

На правах рукописи



Размахнин Константин Константинович

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ
ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫМИ ОТХОДАМИ
НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО И КОМПЛЕКСНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД
ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

Специальность 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Чита – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЗабГУ»)

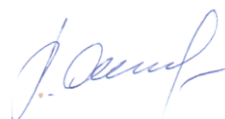
Научный консультант	Хатькова Алиса Николаевна, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», г. Чита
Официальные оппоненты:	Морозов Валерий Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”» (НИТУ «МИСиС»), г. Москва Котова Ольга Борисовна, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией технологии минерального сырья Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), г. Сыктывкар Горлова Ольга Евгеньевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»), г. Иркутск

Защита диссертации состоится «7» сентября 2022 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.299.08 при ФГБОУ ВО «ЗабГУ» по адресу: 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» по адресу 672007, г. Чита, ул. Бабушкина, 129; на сайте ФГБОУ ВО «ЗабГУ» по электронному адресу: <http://zabgu.ru/php/page.php?query=gazmaxnin>

Автореферат разослан «01» июня 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д-р техн. наук, доцент



Г. П. Сидорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интенсивное развитие горной промышленности сопровождается применением технологий, приводящих к образованию значительного количества техногенных отходов, как правило, не подлежащих утилизации и переработке классическими методами. При этом происходит накопление крупных объемов отвальных пород и хвостов обогащения. Большинство отвалов горных пород и хвостохранилищ, являющихся наследием эпохи периода 90-х и 2000-х гг., не имеют хозяйствующего субъекта, и в совокупности с вновь образованными отходами горнопромышленного комплекса, наносят существенный ущерб окружающей среде.

Решение проблемы негативного влияния отходов горноперерабатывающей промышленности на окружающую среду лежит в плоскости использования эффективных инструментов управления техногенным сырьем, к которым относится применение наилучших доступных технологий (НДТ) и материалов, способных снизить содержание токсичных и радиоактивных элементов в отходах, предотвратить или существенно сократить количество выбросов пыли и газа, а также восстановить нарушенные за счет антропогенного воздействия прилегающие территории.

В качестве перспективных материалов, снижающих негативное воздействие на окружающую среду можно рассматривать цеолитсодержащие породы (ЦСП), уникальные сорбционные и ионообменные свойства которых могут быть эффективно использованы в технологиях управления отходами горного производства.

На территории Восточного Забайкалья сосредоточено 73,6 % минерально-сырьевой базы ЦСП России. В этой связи представляется целесообразным создание производственно-цеолитового кластера в данном регионе.

Однако широкое применение ЦСП, при значительных запасах, ограничено низким качеством исходного минерального сырья (содержание цеолитовых минералов варьируется в диапазоне от 35 до 60 %). В соответствии с требованиями ряда отраслей промышленности, содержание цеолита в продукции должно составлять не менее 70–97 %. В этой связи возникает острая необходимость дальнейшего развития научных и методологических основ разработки технологий обогащения и модификации цеолитсодержащих пород для повышения комплексности их использования и рационального применения в мероприятиях по управлению горнопромышленными отходами.

Вопросам развития теоретических основ обогащения, переработки, модификации, применения природных сорбентов в технологиях управления горнопромышленными отходами и другим аспектам этой сложной проблемы посвящены труды многих выдающихся отечественных и зарубежных ученых: М. И. Агошкова, В. А. Чантурия, Т. С. Юсупова, А. Н. Хатьковой, В. П. Мязина, И. Ж. Бунина, В. В. Милютина, В. А. Никашиной, В. И. Смола, Н. Д. Шукакаидзе, В. Г. Литвиненко, Н. Ф. Челищева, Н. В. Кельцева, Т. З. Лыгиной, О. Б. Котовой, Д. А. Шушкова, R. M. Barrer, Carmine Colella, Şükrü Uçkun и др.

При наличии некоторой сложившейся практики переработки, обезвреживания и утилизации техногенного сырья с применением природных цеолитов отсутствует единая концепция управления горнопромышленными отходами, основанная на изучении вещественного состава ЦСП, физических и физико-химических свойств, применении наилучших доступных технологий рудоподготовки и обогащения для получения высококачественных цеолитовых продуктов и решения проблемы негативного воздействия техногенного минерального сырья на компоненты окружающей среды. Поэтому проведение исследований в данном направлении представляется весьма актуальным и имеет важное научное и практическое значение.

Цель работы: развитие научно-методологических основ рационального и комплексного использования цеолитсодержащих пород на основе наилучших доступных технологий их обогащения, переработки, модификации и применения для обезвреживания, рекультивации и захоронения горнопромышленных отходов.

Задачи исследований:

- анализ современного состояния уровня развития теоретических основ и практических перспектив применения цеолитсодержащих пород при обезвреживании, рекультивации и захоронении горнопромышленных отходов;

- разработка Концепции управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья;

- комплексное изучение вещественного состава и технологических свойств цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья;

- выбор методов направленного воздействия на цеолитсодержащие породы и разработка технологических схем их глубокого обогащения и модификации;

- выявление закономерностей изменения фазового состава, физико-механических и физико-химических свойств цеолитсодержащих пород при использовании методов направленного воздействия и модификации;

- разработка и обоснование параметров технологий обезвреживания, рекультивации и захоронения техногенных отходов с применением природных цеолитов;

- эколого-экономическая оценка эффективности разработанных технологий обогащения цеолитсодержащих пород и управления отходами горноперерабатывающей промышленности.

В качестве **объектов исследований** использованы монтмориллонит-клиноптилолитсодержащие породы Шивыртуйского, клиноптилолитсодержащие породы Холинского, шабазитсодержащие породы Талан-Гозагорского и морденит-клиноптилолитсодержащие породы Бадинского месторождений, лежалые хвосты обогатительной фабрики по переработке оловянно-полиметаллических руд, сточные воды и отходящие газы горнопромышленных предприятий.

Предмет исследования – рациональное и комплексное использование цеолитсодержащих пород в технологиях управления горнопромышленными отходами.

Идея работы базируется на комплексном учете взаимосвязи вещественного состава, физико-химических свойств цеолитсодержащих пород и методов управления их качеством для направленного использования в различных отраслях промышленности.

Методология и методы исследования. Информационный анализ, патентный поиск, оценка существующих научных разработок в области обогащения и модификации цеолитсодержащих пород, их применения в технологиях управления горнопромышленными отходами, определение физико-механических и физико-химических свойств цеолитсодержащих пород, методы проведения теоретических и экспериментальных исследований с использованием термодинамического анализа, ИК-спектроскопии, рентгенографии, ЯМР- и EXAFS-спектроскопии, рентгеновской и мессбауэровской спектроскопии, электронной микроскопии, метода визуализации и рендеринга виртуальных трехмерных молекулярных моделей цеолитов, методов планирования эксперимента, экспериментальных лабораторных методов исследования эффективности энергетических воздействий, физико-химических, физических и химических методов обогащения, рудоподготовки и модификации, определения концентрации пыли, скорости отрастания травяного покрова в грунте поверхности хвостохранилища, нефтеемкости и влагоемкости сорбентов, адсорбционной емкости цеолитов, методов контроля минерального, химического и фракционного состава цеолитсодержащих пород, продуктов обогащения, переработки и модификации, количественного определения цеолитов и вмещающих примесей, полупромышленных испытаний технологии обогащения цеолитсодержащих пород, статистических методов анализа и обработки экспериментальных данных, методов математического моделирования процессов обогащения, переработки и модификации цеолитсодержащих пород, эколого-экономический анализ.

Научная новизна работы:

1. Разработана Концепция управления отходами горного производства на основе рационального и комплексного применения цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья и составлена классификация инструментов ее реализации, базирующаяся на внедрении наилучших доступных технологий обогащения, переработки, обезвреживания, захоронения и рекультивации техногенного сырья.

2. Выявлены процессы существенного изменения физико-химических свойств входящих в состав цеолитсодержащих пород минералов посредством энергетического, термического и химического воздействия, приводящие к разупрочнению и дезинтеграции пород, усилению магнитных свойств входящих в их состав железосодержащих примесей и адсорбционных свойств цеолитов.

3. Научно обоснован принцип разработки технологий обогащения цеолитсодержащих пород, базирующийся на принципе рационального сочетания технологических операций направленных воздействий (акустических, энергетических, химических, термических) с традиционными методами обогащения, позволяющий получать высококачественную минеральную продукцию с содержанием цеолитов до 99 %, при необходимости модифицированную под определенное направление использования в различных отраслях промышленности.

4. На основе научно-методологического подхода к обоснованию технологии направленного изменения адсорбционных свойств природных цеолитов создана модель и разработан алгоритм выбора технологии химической модификации цеолитсодержащих пород, основанной на выявлении химической устойчивости и степени разложения входящих в состав пород минералов, а также на определении содержания оксида алюминия в исходном сырье и в продуктах модификации.

5. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ, обезвреживания сточных и оборотных вод горнопромышленных предприятий от радионуклидов и нефтепродуктов за счет применения цеолитсодержащих пород, обеспечивающая существенное снижение негативного воздействия на окружающую среду и сохранение минерально-сырьевой базы.

Теоретическая значимость. В соответствии с разработанной Концепцией управления отходами горного производства на основе рационального и комплексного использования цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья доказаны зависимости между вещественным составом и технологическими параметрами обогащения, переработки и модификации цеолитсодержащих пород, изучены альтернативные технологии их рационального и комплексного использования в различных отраслях промышленности.

Практическая значимость:

– разработана технология обогащения цеолитсодержащих пород с применением направленных методов воздействия (ультразвуковая обработка, ускоренные электроны, мощные электромагнитные импульсы, обжиг);

– разработана комбинированная технология химической модификации цеолитсодержащих пород, основанная на их обогащении и деалюминировании;

– на основе рационального и комплексного использования цеолитсодержащих пород разработаны технологии рекультивации (консервации) хвостохранилищ, захоронения токсичных и радиоактивных отходов, очистки отходящих дымовых газов, обезвреживания сточных и оборотных вод горнопромышленных предприятий от радионуклидов и нефтепродуктов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция управления горнопромышленными отходами на основе использования цеолитсодержащих пород базируется на применении наилучших доступных технологий их рудоподготовки, обогащения и химической

модификации, соответствующих критериям рациональности, комплексности и энергоэффективности, и обеспечивает получение высококачественной цеолитовой продукции для использования в различных отраслях промышленности и снижения негативного воздействия техногенного сырья на окружающую среду.

2. Сложный минеральный состав, тонкое взаимопрораствание цеолитов и породообразующих минералов с вмещающими примесями, нестабильность электромагнитных и электрических свойств минералов, входящих в состав цеолитсодержащих пород, определяют их трудную обогатимость и необходимость разработки эффективных технологий рудоподготовки, основанных на применении акустических, энергетических и термических воздействий с целью направленного повышения контрастности и активации физико-химических процессов на их поверхности и в объеме.

3. Управление качеством цеолитсодержащих пород и получение цеолитовой продукции с высокой адсорбционной способностью достигается сочетанием традиционных методов обогащения с гидрохимической модификацией, обеспечивающим эффективное удаление вмещающих примесей, сопровождающееся увеличением диаметра входных окон цеолитов до 0,6–0,75 нм.

4. Эффективность применения технологий обезвреживания, очистки, рекультивации и захоронения горнопромышленных отходов определяется рациональным и комплексным использованием цеолитсодержащих пород, базирующимся на их адсорбционных свойствах с учетом достигаемых эколого-экономических показателей.

Достоверность научных рекомендаций, положений и выводов обоснована корректностью поставленных задач, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, достаточным и представительным количеством проб и натурных исследований, соответствием математических и физических моделей реальным процессам, происходящим при обогащении и химической модификации цеолитсодержащих пород, использованием апробированных методик определения режимных параметров обогащения и переработки с применением методов математической статистики.

Реализация результатов работы. Результаты исследований использованы в проектно-конструкторской деятельности и технико-экономическом расчете (обосновании) ООО «Диатомовый комбинат» (акт внедрения от 13.11.2012 г.), при разработке учебных материалов в процессе реализации проекта Tempus 543962-1-2013-1-DE-Tempus-JPHES (Комплексное устойчивое управление отходами. Металлургическая промышленность: учеб. пособие. М.: ИД Академии Естествознания, 2016. 494 с.), при реализации проекта РФФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 годы), внедрены в научно-исследовательскую деятельность ЦНИЛ ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (акт внедрения от 05.02.2013 г.), Института экологических технологий Вьетнамской

академии наук (акт внедрения от 11.03.2013 г.), в технико-экономическое обоснование деятельности НПВО «Цеолит» (акт внедрения от 06.09.2004 г.), в проектную и научно-исследовательскую деятельность ООО «Горный проектно-изыскательский научно-исследовательский институт», ООО «Майнинг Про» (акт внедрения от 25.02.2021 г.), в проектную деятельность ООО «Забайкалзолотопроект» (акт внедрения от 03.02.2022 г.).

Новые технологические решения защищены 6 патентами РФ на изобретения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях «Плаксинские чтения – 2002, 2010, 2011, 2013, 2016, 2021», на Кулагинских чтениях (Чита, 2007, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2017, 2021), на VI Всероссийской цеолитной конференции с международным участием (МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011), на международной научно-практической конференции «Технические науки – основа современной инновационной системы» (Йошкар-Ола, 2012), на IV Международной научной конференции «Сорбенты как фактор качества жизни и здоровья» (Белгород, 2012), на научных семинарах Института экологических технологий Вьетнамской академии науки и технологии (Ханой, 2013), на Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии в науке о Земле и горном деле» (Нальчик, 2012), на Международном совещании «Конгресс обогатителей» (Москва, 2013), на семинаре «Состояние и проблемы сферы обращения с производственными отходами в основных секторах промышленности в Сибирском регионе и Приморском крае» (Чита, 2014), на международной научно-практической конференции «Промышленные минералы: проблемы прогноза, поисков, оценки и инновационные технологии освоения месторождений» (Казань, 2015), на V Российской конференции «Актуальные проблемы нефтехимии» (Звенигород, 2016), на круглом столе «Партнерство государства, бизнеса и науки как решающий фактор кадровой модернизации российской экономики в сфере комплексного устойчивого управления отходами» (Москва, Государственная Дума, 2016), на Международном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» Недропользование (Новосибирск, 2019), на Всероссийской научной конференции с международным участием «Проблемы развития горных наук и научно-технические решения освоения месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 2020), Международном симпозиуме «Неделя горняка» (МИСиС, 2022).

