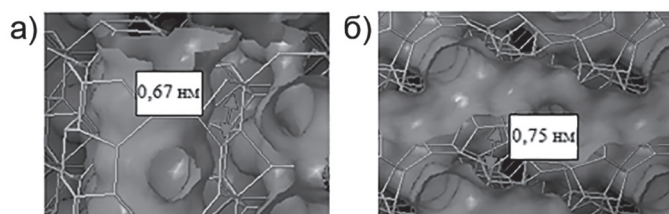


Рис. 4. Модель минерала морденита до (а) и после (б) сернокислотного модифицирования  
 Fig. 4. Model of the mineral mordenite before (a) and after (b) sulfuric acid modification

С помощью компьютерного моделирования цеолитовых минералов (шабазита, клиноптилолита, морденита), входящих в состав ЦСП Восточного Забайкалья, и базы данных типов цеолитовых каркасов (Европейская цеолитная ассоциация: URL: [asia.iza-structure.org/IZA-SC/ftc\\_table.php](http://asia.iza-structure.org/IZA-SC/ftc_table.php)) получены сведения об их структуре до и после dealюминирования (сернокислотного модифицирования), установлены геометрические параметры входных окон цеолитов (рис. 2–4).

Проведенное моделирование структуры природных цеолитов позволило установить, что при использовании сернокислотного dealюминирования минералов клиноптилолита, шабазита и мор-

денита происходит увеличение диаметра их входных окон до указанных выше значений, что обуславливает возможность применения природных цеолитов для сорбции радиоактивных, токсичных и иных опасных для окружающей среды компонентов отходов горного производства, в том числе жидких и газообразных. Основными сорбируемыми веществами при этом являются: радионуклиды (Cs, Sr, Th), мышьяк, нефтепродукты, SO<sub>2</sub> и т.д. (табл. 2).

На основе результатов моделирования процессов сернокислотного dealюминирования ЦСП Восточного Забайкалья установлено, что получаемая при использовании разработанной технологии обогащения и химического моди-



Таблица 2

**Параметры цеолитовой продукции, используемой в технологиях управления отходами горной промышленности**

**Parameters of zeolite products used in mining waste management technologies**

Цеолитовый минерал	Параметры входных окон, нм	Собируемые вещества
Шабазит	0,6–0,7	Sr <sup>90</sup> , Cs <sup>137</sup> , Th, As, нефтепродукты
Морденит	0,75	
Клиноптилолит	0,6–0,75	

фицирования высококачественная цеолитовая продукция в полной мере удовлетворяет предъявляемым требованиям к ее применению в адсорбционных технологиях, в том числе при обращении с отходами горной промышленности (очистка, обезвреживание, рекультивация, захоронение).

Необходимо отметить, что разработка технологий обогащения, переработки и модифицирования ЦСП обусловлена определением рациональных условий реализации данных процессов. В про-

цессе проведения исследований установлено, что химическое модифицирование ЦСП основано на селективном сернокислотном растворении входящих в их состав алюмосодержащих минералов. Вместе с тем использование серной кислоты с целью деалюминирования природных цеолитов, как и традиционное обогащение минерального сырья, требует применения процессов рудоподготовки и эффективного извлечения необходимого количества определенных компонентов из пород.