Работа основана на результатах научно-исследовательских работ, выполненных автором в Забайкальском государственном университете в рамках реализации Стратегии социально-экономического развития Забайкальского края на период до 2030 г., утвержденной постановлением Правительства Забайкальского края № 586 от 26.12.2013 г., целевой программы «Цеолиты Забайкалья на 2013–2025 гг.», государственного задания Минобрнауки РФ № 1.1.12 (Разработка ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий переработки цеолитсодержащего сырья с целью расширения областей его практического применения), проекта Tempus (543962-

1-2013-1-DE-Tempus-JPHES), проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 годы).

Публикации по работе. По тематике диссертационной работы опубликовано 93 научные работы, из них: 2 монографии, 16 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК России, 11 – в изданиях, входящих в базы цитирования WoS и Scopus, 58 – в прочих изданиях, 6 патентов РФ на изобретения.

Личный вклад автора состоит в выдвижении научной идеи, формулировке проблемы, цели и задач, в разработке новых методик, сравнительной оценке и обобщении результатов теоретических и экспериментальных исследований, математической обработке данных, обосновании принципов разработки технологий переработки, обогащения и модификации цеолитсодержащих пород с последующим их использованием в мероприятиях по управлению горнопромышленными отходами, проведении технико-экономических и эколого-экономических расчетов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, словаря терминов, списка литературы из 343 наименований и 8 приложений, включает 105 рисунков и 48 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность и признательность научному консультанту д-ру техн. наук, профессору, проректору по научной и инновационной работе ЗабГУ А. Н. Хатьковой, зав. отделом Горной экологии ИПКОН РАН, д-ру техн. наук, профессору И. В. Шадруновой, вед. науч. сотруднику отдела Проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья, д-ру техн. наук И. Ж. Бунину, зав. минералогическим отделом ВИМС, д-ру геол.-минерал. наук Е. Г. Ожогойной, зав. лабораторией технологии минерального сырья Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, д-ру геол.-минерал. наук О. Б. Котовой, профессору ЗабГУ, д-ру техн. наук Л. В. Шумиловой, профессору ДВФУ, д-ру техн. наук Я. Ю. Блиновской, профессору кафедры ОПИ и ВС ЗабГУ, д-ру техн. наук, профессору В. П. Мязину, сотрудникам кафедры ОПИ и ВС ЗабГУ, профессору кафедры ОПИ и ООС им. С. Б. Леонова ИРНИТУ, д-ру техн. наук, профессору Е. В. Зелинской, зав. лабораторией хроматографии радиоактивных элементов ИФХЭ РАН, д-ру хим. наук В. В. Милютину, профессору кафедры сопротивления материалов и механики ЗабГУ, д-ру техн. наук В. Г. Черкасову, вед. науч. сотруднику лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии ИГД СО РАН, д-ру техн. наук В. И. Ростовцеву, руководству и сотрудникам ОАО «Диатомовый комбинат», директору института экологических технологий Вьетнамской Академии науки и технологии г-ну Нгуен Хоай Тьяу, д-ру техн. наук, профессору Т. В. Башлыковой, а также руководству компании «АТС-Иран» за научное консультирование и всестороннюю помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта проблематика и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, основные защищаемые научные положения, научная новизна, практическая значимость и реализация результатов исследований.

В первой главе дана оценка опыта применения концепций управления отходами горной промышленности и сделан обзор современной нормативно-правовой базы в данной области, выполнен анализ существующих технологий обогащения, модификации и комплексной переработки цеолитсодержащих пород, проведено обоснование выбора объектов исследования.

Во второй главе разработана Концепция управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования ЦСП; разработана классификация инструментов управления отходами горного производства, базирующаяся на применении природных цеолитов; определены цели внедрения наилучших доступных технологий с использованием ЦСП на предприятиях горной промышленности; проведена комплексная оценка вещественного состава и технологических свойств ЦСП Восточного Забайкалья.

В третьей главе разработаны альтернативные варианты рудоподготовки ЦСП; изучено влияние рациональных видов направленных воздействий (ультразвуковых (акустических), мощных наносекундных электромагнитных импульсных, ускоренных электронов и термических) на изменение физико-химических и технологических свойств цеолитсодержащих пород.

В четвертой главе представлено научное обоснование и разработка альтернативных вариантов технологий переработки ЦСП Восточного Забайкалья на основе направленных воздействий; определены научно-методические подходы и принципы обоснования и разработки технологических схем обогащения, переработки и химической модификации ЦСП.

В пятой главе разработаны технологии управления горнопромышленными отходами посредством их обезвреживания, рекультивации и захоронения с использованием ЦСП; рассмотрены вопросы регенерации ЦСП; представлены результаты реализации Концепции управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования на примере ЦСП Восточного Забайкалья.

В шестой главе проведена экономическая оценка внедрения инновационных методов рудоподготовки, обогащения и модификации ЦСП в производственных условиях; определен эколого-экономический эффект от внедрения технологий рационального и комплексного использования ЦСП.

На основании выполненных исследований обоснованы следующие научные положения, выносимые на защиту:

Первое защищаемое научное положение. Концепция управления горнопромышленными отходами на основе использования цеолитсодержащих пород базируется на применении наилучших доступных технологий их рудоподготовки, обогащения и химической модификации, соответствующих критериям рациональности, комплексности и энергоэффективности, и обеспечивает получение высококачественной цеолитовой продукции для использования в различных отраслях промышленности и снижения негативного воздействия техногенного сырья на окружающую среду.

Проблема ликвидации отходов техногенного происхождения является одной из ключевых на пути устойчивого развития России. В этой связи одним из направлений создания экологически безопасных условий для населения РФ является разработка и последующая реализация Концепции управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования минерального сырья (далее – Концепция), которая позволит существенно сократить объемы техногенного сырья, в том числе накопленного в результате предыдущей хозяйственной деятельности.

В основу разработанной автором Концепции управления горнопромышленными отходами, имеющими различный состав и качественно-количественные характеристики, заложены принципы рационального и комплексного использования минерального сырья на основе наилучших доступных технологий.

На рисунке 1 представлена Блок-схема Концепции управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования минерального сырья (на примере ЦСП Восточного Забайкалья). **Блок 1** – аналитический научно-исследовательский блок НДТ, который предусматривает изучение базы данных вертикальных и горизонтальных информационно-технических справочников (ИТС НДТ), сформированных на основе передового опыта горнопромышленных предприятий и инновационных разработок научно-исследовательских институтов России по неметаллическому минеральному сырью (**Блок 1.1**).

Следует отметить, что до настоящего времени в РФ и за рубежом отсутствуют ИТС НДТ по ЦСП. Однако информация из базы данных ИТС НДТ позволяет разработать альтернативные варианты технологий (НДТ) с проведением лабораторных и укрупненных лабораторных исследований, опытно-промышленных испытаний (Блоки: **Б1.2, Б1.3, Б1.4**).

Выбор НДТ в значительной степени зависит от реализации экономико-аналитического блока Концепции (**Блок 2**), включающего определение области применения технологий с использованием количественного метода анализа и обработки информации на основе информационно-энтропийного подхода, обобщения и анализа данных по воздействиям отходов и эмиссий предприятия,

оценки экономической целесообразности внедрения разработанной технологии и выбора оптимального решения методом математического программирования.

Одним из наиболее важных блоков Концепции является **Блок 3** – разработка проекта внедрения НДТ на горном предприятии, включающий: технико-эколого-экономическое обоснование; разработку технического проекта; составление плана-графика внедрения НДТ и сметы проекта; расчет нормативов допустимого комплексного воздействия технологии на окружающую среду по методическим рекомендациям; проверку соответствия нормативам допустимого комплексного воздействия на окружающую среду, влияющих на выдачу комплексного экологического разрешения (**Блок 4**).

На рисунке 2 представлена Стратегия повышения эффективности и конкурентоспособности горных предприятий на основе НДТ, включающая критерии выбора НДТ и резервы энергоэффективности, базирующиеся на принципах комплексной оценки воздействия на окружающую среду с учетом методологии оценки экономической целесообразности.

Основными **критериями выбора НДТ** являются: рациональное потребление ресурсов; высокая энергоэффективность, применение малоотходных процессов; интеграция с компаниями горного кластера; характер и масштаб воздействия на окружающую среду и возможность снижения эмиссий; использование веществ, в наименьшей степени опасных для человека и окружающей среды; возможность регенерации и повторного использования полученных минеральных продуктов; снижение риска аварий.

В качестве **резервов энергоэффективности** предложены: оптимальные режимы работы; энерготехнологичное комбинирование; использование скрытых потоков энергии и интеграция компаний горного кластера по территориальному принципу для внедрения систем технического интегрирования на основе НДТ; синергетические эффекты интеграции; эффекты масштабов и топологии.

К основным **принципам комплексной оценки воздействия на окружающую среду** относятся: определение области применения и идентификации альтернативных технологий; инвентаризация выбросов/сбросов, отходов, потребления сырья, материалов и энергии; оценка воздействия на компоненты окружающей среды; интерпретация взаимовлияния и противоречий при ОВОС; определение области применения и идентификации альтернативных технологий; сбор и проверка правильности (валидации) обоснования данных о затратах на внедрение наилучших доступных технологий; определение структуры затрат; обработка и предоставление информации о затратах; определение затрат, относящихся к охране окружающей среды. Данные принципы определяют последующий анализ экономической эффективности затрат и их разделение между загрязняющими веществами.

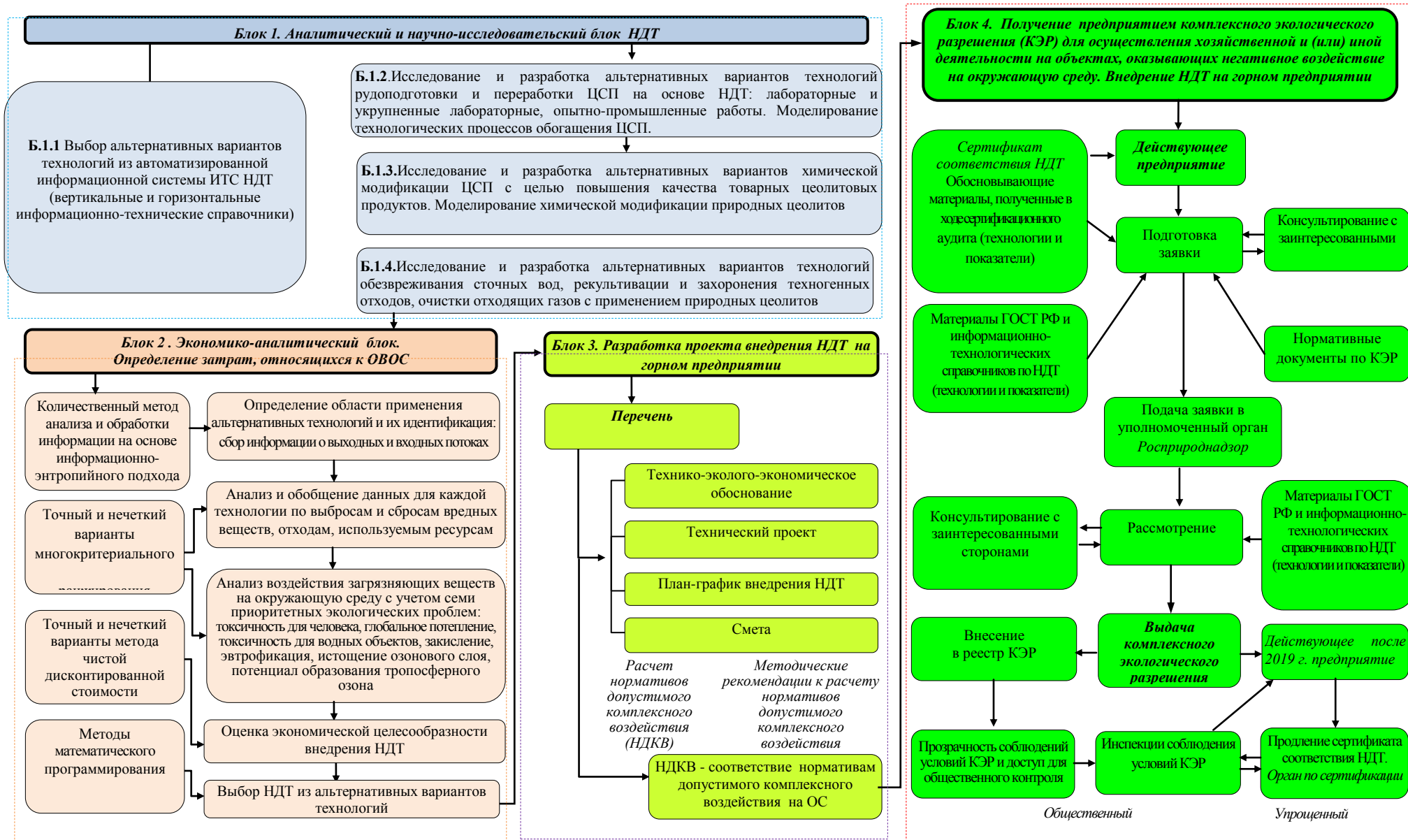


Рисунок 1 – Блок-схема Концепции управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования минерального сырья (на примере ЦСП Восточного Забайкалья)

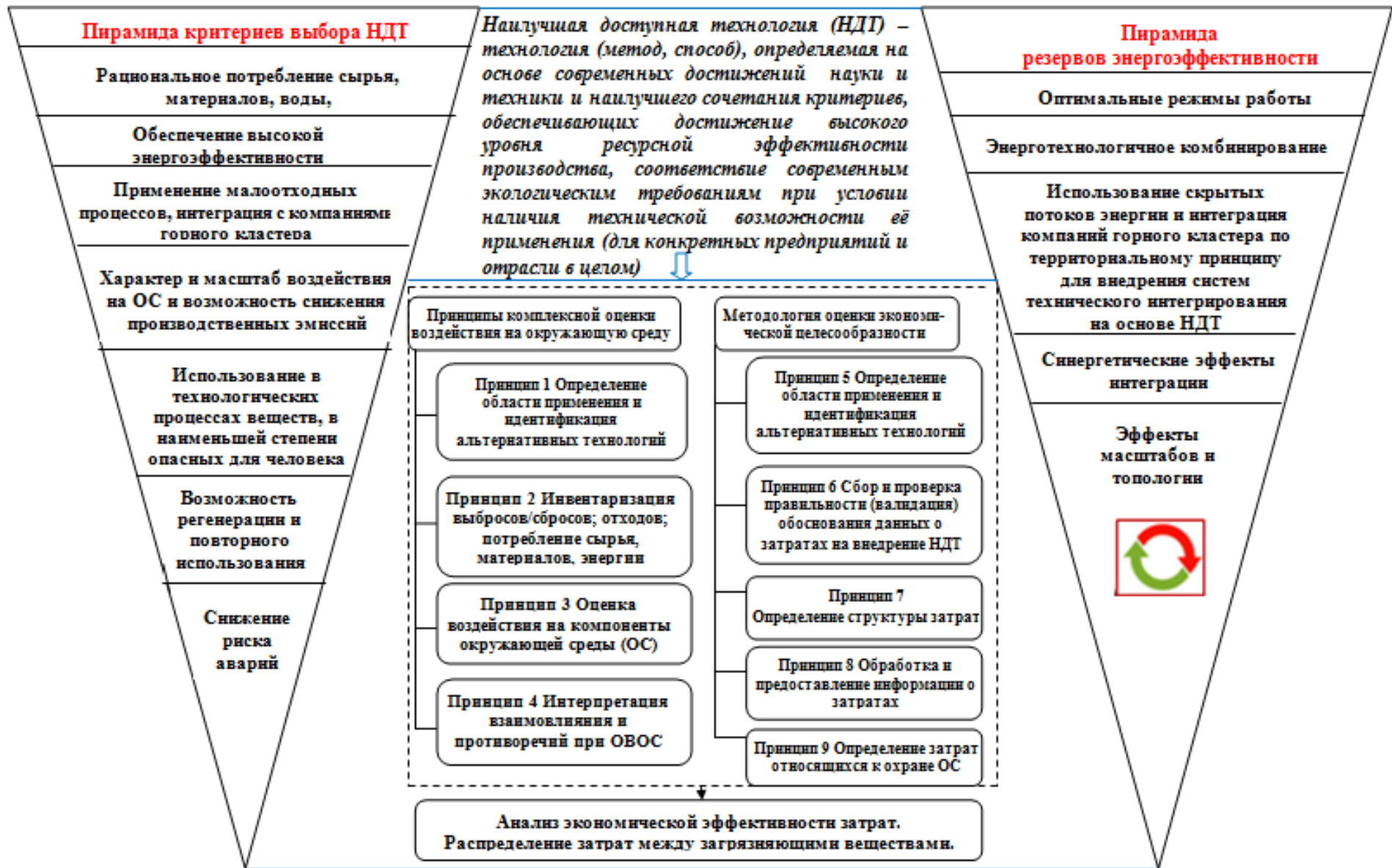


Рисунок 2 – Стратегия повышения эффективности и конкурентоспособности горных предприятий на основе НДТ

Стратегия рационального и комплексного использования минерального сырья на основе НДТ на примере ЦСП Восточного Забайкалья (рисунок 3), разработанная автором, ориентирована на повышение эффективности и конкурентоспособности горных предприятий; управление горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования ЦСП с применением соответствующих инструментов управления (рисунок 4).

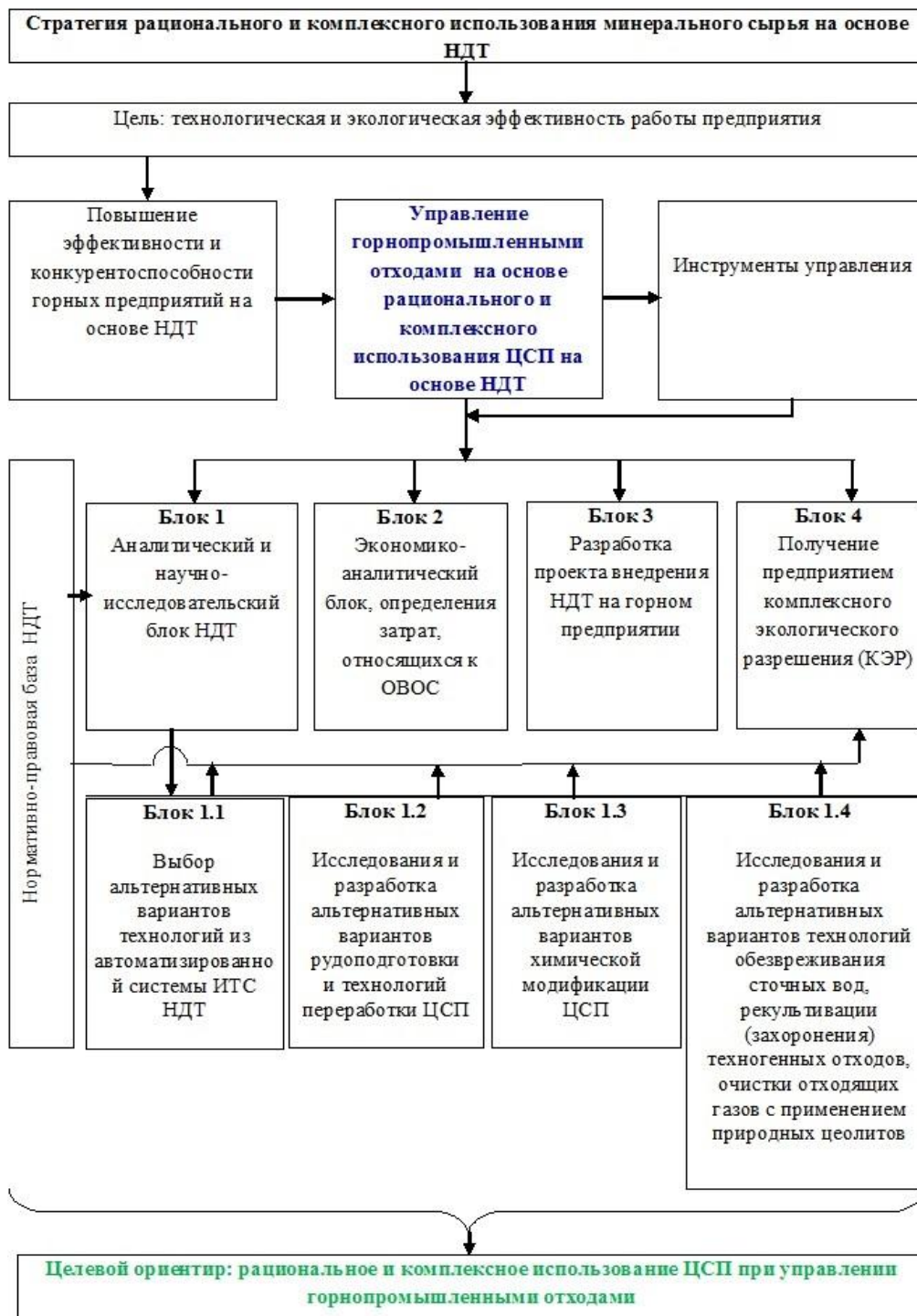


Рисунок 3 – Стратегия рационального и комплексного использования минерального сырья на основе НДТ (на примере ЦСП Восточного Забайкалья)

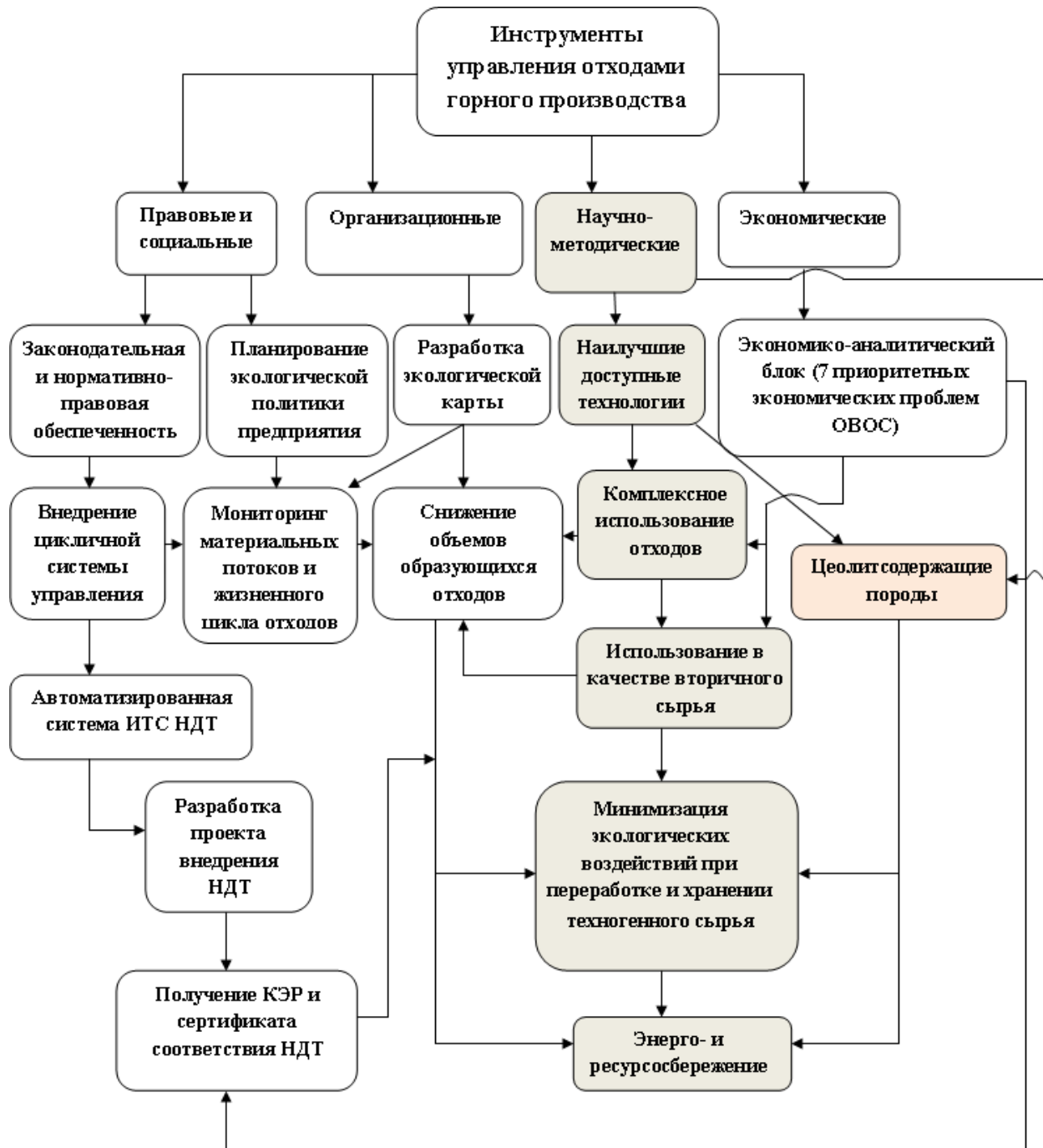


Рисунок 4 – Классификация инструментов управления отходами горного производства

Таким образом, разработанная Концепция управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования ЦСП базируется на применении наилучших доступных технологий рудоподготовки, обогащения и химической модификации с целью получения высококачественной цеолитовой продукции для использования в процессах обезвреживания сточных и оборотных вод, очистки отходящих газов, рекультивации и захоронения техногенного сырья, а также снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Второе защищаемое научное положение. Сложный минеральный состав, тонкое взаимопроращение цеолитов и породообразующих минералов с вмещающими примесями, нестабильность электромагнитных и электрических свойств минералов, входящих в состав цеолитсодержащих пород, определяют их трудную обогатимость и необходимость разработки эффективных технологий рудоподготовки, основанных на применении акустических, энергетических и термических воздействий с целью направленного повышения контрастности и активации физико-химических процессов на их поверхности и в объеме.

Минеральный состав и технологические свойства ЦСП Восточного Забайкалья представлены в таблице 1. Установлено, что большинство входящих в состав ЦСП минералов характеризуются существенными колебаниями значений ряда показателей, определяющих выбор технологии рудоподготовки и обогащения: микротвердость 50–1290 кГс/мм² (кварц – 1023–1236 кГс/мм²; кальцит – 103–202 кГс/мм²; цеолитовые минералы – 8–96 кГс/мм²; оливин – 897–1290 кГс/мм²; гематит – 920–1062 кГс/мм²); удельная магнитная восприимчивость в диапазоне значений от $1 \cdot 10^{-8}$ до $600 \cdot 10^{-8}$ м³/кг (оливин – $1 \cdot 10^{-8}$ – $180 \cdot 10^{-8}$ м³/кг; гематит – $14 \cdot 10^{-8}$ – $600 \cdot 10^{-8}$ м³/кг; гидрогетит – $30 \cdot 10^{-8}$ – $45 \cdot 10^{-8}$ м³/кг; монтмориллонит – $1 \cdot 15^{-8}$ – $60 \cdot 10^{-8}$); электропроводность, м⁻¹·см⁻¹ (кварц – 10^{-13} – 10^{-16} м⁻¹·см⁻¹; микроклин – 10^{-10} – 10^{-14} м⁻¹·см⁻¹; кальцит – 10^{-10} – 10^{-14} м⁻¹·см⁻¹; оливин – $2 \cdot 10^{-12}$ м⁻¹·см⁻¹; монтмориллонит – 10^{-5} – 10^{-6} м⁻¹·см⁻¹; цеолитовые минералы – 10^{-5} – 10^{-6} м⁻¹·см⁻¹).

Таблица 1 – Минеральный состав и технологические свойства ЦСП Восточного Забайкалья

Минерал	Содержание, %	Микро-твердость, кГс/мм ²	Плотность, кг/м ³	Удельная магнитная восприимчивость, $n \cdot 10^{-8}$ м ³ /кг	Электро-проводность, м ⁻¹ ·см ⁻¹
Монтмориллонит	3–78	50–76	2000–2100	15–60	10^{-5} – 10^{-6}
Кальцит	2–5	103–202	2710–2750	5–16	10^{-10} – 10^{-14}
Плагиоклазы	–	735–922	2740–2760	5–10	10^{-8} – 10^{-14}
Микроклин	3–5	764–894	2540–2570	5–10	10^{-10} – 10^{-14}
Кварц	1–10	1023–1236	2650–2660	15–25	10^{-13} – 10^{-16}
Пироксен	до 21	–	3200–3380	70–80	–
Оливин	до 10,1	897–1290	3210–4140	1–180	$2 \cdot 10^{-12}$
Гематит	3,8–59,3	920–1062	4900–5300	14–600	10^{-3} – 10^{-4}
Гидрогетит	5,62–21,2	300–590	3600–4000	30–45	–
Клиноптилолит	12–96	143–174	2180–2220	4–10	$8 \cdot 10^{-6}$
Морденит	8–87	277–307	2150–2180	2–12	6 – $7 \cdot 10^{-6}$
Шабазит	8–36	174–208	2040–2170	10–89	$5 \cdot 10^{-6}$

Выявленный сложный полиминеральный состав ЦСП, близкие разделительные свойства, взаимопроращение цеолитовых и породообразующих минералов, определяют трудную обогатимость и необходимость комплексного подхода к разработке эффективных комбинированных

технологий рудоподготовки и обогащения с использованием рациональных видов направленных воздействий.