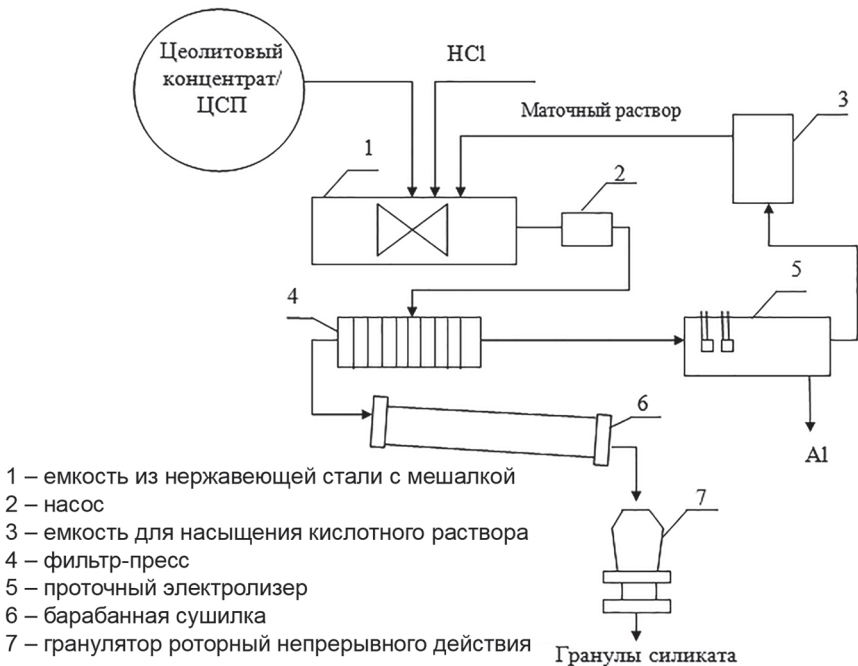


Рис. 5. Схема цепи аппаратов технологии сернокислотного модифицирования природных цеолитов  
 Fig. 5. Scheme of the chain of devices for technology of sulfuric acid modification of natural zeolites

В результате проведения исследований с целью аппаратурной реализации разработанной технологии обогащения и химического модифицирования ЦСП Восточного Забайкалья предложена схема цепи аппаратов (рис. 5), включающая операцию серноокислотного деалюминирования в емкости из нержавеющей стали с мешалкой 1, фильтрацию перекаченных с помощью насоса 2 растворов в фильтр-прессе 4 с последующим извлечением из них оксида алюминия с помощью электролизера 5.

Полученный в результате фильтрации на фильтр-прессе осадок подвергается сушке в барабанной сушилке 6 с дальнейшим получением гранул в роторном грануляторе непрерывного действия 7. При этом донасыщение кислотного раствора производится в соответствующей емкости 3.

Одним из основных достоинств разработанной технологии обогащения и химического модифицирования ЦСП Восточного Забайкалья является отсутствие необходимости их тонкого измельчения с целью раскрытия зерен разделяемых минералов. Вместе с тем при условии введения операции измельчения в технологию переработки ЦСП деалюминирование тонкодисперсных пород осуществляется с несколько более высокой скоростью, что определяется увеличением площади активной поверхности минералов.

Установлено, что эффективность процесса химического модифицирования и достижение параметров заданной степени деалюминирования зависят от крупности пород, расхода серной кислоты и микроструктуры ЦСП. При этом частичное вскрытие минералов, содержащих оксид алюминия, с целью доступа к ним кислотного реагента обеспечивается необходимой степенью измельчения ЦСП. Основным недостатком высокой степени измельчения цеолитовых

пород при подготовке к деалюминированию является образование эффекта агрегации частиц, обуславливающего значительное увеличение их размеров и, соответственно, предотвращающего изменение удельной поверхности.

Проведенные исследования позволили определить основные принципы реализации алгоритма разработки технологий химического модифицирования ЦСП Восточного Забайкалья:

- предотвращение возникновения эффекта агрегации частиц между собой путем предотвращения переизмельчения ЦСП;

- повышение контрастности свойств, наличие диспергирующего эффекта, образование микроскопических трещин, увеличение степени воздействия кислотных растворов и глубины их проникновения в объем минералов достигается применением направленной рудоподготовки (ультразвуковая (акустическая) обработка, воздействие ускоренными электронами, МЭМИ, обжиг).

- предотвращение попадания в раствор деалюминирования оксидов железа, кремния и кальция путем предварительного обогащения пород электромагнитной и электростатической сепарациями и извлечения входящих в состав ЦСП минералов-примесей;

- выбор способа, параметров и режимов модифицирования обуславливается данными исследований минералогического и вещественного состава ЦСП, физических, химических и текстурно-морфологических свойствами цеолитовых и породообразующих минералов, содержанием в них оксида алюминия, близостью свойств разделяемых компонентов, а также степенью химической устойчивости входящих в состав пород минералов;

- технологические и экономические параметры химического модифицирования ЦСП Восточного Забайкалья определяются соотношением  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;



- применение оборудования из кислотостойких материалов (нержавеющая и высоколегированная сталь);
- технологические показатели химического модифицирования также зависят от крупности ЦСП, удельной поверхности минеральных частиц, продолжительности обработки, температуры и концентрации раствора серной кислоты;
- извлечение необходимых компонентов из растворов кислотного модифицирования ЦСП производится путем сушки с дальнейшим фильтрованием и грануляцией;
- разработка технологий обогащения, переработки и модифицирования с учетом НДТ (наилучших доступных технологий), предлагаемых для горнопромышленной отрасли [17 – 20].