Для оценки сорбционной активности ЦСП Восточного Забайкалья методом визуализации и рендеринга получены виртуальные трехмерные молекулярные модели цеолитового минерала клиноптилолита (на примере ЦСП Холинского месторождения) в проекциях X, Y и Z (рисунок 5). С использованием данных моделей определены: удельная поверхность 1096,31 м²/г (1916,34 м²/см³); параметры ячейки: a – 17,5230 Å, b – 17,6440 Å, c – 7,4010 Å; объем – 2054,8 Å³; максимальный диаметр сферической молекулы для адсорбции в порах – 5,97 Å.

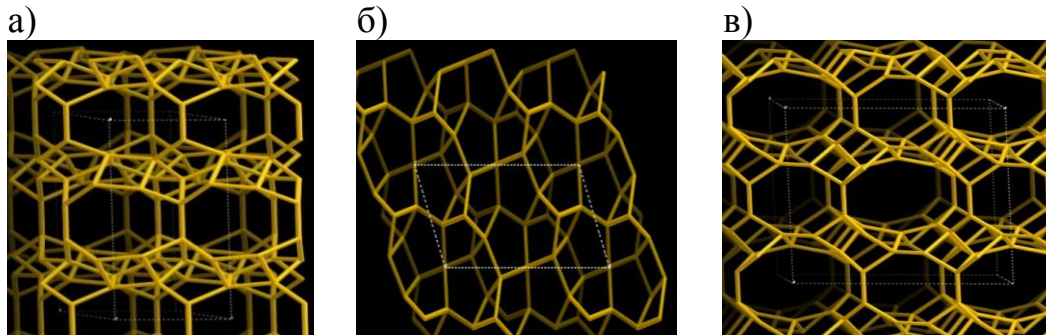


Рисунок 5 – Модель минерала клиноптилолита, фронтальная проекция: а) проекция X; б) проекция Y; в) проекция Z

Установлено, что наиболее перспективными методами направленного повышения контрастности разделительных свойств цеолитовых и породообразующих минералов являются следующие виды направленных воздействий: акустические (ультразвуковые), мощные электромагнитные импульсные (МЭМИ), ускоренные электроны и термические.

Экспериментально доказано, что предварительная акустическая (ультразвуковая) обработка ЦСП при частоте 40 кГц и времени воздействия в течение 7 минут (рисунки 6–8) интенсифицирует процесс отделения цеолита от минералов примесей за счет звукокапиллярного и диспергирующего эффектов, создаваемых кавитацией.

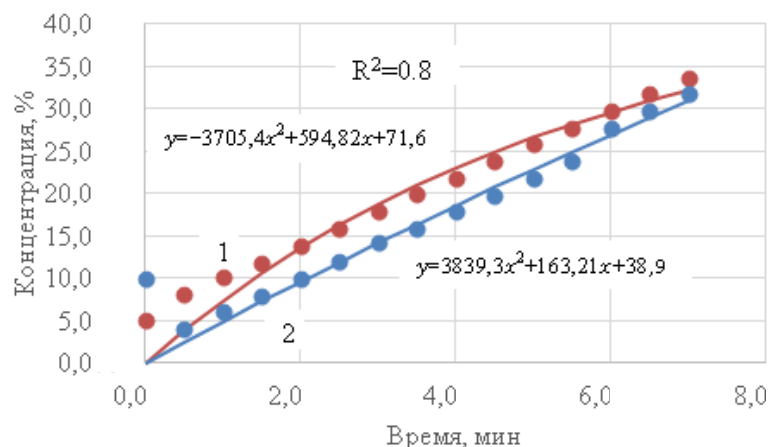


Рисунок 6 – Зависимость концентрации вмещающих примесей от времени акустического воздействия на ЦСП месторождений: 1 – Шивыртуйского; 2 – Талан-Гозагорского

Выявлено, что акустическая обработка ЦСП повышает эффективность извлечения железосодержащих примесей электромагнитной сепарацией за счет увеличения показателя магнитной восприимчивости гематита до $215\text{--}220 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ вследствие удаления пленок железосодержащих оксидов и тонкодисперсного монтмориллонита с его поверхности. Показатель извлечения железосодержащих примесей составляет 97,9 % и 99,4 % для ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений соответственно. Наибольший эффект достигается при напряженности магнитного поля сепаратора 1450 кА/м и крупности ЦСП $-0,3+0,1$ мм. Электромагнитная сепарация ЦСП в изодинамическом поле максимально эффективна при крупности пород 0,1 мм.

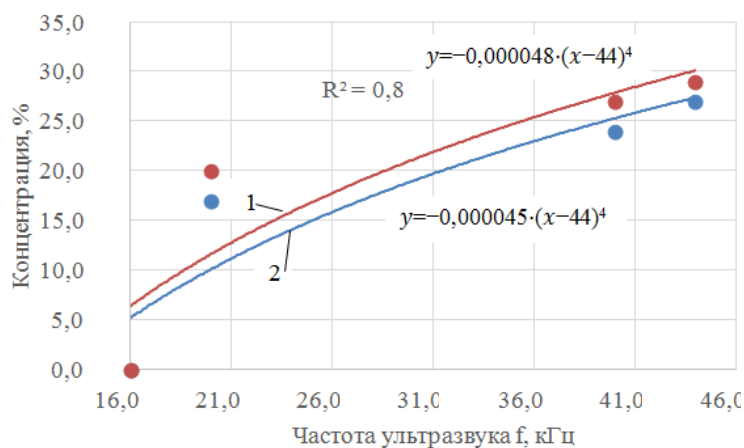


Рисунок 7 – Зависимость концентрации вмещающих примесей от частоты ультразвука (на примере ЦСП месторождений):
1 – Шивыртуйского; 2 – Талан-Гозагорского

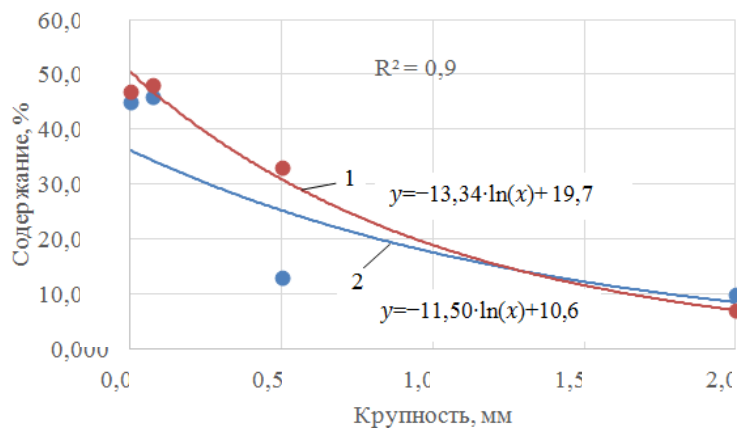


Рисунок 8 – Зависимость содержания мономинералов шабазита (1 – ЦСП Талан-Гозагорского месторождения) и клиноптилолита (2 – ЦСП Шивыртуйского месторождения) в концентрате от крупности пород после акустической обработки при частоте 40 кГц

Дальнейшее сочетание процессов рудоподготовки с электромагнитной сепарацией позволяет получить цеолитовый концентрат с содержанием основного минерала от 85 до 98 % (рисунок 9).

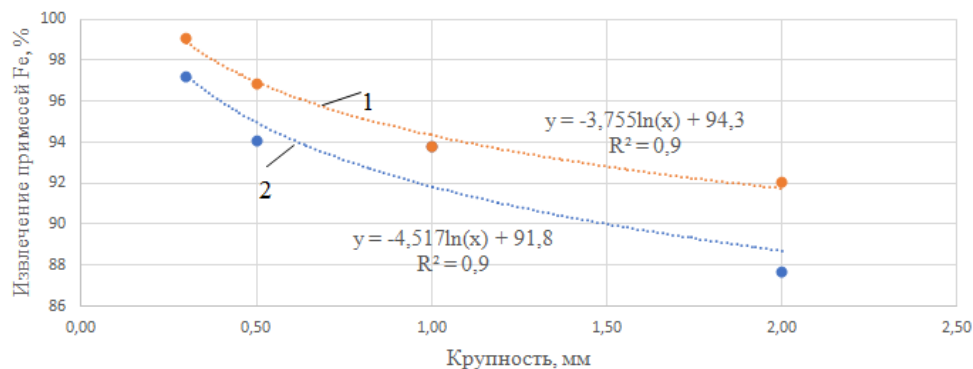


Рисунок 9 – Зависимость извлечения примесей Fe магнитной сепарацией от крупности ЦСП (после ультразвуковой обработки) месторождений: 1 – Талан-Гозагорского; 2 – ЦСП Шивыртуйского

На рисунке 10 представлены мессбауэровские спектры ЦСП месторождений Восточного Забайкалья исходного и после обработки МЭМИ.

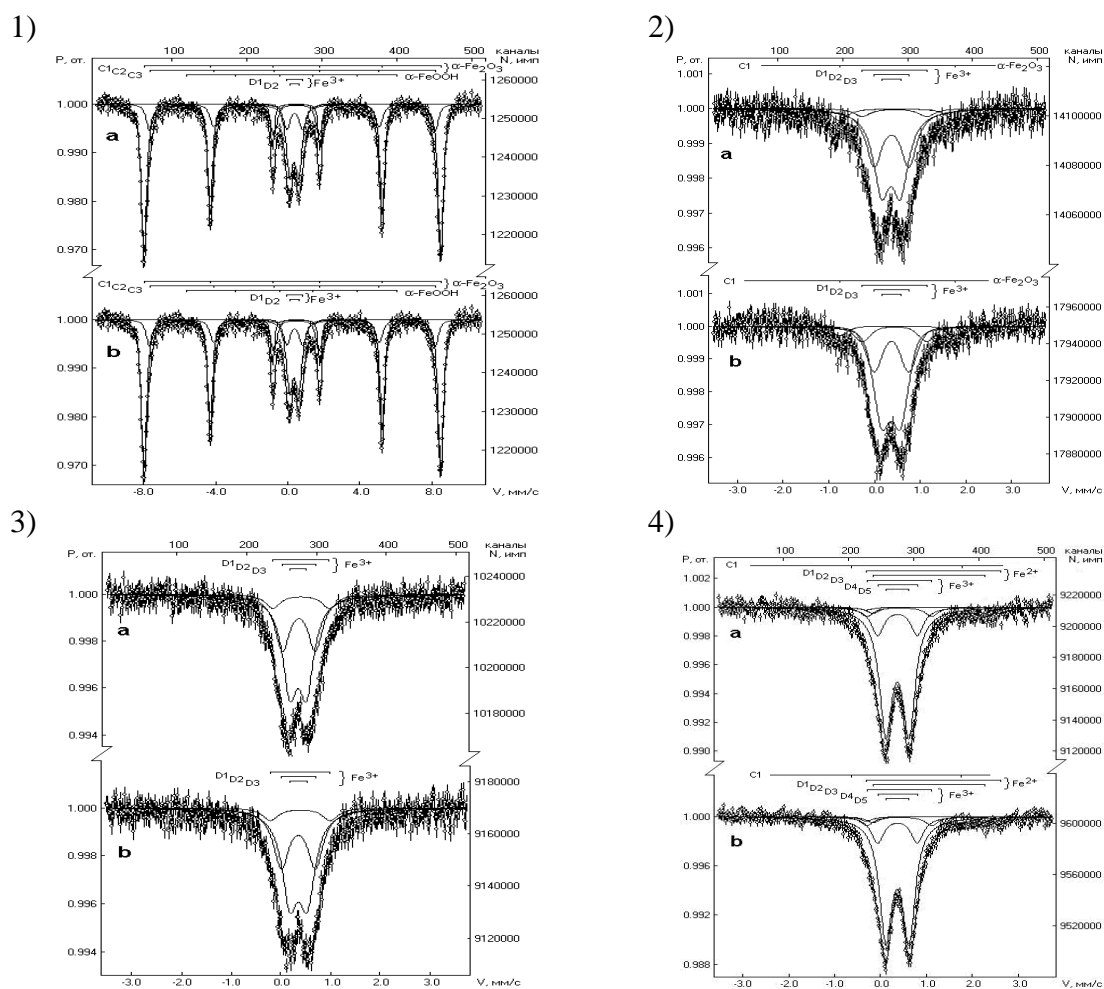


Рисунок 10 – Мессбауэровские спектры ЦСП (а – исходного; б – после обработки МЭМИ) месторождений: 1 – Талан-Гозагорского; 2 – Бадинского; 3 – Холинского; 4 – Шивыртуйского

Анализ результатов мессбауэровской спектроскопии показал, что воздействием МЭМИ достигнуто увеличение содержания крупнокристаллического гематита при снижении содержания

тонкодисперсного. Существенное изменение величины резонансного эффекта, связанного с общим содержанием железа объясняется удалением летучих компонентов из ЦСП и повышением содержания железа в результате воздействия МЭМИ.

На рисунке 11 представлены термограммы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и потери массы (ТГ) ЦСП. Термограммы ЦСП характеризуются эндотермическими пиками в диапазоне 156–208 °С на кривых термогравиметрии (ТГ), что свидетельствует об удалении основного количества воды.

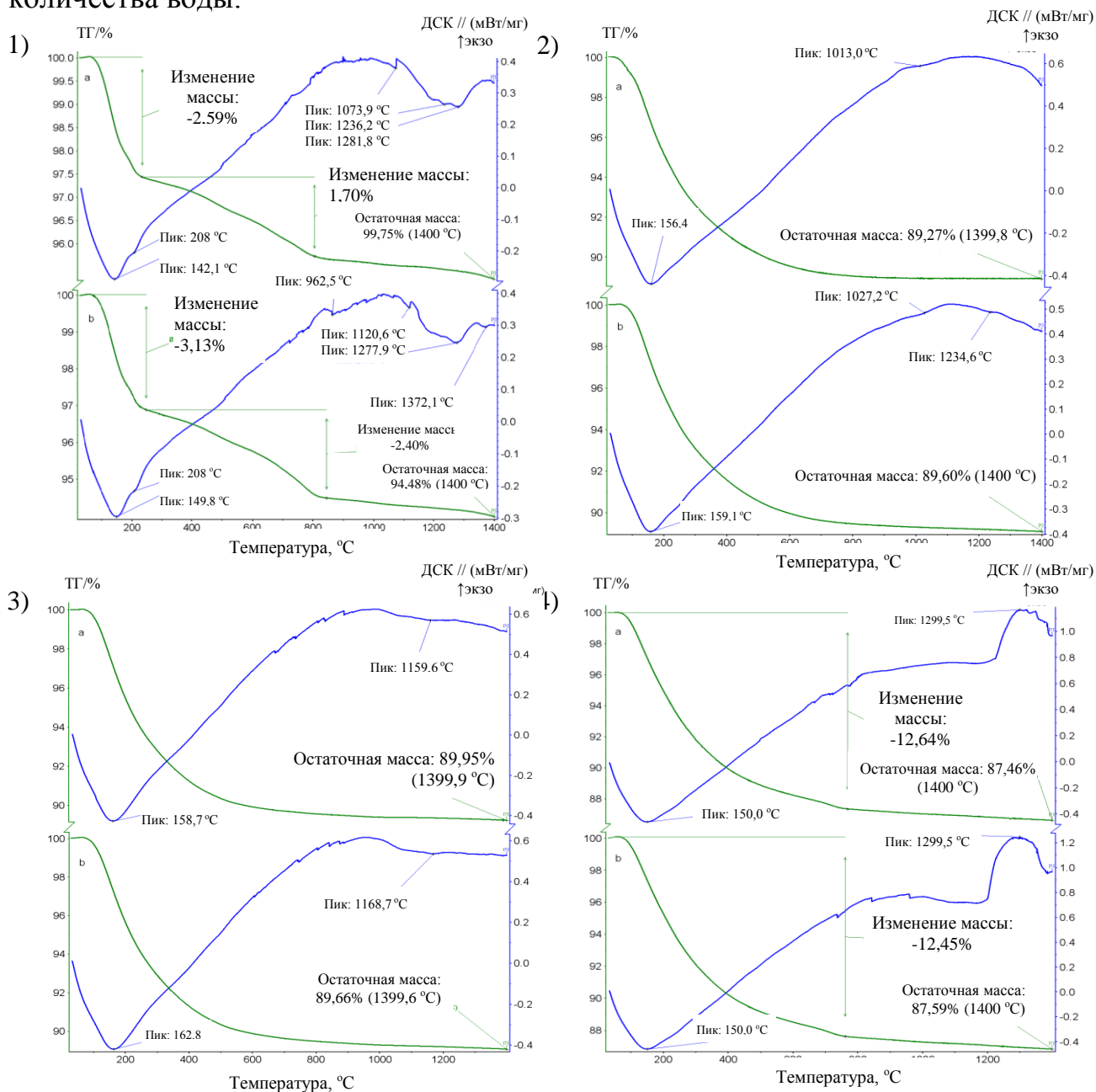


Рисунок 11 – Термограмма ДСК и потери массы ТГ ЦСП месторождений: 1) Талан-Гозагорского; 2) Бадинского; 3) Холинского; 4) Шивыртуйского месторождения (а – исходного; б – после обработки МЭМИ)

Процесс дегидратации продолжается в диапазоне температур от 800 до 1400 °С и является причиной потери массы, которая составляет для: **исходных** ЦСП Восточного Забайкалья – Талан-Гозагорского – 4,25 %; Бадинского – 10,73 %; Холинского – 10,5 %; Шивыртуйского – 10,5 %; **обработанных** МЭМИ – Талан-Гозагорского – 5,52 %; Бадинского – 10,4 %; Холинского – 10,34 %; Шивыртуйского – 10,34 %).

МЭМИ в значительной степени способствуют увеличению содержания железа (вследствие удаления летучих веществ в процессе дегидратации) и изменению структуры минерала цеолита. Эндотермические эффекты на термограмме в диапазоне 1200–1280 °С свидетельствуют о плавлении силикатных фаз железа.

Воздействие МЭМИ на ЦСП приводит к образованию систем трещин и микротрещин по границам срастания цеолитовых и породообразующих минералов, обуславливающих их дальнейшую эффективную дезинтеграцию и обогащение.

Обработка ЦСП мощными электромагнитными импульсами приводит к укрупнению зерен гематита с увеличением значений резонансного эффекта и магнитной восприимчивости до $520\text{--}690 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Это обеспечивает эффективность последующего применения электромагнитной сепарации и повышает извлечение железосодержащих примесей до 89,9–99,3 % при напряженности магнитного поля сепаратора 1450 кА/м и классе крупности ЦСП $-0,3+0,1 \text{ мм}$.

Зависимость извлечения железосодержащих примесей из ЦСП от крупности пород представлена на рисунке 12 и свидетельствует о снижении извлечения магнитных примесей с увеличением класса крупности пород.

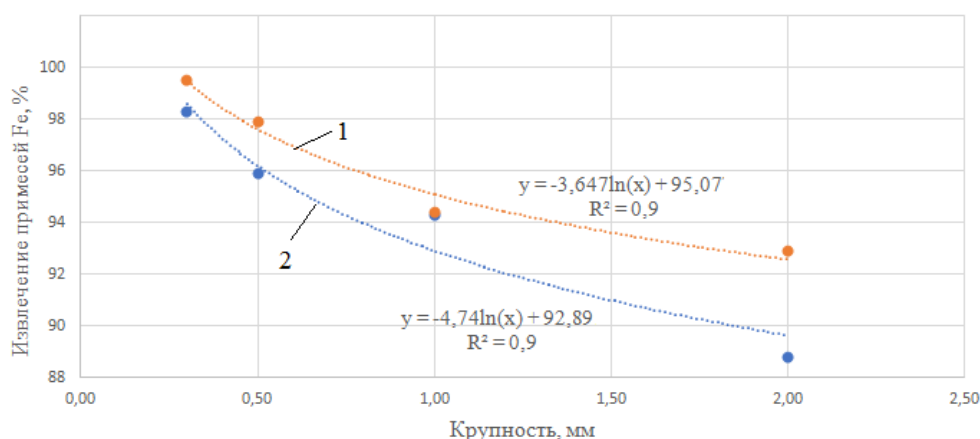


Рисунок 12 – Зависимость извлечения примесей Fe электромагнитной сепарацией от крупности ЦСП (после воздействия МЭМИ) месторождений: 1 – ЦСП Талан-Гозагорское; 2 – ЦСП Шивыртуйское

Изучено влияние воздействия ускоренными электронами на гранулометрический состав ЦСП и коэффициент раскрытия (f) цеолитовых минералов (клиноптилолита и шабазита) исходных и обработанных ускоренными электронами при дозе 2 кГр (рисунок 13).

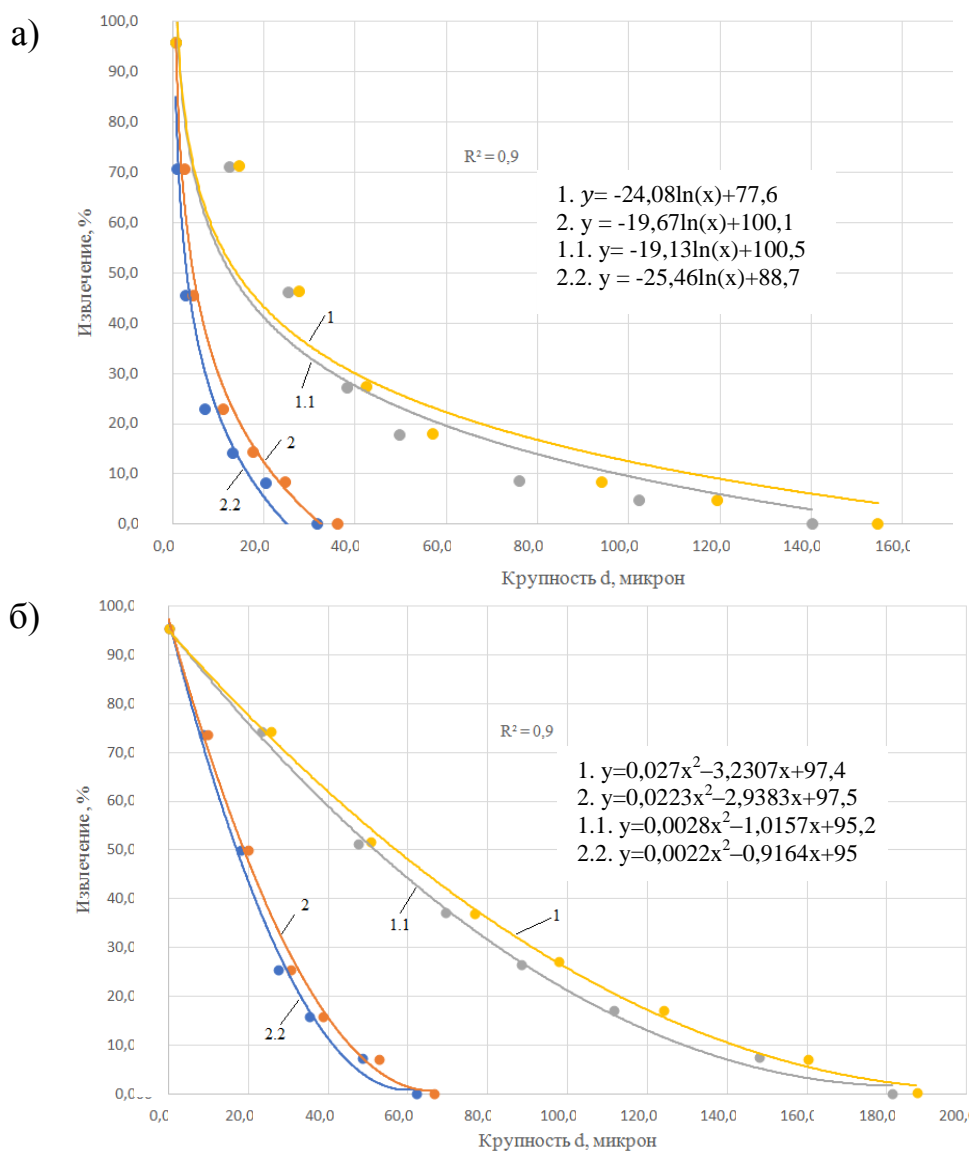


Рисунок 13 – Влияние воздействия ускоренными электронами на гранулометрический состав ЦСП (1) и коэффициент раскрытия (f) цеолитовых минералов клиноптилолита и шабазита в них (2): а) измельчение без обработки; б) измельчение с обработкой при дозе обработки 2 кГр

При использовании предварительной обработки ЦСП ускоренными электронами в диапазоне малых доз облучения (2–4 кГр) впервые установлена закономерность увеличения коэффициента раскрытия (по минералам клиноптилолит и шабазит) для ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений с 38 до 54 % и с 46 до 62 % соответственно. Это обусловлено образованием систем трещин и микротрещин по границам срастания зерен минералов за счет возникновения каналов пробоя, обеспечивающих последующую селективную дезинтеграцию цеолитов и породообразующих минералов. Предварительное воздействие на ЦСП ускоренными электронами обеспечивает укрупнение зерен гематита и увеличение значений показателя магнитной восприимчивости до $460\text{--}660 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ и позволяет повысить извлечение железосодержащих примесей до 89,7–99,6 %.

На рисунке 14 приведена зависимость извлечения железосодержащих примесей электромагнитной сепарацией от крупности ЦСП Талан-Гозагорского и Шивыртуйского месторождений при обработке ускоренными электронами, которая свидетельствует о снижении эффективности удаления магнитных минералов с увеличением класса крупности пород. Воздействие потоком ускоренных электронов на ЦСП, по аналогии с обработкой МЭМИ, в значительной степени повышает извлечение из них железосодержащих примесей электромагнитной сепарацией с достижением наибольшего эффекта при тех же режимных параметрах процесса (напряженность магнитного поля сепаратора 1450 кА/м; класс крупности ЦСП -0,3+0,1 мм).

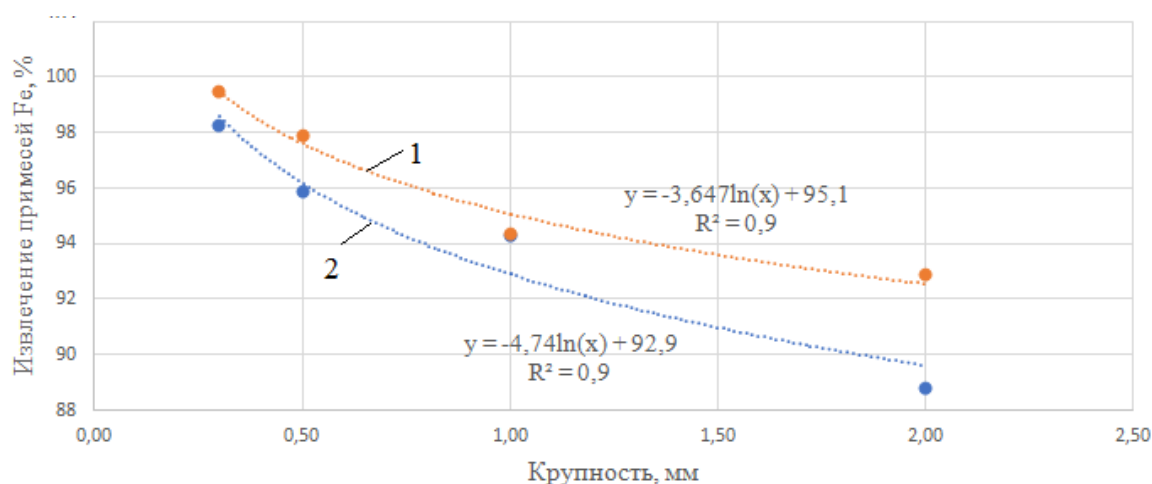


Рисунок 14 – Зависимость извлечения примесей Fe электромагнитной сепарацией от крупности ЦСП (при обработке ускоренными электронами) месторождений: 1 – Талан-Гозагорского; 2 – ЦСП Шивыртуйского

Изучено влияние термических воздействий на структурно-чувствительные свойства ЦСП. На рисунке 15 приведены мессбауэровские спектры ЦСП Восточного Забайкалья исходного и после обжига. При температуре 200 °С практически не происходит химических изменений в молекулах природных цеолитов. При повышении температуры обжига ЦСП до 500 °С изменяется их структура.