### **Заключение**

Таким образом, проведенные исследования позволили установить эффек-

тивность применения гидрохимических воздействий для модифицирования цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья с целью расширения направлений использования природных цеолитов, в том числе в технологиях снижения негативного влияния горнопромышленных отходов на окружающую среду.

При этом наилучшие доступные технологии (НДТ) управления техногенным сырьем путем применения высококачественных природных цеолитов с высокой адсорбционной способностью имеют потенциал для внедрения, в частности, при рекультивации и консервации хвостохранилищ, очистке сточных вод (ИТС НДТ 8-2015), захоронении токсичных и радиоактивных отходов, обращении с отходами производства и потребления (ИТС НДТ 17-2021), очистке отходящих газов (ИТС НДТ 20-2017), а также в процессах горнодобывающей промышленности (ИТС НДТ 16-2017) и т.д.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Milyutin V. V., Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., Nekrasova N. A.* Natural zeolites of eastern transbaikalia in technologies for mining enterprises wastewater treatment // *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020, vol. 76, no. 3, pp. 62 – 70. DOI: 10.5755/j01.ere.m.76.3.24220.
2. *Razmakhnin K. K., Khatkova A. N.* Role of mineralogical and technological evaluation in development of processing technologies for zeolite-containing rocks // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 262, article 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012056.
3. *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.
4. *Хатькова А. Н., Ростовцев В. И., Размахнин К. К.* Влияние воздействия ускоренными электронами на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2013. – № 6. – С. 167 – 174.
5. *Юсупов Т. С., Шумская Л. Г.* Новая концепция производства алюминия и его соединений из нетрадиционного алюмосиликатного сырья // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2009. – № 2. – С. 96 – 100.
6. *Котова О. Б., Шушков Д. А.* Процесс получения цеолитов из золы // *Обогащение руд*. – 2015. – № 5. – С. 60 – 63.
7. *Şükürü U., Musa S., Soner T.* Removal of heavy metals from wastewater solution using a mechanically activated novel zeolitic material // *Journal of Mining Sciences*. 2020, vol. 56, pp. 1010 – 1023. DOI: 10.1134/S1062739120060137.

8. Шушков Д. А., Шуктомова И. И. Сорбция радиоактивных элементов цеолитсодержащими породами // Известия Коми научного центра УрО РАН. — 2013. — № 1. — С. 69–73.

9. 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, pp. 328–333.

10. 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, pp. 363–372. DOI: 10.1134/S1062739120060137.

11. Zou X., Zhao Y., Zhang Z. Preparation of hydroxyapatite nanostructures with different morphologies and adsorption behavior on seven heavy metal ions // Journal of Contaminant Hydrology. 2019. vol. 226, article 103538. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2019.103538.

12. 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, article 100311. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100311.

13. Manchuk J. G., Birks J. S., McClain C. N., Bayegnak G., Gibson J., Deutsch C. 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, pp. 1755–1779. DOI: 10.1007/s11053-020-09801-5.

14. 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. 180–186.

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

16. Wang Y., Yu Y., Li H., Shen C. 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, pp. 79–86. DOI:10.1016/j.jes.2016.04.025.

17. 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.

18. Наилучшие экологические практики в горнодобывающей промышленности / Под ред. П. Кауппила, М. Л. Райсянен, С. Мюллюоя. — Хельсинки: Центр окружающей среды Финляндии, 2013. — 244 с.

19. 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.

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

## REFERENCES

1. Milyutin V. V., Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., Nekrasova N. A. Natural zeolites of eastern transbaikalia in technologies for mining enterprises wastewater treatment. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020, vol. 76, no. 3, pp. 62–70. DOI: 10.5755/j01.irem.76.3.24220.