Установлено, что термическое воздействие способствует разделению цеолитов и вмещающих минералов за счет возникновения напряжений в породах при нагреве и, как следствие, образованию трещин и микротрещин по границам их срастания. Применение обжига ЦСП обеспечивает укрупнение частиц гематита, о чем свидетельствует повышение значений его магнитной восприимчивости до $450 \cdot 10^{-8}$ – $680 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, и предопределяет возможность эффективного применения электромагнитной сепарации для обогащения ЦСП (извлечение гематита из ЦСП составляет 89,5–99,7 %).

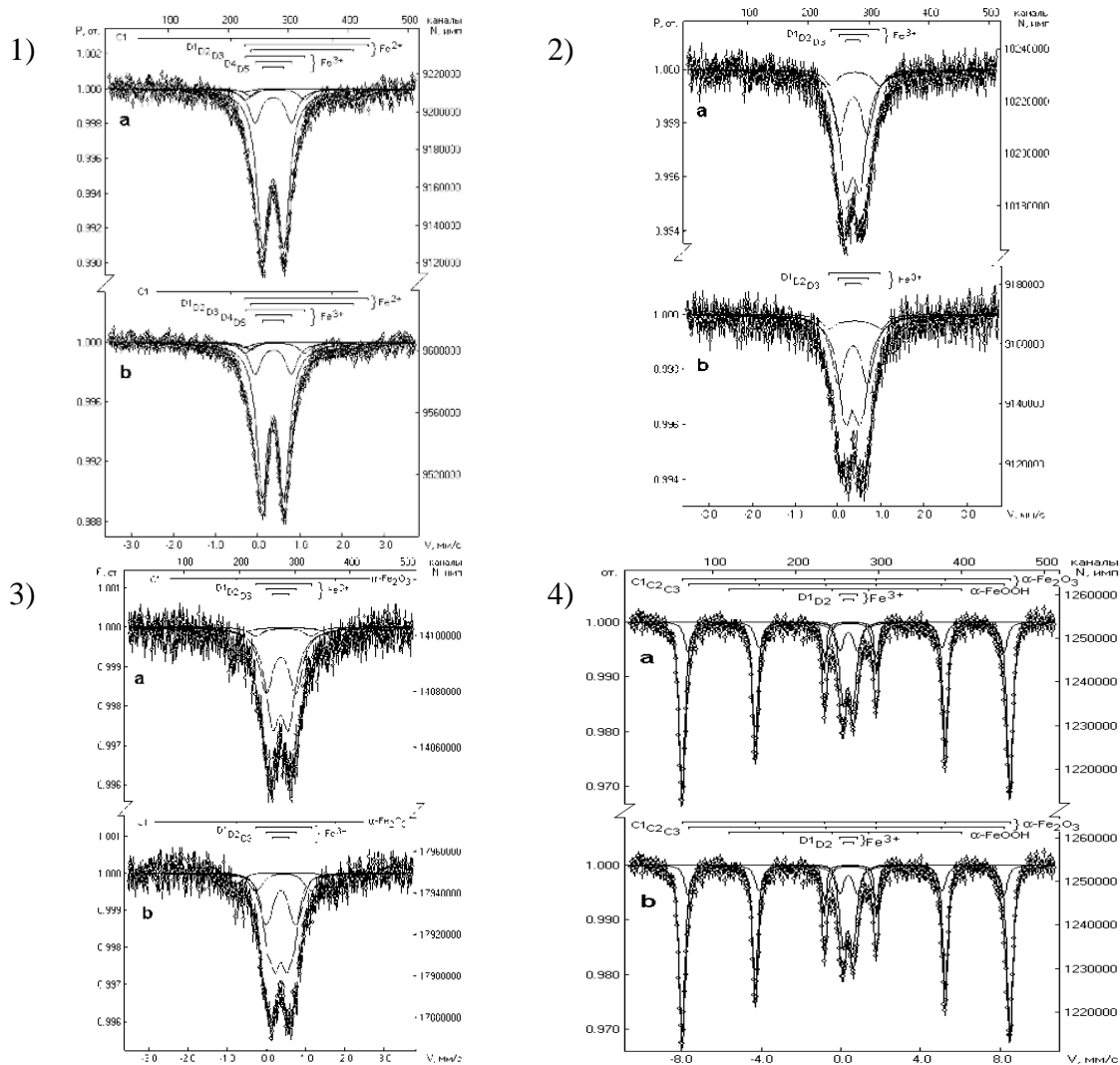


Рисунок 15 – Мессбауэровские спектры ЦСП Восточного Забайкалья (а – исходного; б – после обжига) месторождений: 1 – Шивыртуйское; 2 – Холинское; 3 – Бадинское; 4 – Талан-Гозагорское

На рисунке 16 приведены зависимости извлечения железосодержащих примесей электромагнитной сепарацией от крупности ЦСП (рисунок 16).

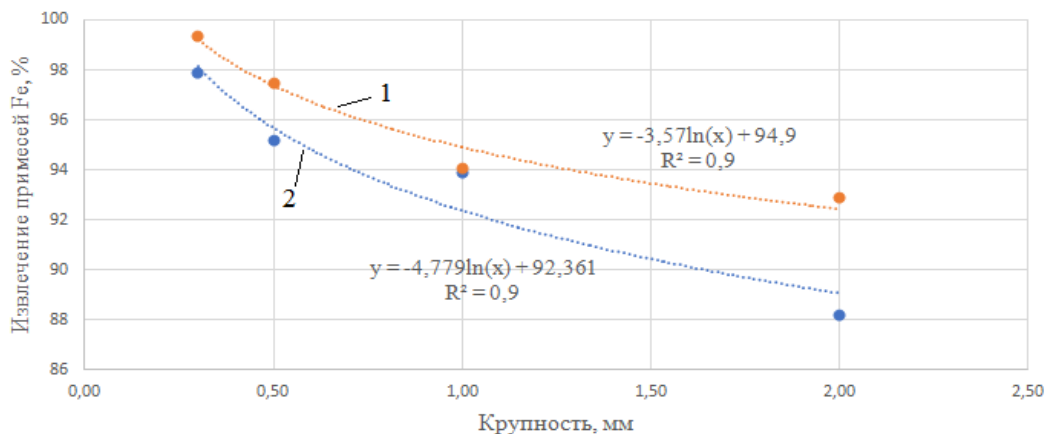
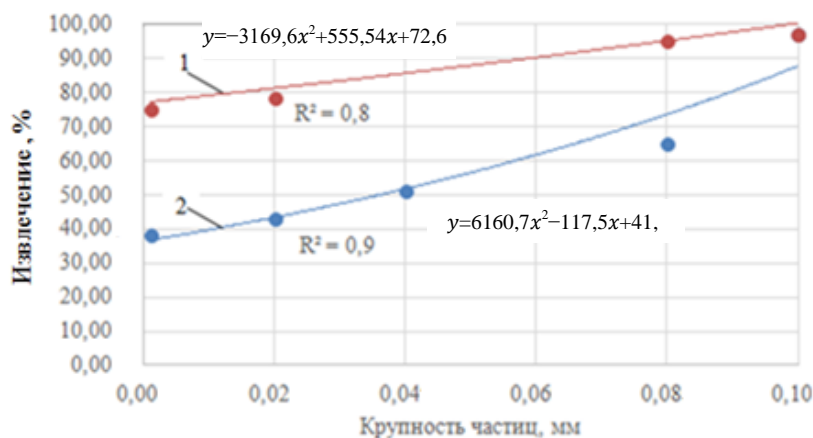


Рисунок 16 – Зависимость извлечения примесей Fe электромагнитной сепарацией от крупности ЦСП (после обжига) месторождений: 1 – ЦСП Талан-Гозагорское; 2 – ЦСП Шивыртуйское

Оценена возможность применения электростатической сепарации для отделения цеолитовых минералов от немагнитных примесей (кварца, полевого шпата, монтмориллонита и др.).

Для интенсификации процессов разделения минералов ЦСП применен метод подогрев-электризации поверхности пород с использованием паров салициловой кислоты. Зависимость извлечения цеолитовых минералов из ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений от крупности пород с использованием электризации и без нее представлены на рисунке 17.

а)



б)

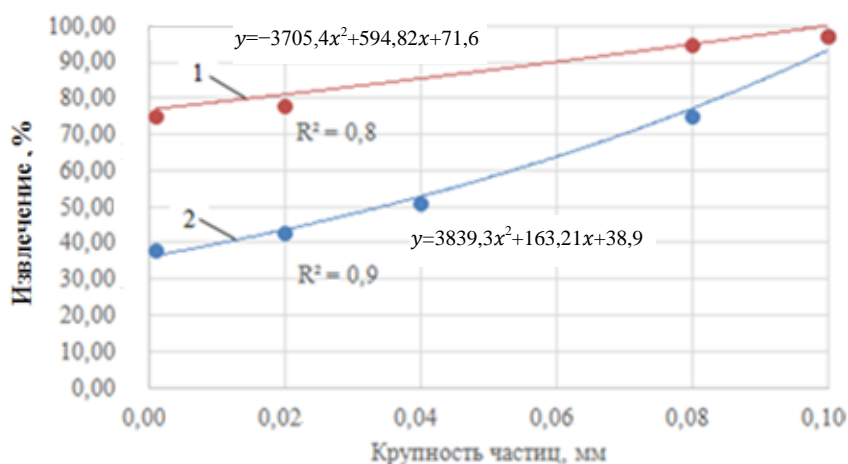


Рисунок 17 – Зависимость извлечения минералов цеолита из ЦСП Шивыртуйского (а) и Талан-Гозагорского (б) месторождений электростатической сепарацией от крупности пород (1 – с контрастным зарядом; 2 – без контрастного заряда)

Обработка ЦСП салициловой кислотой с концентрацией $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ кг/см³ для контрастного заряжения поверхности цеолитовых и породообразующих минералов в течение 30 минут с одновременным подогревом до 80–100 °С интенсифицирует процесс извлечения немагнитных примесей (кварца, полевого шпата) из пород крупностью $-0,074+0,05$ мм методом электростатической сепарации. При напряженности поля $(2,7-4,0) \cdot 10^{-5}$ В/м получен концентрат с содержанием цеолитов до 99,23–99,88 %. Удаление

большей части кремнеземсодержащих минералов в хвосты существенно повышает кремниевый модуль ЦСП (с 0,21–0,31 до 0,55–0,62).

Таким образом, экспериментально установлено, что: 1) эффективным способом извлечения железосодержащих примесей из ЦСП является электромагнитная сепарация в изодинамическом поле с применением модернизированного магнитного сепаратора (патент РФ № 2278737); 2) эффективным способом удаления примесей кварца и полевых шпатов из ЦСП является электростатическая сепарация с обработкой пород парами салициловой кислоты для повышения контрастности свойств цеолитовых и породообразующих минералов. Термическая возгонка кислоты обеспечивает направленное придание заряда минеральным частицам полевых шпатов и кварца, интенсифицируя процесс их извлечения из ЦСП.

На основании проведенных исследований предложены альтернативные варианты технологических схем рудоподготовки и обогащения (рисунок 18).

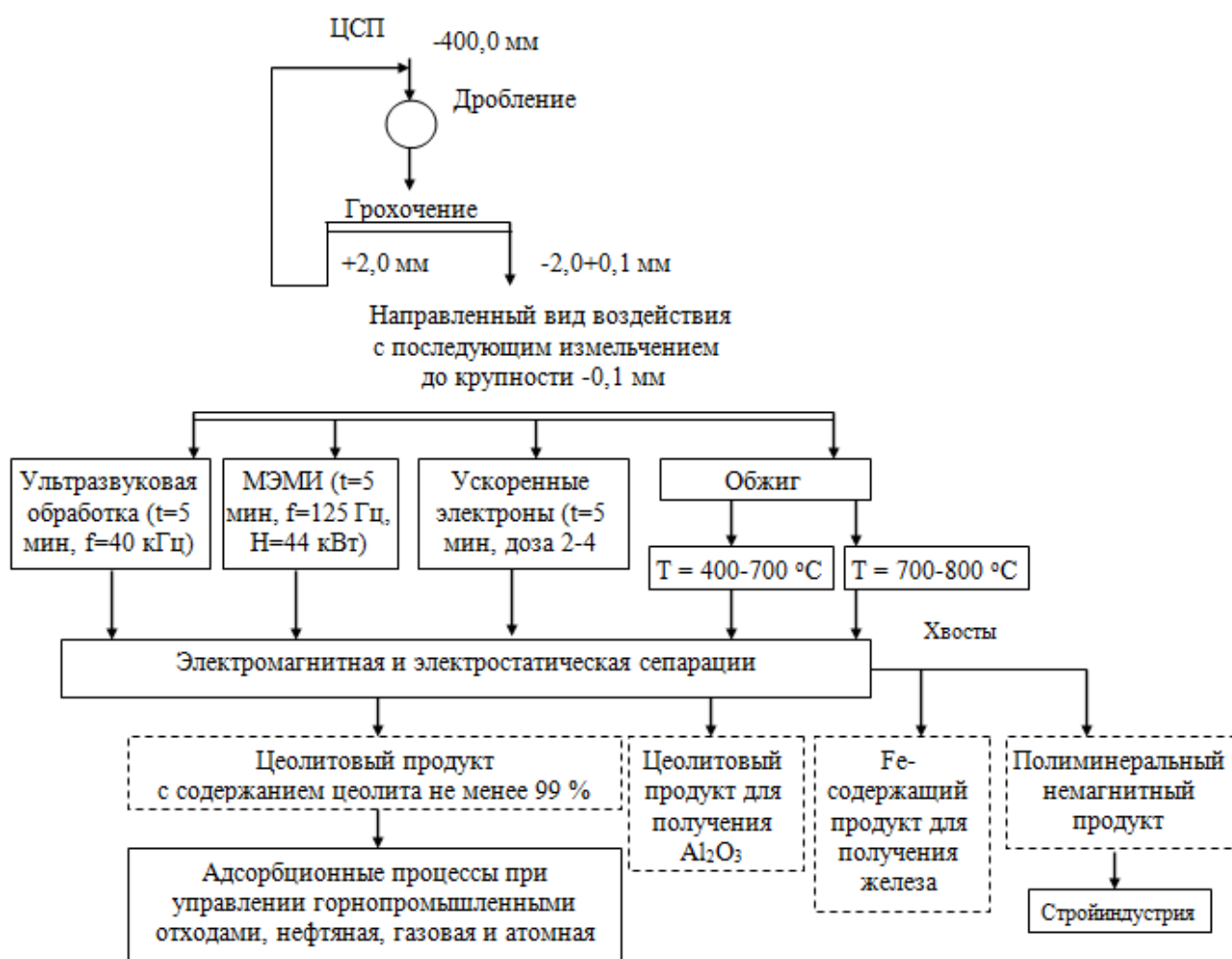


Рисунок 18 – Альтернативные варианты технологий рудоподготовки и обогащения ЦСП Восточного Забайкалья

Альтернативные варианты рудоподготовки и сепарации в зависимости от минерального состава ЦСП представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Альтернативные варианты рудоподготовки и сепарации в зависимости от минерального состава ЦСП

Выделяемый минерал	Преобладающие минералы-примеси	Варианты рудоподготовки и сепарации
Цеолит, шабазит	Полевые шпаты, слюды (> 50 мкм)	Направленные воздействия (ускоренные электроны, МЭМИ, обжиг)
		Электромагнитная сепарация (для тонкодисперсных ЦСП сепарация в изодинамическом поле)
		Электростатическая сепарация
	Глинистые минералы (< 50 мкм)	Направленные воздействия (обжиг, ускоренные электроны, МЭМИ)
		Электромагнитная сепарация в изодинамическом поле
		Электростатическая сепарация с электризацией
Цеолит, шабазит	Минералы группы кварца, глинистые минералы	Ультразвуковая обработка
		Электростатическая сепарация

Разработанная автором принципиальная схема обогащения ЦСП (рисунок 19) прошла апробацию в научно-производственном внедренческом обществе ООО «Цеолит». Режимные параметры реализации технологической схемы представлены в таблице 3.

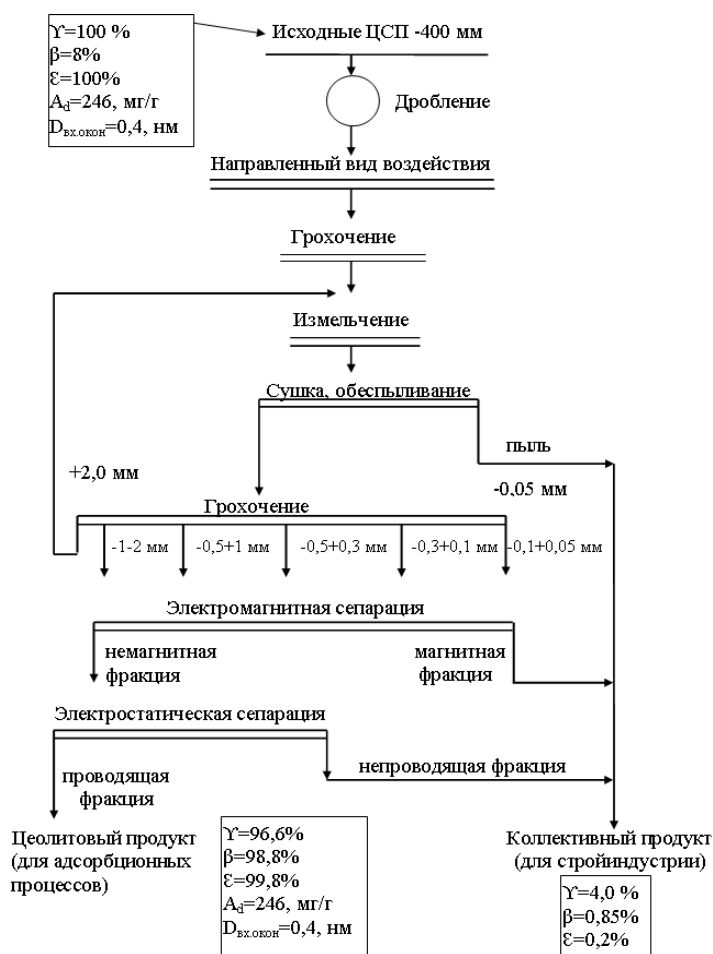


Таблица 3 – Основные режимные параметры технологии

Параметр	Значение
<i>Направленное воздействие</i>	
Ультразвуковая обработка	
Частота воздействия, кГц	40
Время воздействия, мин	5-7
Обжиг	
Температура обжига, °С	400-500
Время обжига, мин	30
МЭМИ	
Частота воздействия, Гц	125
Напряжение, кВт	44
Время воздействия, мин	5
Ускоренные электроны	
Дозы облучения, кГр	2-4
Время воздействия, мин	5
<i>Электромагнитная сепарация</i>	
Напряженность поля, кА/м	1450
<i>Электростатическая сепарация</i>	
Напряженность поля В/м	$2,7 \cdot 10^{-5}$

Рисунок 19 – Принципиальная технологическая схема переработки ЦСП

Таким образом, разработанные новые технические (Патент РФ № 2278737) и технологические решения (Патент РФ № 2229342, Патент РФ № 2455073), включающие следующие операции: 1) рудоподготовка с применением направленного воздействия (ультразвуковая/акустическая обработка, МЭМИ, ускоренные электроны, обжиг), электромагнитная и электростатическая сепарация; 2) рудоподготовка, электромагнитная сепарация в изодинамическом поле с предварительной акустической обработкой, электростатическая сепарация при напряженности поля $(2,7-4,0) \cdot 10^{-5}$ В/м с электризацией салициловой кислотой с концентрацией $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ кг/м³ при 80–100 °С, позволяют влиять на выбор эффективных технологий рудоподготовки, основанных на применении акустических, энергетических и термических воздействий с целью направленного повышения контрастности разделительных свойств минералов ЦСП и активации физико-химических процессов на их поверхности и в объеме.

Третье защищаемое научное положение. Управление качеством цеолитсодержащих пород и получение цеолитовой продукции с высокой адсорбционной способностью достигается сочетанием традиционных методов обогащения с гидрохимической модификацией, обеспечивающим эффективное удаление вмещающих примесей, сопровождающееся увеличением диаметра входных окон цеолитов до 0,6–0,75 нм.

Экспериментально оценена возможность модификации ЦСП деалюминированием для улучшения сорбционной способности. Для деалюминирования использовали раствор серной кислоты с концентрацией 5–10 %.

При разработке технологии деалюминирования ЦСП и определения рациональных параметров процессов следует учитывать химическую устойчивость входящих в состав пород минералов, которая зависит в большей степени от величины энергии кристаллических решеток.

Для исследования степени взаимодействия минералов, входящих в состав ЦСП, с серной кислотой большое значение имеет стадийность процесса разложения, включающего: диффузию; непосредственную химическую реакцию; получение продукта разложения (раствор). В ходе проведения исследований изучалось взаимодействие алюмосодержащих (клиноптилолит, шабазит, морденит) и железосодержащих минералов (микроклин, гематит) с серной кислотой.

Эффективность и полнота разложения минералов, входящих в состав ЦСП Восточного Забайкалья, серной кислотой оценена посредством свободной энергии Гиббса, которая определялась с учетом теплоемкости и температуры процесса разложения и составила для минералов цеолита $\Delta G = 50-70$ ккал/моль, для микроклина 7–10 ккал/моль. С повышением температуры процесса наблюдается существенное увеличение степени разложения минералов. При этом выводы о взаимодействии минералов цеолитов, гематита и микроклина, входящих в состав ЦСП Восточного Забайкалья, с кислотами,

согласуются с результатами, полученными при расчетном определении величин энергии их кристаллических решеток (таблица 4).

Таблица 4 – Количественная оценка эффективности разложения минералов, входящих в состав ЦСП Восточного Забайкалья, серной кислотой

Минерал	Энергия решетки, отнесенная к одному атому кислорода, ккал/моль	Константа скорости [г/см ³ ·ч] разложения минералов при T, °C			Величина кажущейся энергии активации (У, ккал/моль) при T, °C	
		70	80	90	70–80	80–90
Цеолит	1429,5	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	36,0	34,0
Микроклин	1615,0	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	10,5	7,15
Гематит	1458,2	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	7,8	6,8

Значения химической устойчивости и константы скорости разложения цеолитовых минералов, а также гематита и микроклина определяют возможность селективной модификации свойств ЦСП в заданном направлении.

Энергия кристаллической решетки для изученных минералов имеет следующие значения: цеолитовых (шабазит, клиноптилолит, морденит) – 1429,5–1452,1 ккал/моль, гематита – 1458,2–1547,2 ккал/моль, микроклина – 1615,0–1643,0 ккал/моль. Установлено, что наиболее кислотоустойчивым минералом является микроклин.

Модификация природных цеолитов dealюминированием расширяет возможности их применения в процессах сорбционной очистки сточных и оборотных вод от радиоактивных элементов (цезий, стронций и др.).

Сравнительная оценка адсорбционной способности природных цеолитов до и после кислотной обработки приведена в таблице 5. Кислотная обработка природных цеолитов в достаточной степени повышает их адсорбционную способность, однако данное правило действует лишь для кислотостойких типов (морденит, клиноптилолит), при этом менее кислотоустойчивый шабазит ухудшает (при концентрации кислоты 10-20 %) свои адсорбционные свойства (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнительная оценка адсорбционной способности природных цеолитов Восточного Забайкалья до и после кислотной обработки

Месторождение (тип)	Адсорбционная способность, мг/г	
	необработанный	обработанный
Шивыртуйское, Холинское (клиноптилолит)	147	154
Бадинское (морденит)	109	123
Талан-Гозагорское (шабазит)	246	79

Таким образом, посредством комбинирования традиционных методов обогащения с методами модификации (dealюминирование) можно управлять структурно-чувствительными свойствами ЦСП.

Разработанная автором принципиальная схема обогащения и химической модификации тонкодисперсных ЦСП, включающая последовательно связанные

между собой отдельные операции измельчения, грохочения, обесшламливания, ультразвуковой (акустической) обработки, электромагнитной сепарации в изодинамическом поле, электростатической сепарации с предварительной подогрев-электризацией парами салициловой кислоты ($C_7H_6O_3$), деалюминирования 5 %-ным раствором серной кислоты, приведена на рисунке 20.

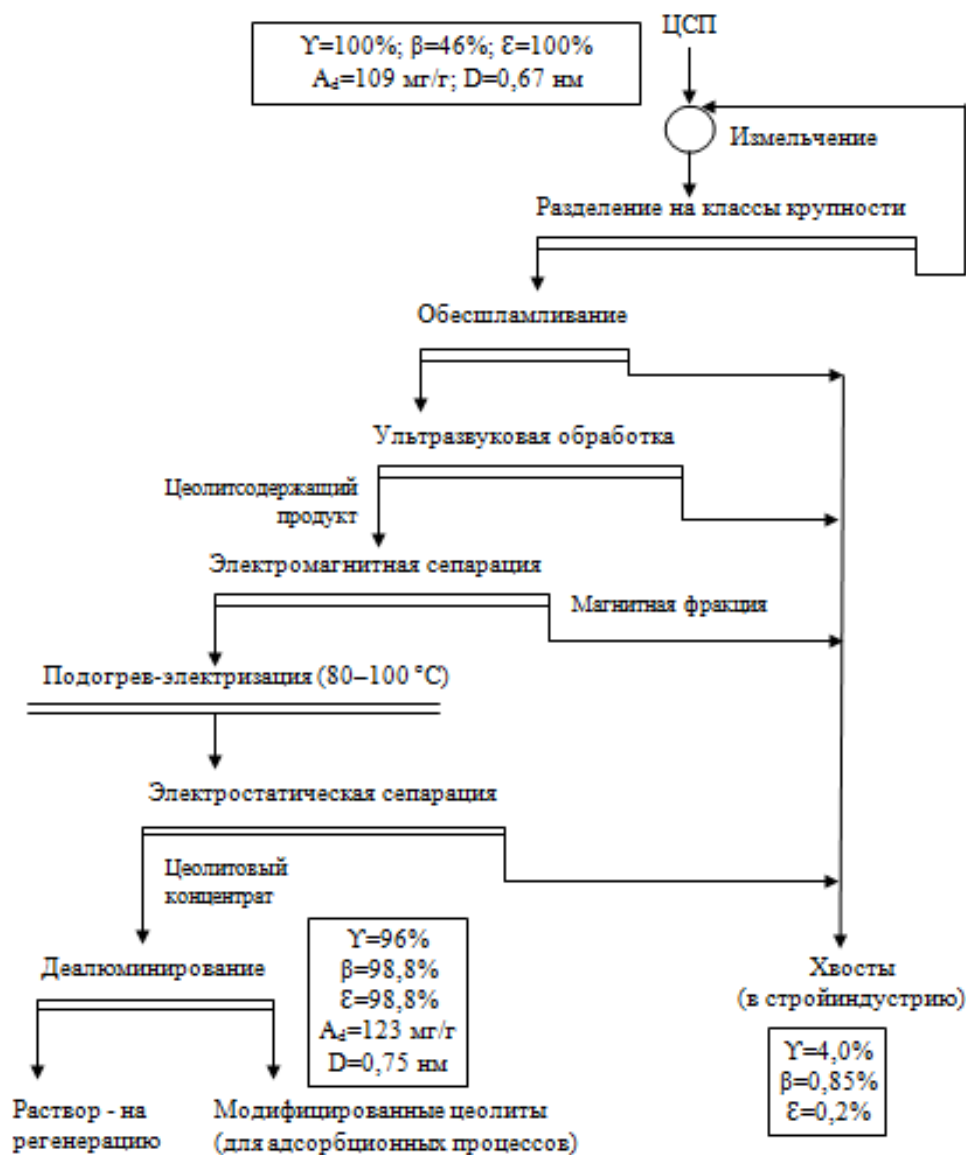


Рисунок 20 – Патентозащищенная принципиальная схема обогащения и химической модификации тонкодисперсных ЦСП (Патент РФ № 2455073)

Кислотная обработка Шивыртуйского, Холинского, Бадинского и Талан-Гозагорского месторождений ЦСП увеличивает диаметры входных окон основных цеолитовых минералов (клиноптилолита, шабазита, морденита) до $\sim 0,6\text{--}0,75$ нм и повышает значения модуля Si/Al (19,85–32,0) в изменяющемся диапазоне концентраций серной кислоты (1–10 %) – (таблица 6).