2. Razmakhnin K. K., Khatkova A. N. Role of mineralogical and technological evaluation in development of processing technologies for zeolite-containing rocks. *IOP Conference*

*Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 262, article 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012056.

3. Razmakhnin K. K. Substantiation and development of technologies for enrichment and modification of zeolite-containing rocks of Eastern Transbaikalia. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2021, no. 3, pp. 148 – 157. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20210314.

4. Khatkova A. N., Rostovtsev V. I., Razmakhnin K. K. Effect of exposure to accelerated electrons on zeolite-containing rocks of Eastern Transbaikalia. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no. 6, pp. 167 – 174. [In Russ].

5. Yusupov T. S., Shumskaya L. G. A new concept for the production of aluminum and its compounds from non-traditional aluminosilicate raw materials. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2009, no. 2, pp. 96 – 100. [In Russ].

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

7. Şükrü U., Musa S., Soner T. Removal of heavy metals from wastewater solution using a mechanically activated novel zeolitic material. *Journal of Mining Sciences*. 2020, vol. 56, pp. 1010 – 1023. DOI: 10.1134/S1062739120060137.

8. Shushkov D. A., Shuktomova I. I. Sorption of radioactive elements by zeolite-containing rocks. *Proceedings of the Komi Science centre Ural branch Russian academy of sciences*. 2013, no. 1, pp. 69 – 73. [In Russ].

9. 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, pp. 328 – 333.

10. 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, pp. 363 – 372. DOI: 10.1134/S1062739120060137.

11. Zou X., Zhao Y., Zhang Z. Preparation of hydroxyapatite nanostructures with different morphologies and adsorption behavior on seven heavy metals ions. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2019, vol. 226, article 103538. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2019.103538.

12. 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, article 100311. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100311.

13. Manchuk J. G., Birks J. S., McClain C. N., Bayegnak G., Gibson J., Deutsch C. 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, pp. 1755 – 1779. DOI: 10.1007/s11053-020-09801-5.

14. Yusupov T. S., Baksheeva I. I., Rostovtsev V. I. Investigation of the influence of various types of mechanical impacts on the selectivity of the destruction of mineral associations. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no. 6, pp. 180 – 186. [In Russ].

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

16. Wang Y., Yu Y., Li H., Shen C. 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, pp. 79 – 86. DOI:10.1016/j.jes.2016.04.025.

17. Zakharyan S. V., Gedgagov E. I., Yun A. B. Improving environmental safety at non-ferrous metallurgy enterprises through the use of sorption processes. *Ecology and Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 26 – 32. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-26-32.

18. *Nailuchshie ekologicheskie praktiki v gornodobyvayushchey promyshlennosti*. Pod red. P. Kauppila, M. L. Ryaysyanen, S. Myullyuoya [Best environmental practices in the mining

industry. Kauppila P., Räisänen M. L., Myllyluoja S. (Eds.)], Khel'sinki: Tsentr okruzhayushchey srede Finlyandii, 2013, 244 p.

19. Zakondyrin A. E. Best available technologies in the mining sector: Current problems and ways to solve. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6-1, pp. 55–64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-55-64.

20. Skobelev D. O. Information and methodological support for environmental and technological modernization of the economy of the Russian Federation. *Management.* 2019, no. 4, pp. 5–15. [In Russ]. DOI: 10.26425/2309-3633-2019-4-5-15.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Размахнин Константин Константинович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: igdranchita@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

*Хатькова Алиса Николаевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе,

e-mail: alisa1965.65@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

*Шумилова Лидия Владимировна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

доцент, профессор, e-mail: shumilovalv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет.

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*K.K. Razmakhnin*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: igdranchita@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

*A.N. Khatkova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Vice-Rector for Scientific and Innovation Work,

e-mail: alisa1965.65@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

*L.V. Shumilova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Professor,

e-mail: shumilovalv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

<sup>1</sup> Transbaikal State University, 672039, Chita, Russia.

**Corresponding author:** K.K. Razmakhnin, e-mail: igdranchita@mail.ru.

Получена редакцией 16.07.2022; получена после рецензии 15.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 16.07.2022; received after the review 15.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