Таблица 6 – Зависимость степени деалюминирования и кремниевого модуля природных цеолитов Восточного Забайкалья от концентрации серной кислоты

Концентрация H ₂ SO ₄ , %	ЦСП Шивыртуйского месторождения		ЦСП Холинского месторождения		ЦСП Бадинского месторождения	
	Al ₂ O ₃ , %	Si/Al	Al ₂ O ₃ , %	Si/Al	Al ₂ O ₃ , %	Si/Al
–	13,61	4,62	12,21	5,37	10,57	6,48
1,0	11,22	5,60	8,31	7,90	8,32	8,23
2,5	9,74	6,45	6,74	9,74	6,74	10,16
5,0	6,21	10,13	6,42	10,22	6,28	10,90
10,0	2,05	29,26	2,15	32,00	3,45	19,85

Достижимые при обогащении и кислотной модификации ЦСП размеры входных окон цеолитов определяют возможность их применения для сорбции компонентов жидких и газообразных отходов: радионуклидов (цезий, стронций, торий), мышьяка, нефтепродуктов, диоксида серы и т. д. (таблица 7).

Таблица 7 – Параметры использования высококачественной цеолитовой продукции в технологиях управления горнопромышленными отходами

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	
Морденит	0,75	

Таким образом, сочетание традиционных методов обогащения с гидрохимической модификацией обеспечивает эффективное удаление вмещающих примесей и увеличение диаметра входных окон цеолитов до 0,6–0,75 нм, что позволяет управлять качеством ЦСП и получать цеолитовую продукцию с высокой адсорбционной способностью.

Четвертое защищаемое научное положение. Эффективность применения технологий обезвреживания, очистки, рекультивации и захоронения горнопромышленных отходов определяется рациональным и комплексным использованием цеолитсодержащих пород, базирующимся на их адсорбционных свойствах с учетом достигаемых эколого-экономических показателей.

Предлагаемые автором технологии обогащения ЦСП позволяют повысить их сорбционные характеристики по отношению к ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr за счет очистки и увеличения порового пространства цеолитов. Наиболее высокой сорбционной способностью и селективностью к ¹³⁷Cs ($K_d^{137Cs} = 2112 \text{ см}^3/\text{г}$) обладают обогащенные ЦСП Талан-Гозагорского месторождения (таблица 8). Наилучшую сорбционную емкость по отношению к ⁹⁰Sr ($K_d^{90Sr} = 1800 \text{ см}^3/\text{г}$) имеют обогащенные ЦСП Бадинского месторождения (таблица 9).

Таблица 8 – Значения коэффициента распределения (K_d) ^{137}Cs для исходных и обогащенных ЦСП при сорбции из раствора 0,1 и 1,0 моль/дм³ NaNO_3

Месторождение	Значения K_d ^{137}Cs , см ³ /г при сорбции из раствора	
	0,1 моль/дм ³ NaNO_3	1,0 моль/дм ³ NaNO_3
Исходные		
Бадинское	2210±90	131± 3
Холинское	1780±50	64± 3
Шивыртуйское	1590±40	81± 4
Талан-Гозагорское	1930±50	826± 4
Обогащенные до 98 %		
Бадинское	2470±90	248± 3
Холинское	1850±50	112± 3
Шивыртуйское	1680±40	137± 4
Талан-Гозагорское	2090±50	2112± 4

Таблица 9 – Значения статической обменной емкости по Ca^{2+} , коэффициента распределения (K_d) ^{90}Sr и коэффициента разделения пары Sr/Ca ($D_{\text{Sr}/\text{Ca}}$) для исходных и обогащенных ЦСП

Месторождение	СОЕ по Ca^{2+} , моль/г	K_d ^{90}Sr , см ³ /г	$D_{\text{Sr}/\text{Ca}}$
Исходные			
Бадинское	0,82	1120±50	9,0
Холинское	0,74	185±5	1,8
Шивыртуйское	0,43	205±5	4,2
Талан-Гозагорское	0,45	65±4	1,3
Обогащенные до 98 %			
Бадинское	1,65	1800±50	4,7
Холинское	0,24	340±10	14,3
Шивыртуйское	0,038	510±10	48
Талан-Гозагорское	<0,01	170±5	-

В этой связи природные цеолиты могут эффективно применяться для очистки сточных и оборотных вод от радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs до норм предельно допустимых концентраций (7 мг/л).

Оценена возможность использования ЦСП Восточного Забайкалья для очистки сточных и оборотных вод от нефтепродуктов. Сравнительная оценка нефтеемкости исходных и обогащенных ЦСП приведена в таблице 10. Разработанные технологии обогащения позволяют получать цеолитовую продукцию, обладающую достаточно высокой нефтеемкостью по сравнению с необогащенными ЦСП, что обуславливается повышением их сорбционной способности за счет очистки порового пространства посредством удаления вмещающих примесей. Наилучшими показателями по нефтеемкости обладают обогащенные ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений класса крупности -1+0,5 мм (таблица 10).

Таблица 10 – Сравнительная оценка нефтеемкости ЦСП Восточного Забайкалья

Сорбент	Класс крупности, мм	Нефтеемкость, %
	Исходные	
ЦСП Шивыртуйского месторождения	-2+1	175
	-1+0,5	228
Талан-Гозагорского месторождения	-2+1	175
	-1+0,5	180
Обогащенные		
Шивыртуйского месторождения	-2+1	221
	-1+0,5	282
Талан-Гозагорского месторождения	-2+1	218
	-1+0,5	229

Разработана технология рекультивации (консервации) хвостохранилищ (Патент РФ № 2513468), включающая операции обработки их поверхности смесью ЦСП с водой при соотношении «ЦСП-вода»=1:2 для формирования устойчивого почвообразующего слоя; рыхление поверхностного минерального слоя хвостохранилища на глубину 10–13 см; обработку заскладированных хвостов связующим составом (водорастворимый полимер типа ПАА-ГС, Праестол 2540 или лигнин) с одновременным посевом многолетних трав и уплотнением поверхностного слоя. Согласно разработанной технологии (рисунок 21), вода в процесс подается из специального отстойного сооружения.

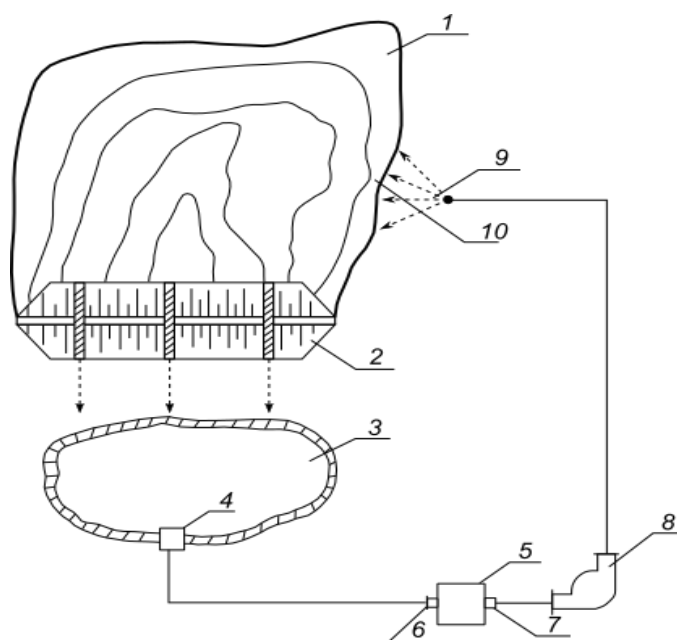


Рисунок 21 – Технология рекультивации хвостохранилищ (патент РФ № 2513468): 1 – хвостохранилище; 2 – основная дамба; 3 – пруд-отстойник; 4 – насосная станция; 5 – узел приготовления цеолитовой суспензии; 6 – приемный патрубок; 7 – выходной патрубок; 8 – землесос; 9 – поворотная конструкция; 10 – насадка

Нанесение гидросмеси по всей поверхности хвостохранилища производится землесосом по направлению к плотине. Устройство для приготовления и нанесения смеси ЦСП-вода работает по принципу системы

водооборотной подачи воды. Обратная вода закачивается насосной станцией из пруда-отстойника. Гидросуспензия равномерно распределяется по всей поверхности хвостохранилища посредством землесоса с поворотным механизмом и насадкой.

Проведены исследования по формированию устойчивого почвообразующего слоя с применением ЦСП на примере хвостохранилища Шерловгорского ГОКа. Для повышения прочностных свойств поверхностной «корки» использован 0,1 %-ный раствор полиакриламида ПАА-ГС из расчета $1,5 \text{ л/м}^2$, что создает защитный экран, предотвращает выдувание семян и способствует их интенсивному прорастанию. Эффективное снижение пылеобразования и переноса пыли обеспечивается в данном случае достаточной прочностью покрытия хвостохранилища, его водо- и ветроустойчивостью, температуростойкостью, экологической безопасностью и долговечностью (рисунок 22).

На рисунке 22 приведены характеристики пылеуноса частиц крупностью 0,071–0,25 мм с необработанной (1) и обработанной (2) реагентом ПАА-ГС поверхности хвостохранилища при скорости ветра 3–5 м/с.

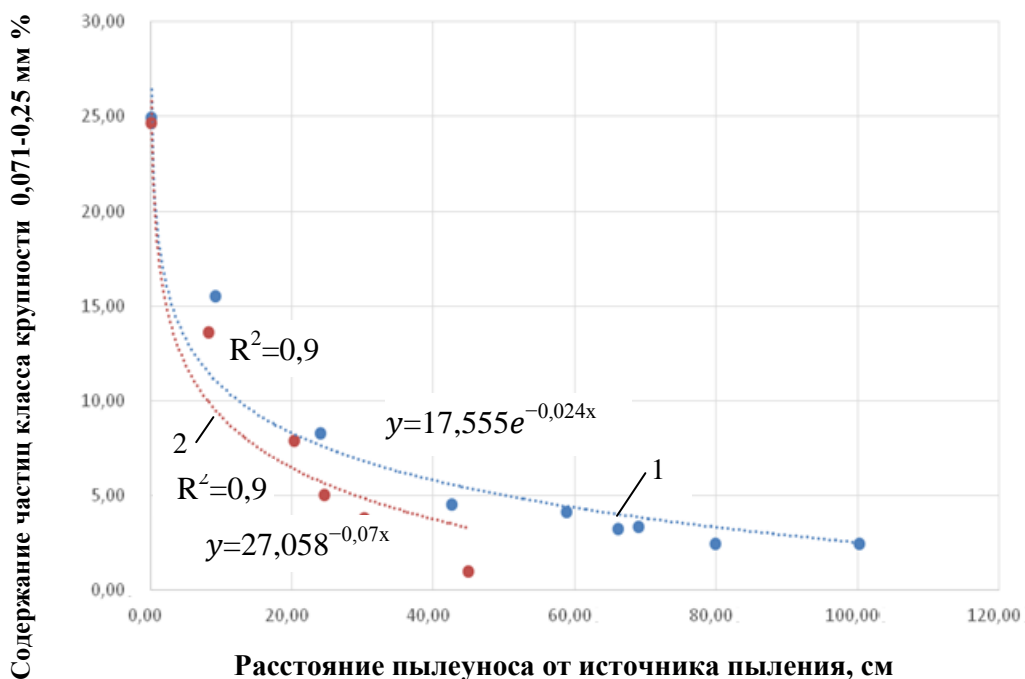


Рисунок 22 – Характеристика пылеуноса частиц крупностью 0,071–0,25 мм при скорости ветра 3–5 м/с

Проведены исследования по оценке возможности очистки отходящих дымовых газов котельных и ТЭС горнопромышленных предприятий от SO_2 природными цеолитами. Установлено, что достаточно высокий показатель сорбционной емкости ЦСП по сернистым соединениям (не менее 16 % масс) определяет возможность их использования в данном направлении. Результаты исследований представлены в таблице 11.

Установлено, что эффективность очистки отходящих дымовых газов от диоксида серы составляет 90–95 %.

Таблица 11 – Результаты очистки отходящих дымовых газов от SO₂
ЦСП Восточного Забайкалья

Месторождение	Масса сорбента, кг	Состав пропускаемого газа	Скорость подачи газа, л/мин	Длительность подачи газа SO ₂ до насыщения, ч	Емкость сорбента по SO ₂ , г/кг	Влажность, %
Шивыртуйское	4,0	100 % SO ₂	1,0	2,5	146,7	7,0
	4,0	10 % SO ₂	1,0	17	149,9	7,0
Бадинское	4,0	100 % SO ₂	1,0	2,3	146,4	7,0
	4,0	10 % SO ₂	1,0	16,5	149,6	7,0
Холинское	4,0	100 % SO ₂	1,0	2,4	146,7	7,0
	4,0	10 % SO ₂	1,0	16,6	149,5	7,0
Талан-Гозагорское	4,0	100 % SO ₂	1,0	2,8	147,3	7,0
	4,0	10 % SO ₂	1,0	17,5	150,4	7,0

Разработаны новые технические решения для захоронения радиоактивных монацитовых отходов «могильника» в г. Балей и рекультивации зданий бывшего мышьякового завода (поселок Вершино-Дарасунский) и грунта, загрязненного тяжелыми металлами прилегающих к нему территорий. Способ захоронения токсичных и радиоактивных отходов, представленный на рисунке 23, включает: устройство котлована (1), обустройство защитного экрана из цементогрунтового раствора (3) и полимерной пленки толщиной не менее 5 мм (2) по его днищу и бортам; послойную укладку токсичных или радиоактивных отходов с уплотнением (4) и перекрытием каждого слоя техногенного сырья разделительным изолирующим слоем (5) из цементогрунтового раствора, содержащим в качестве наполнителя природный цеолит.

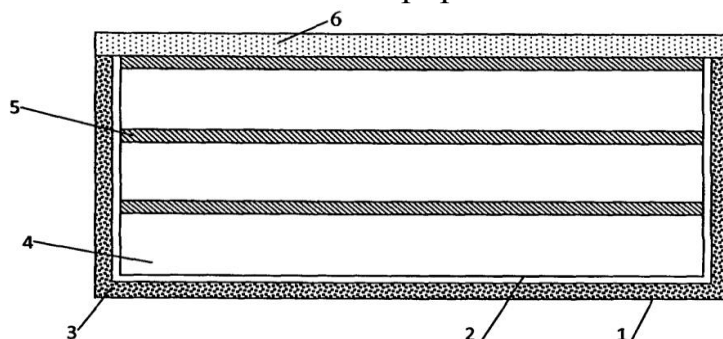


Рисунок 23 – Устройство котлована для захоронения токсичных и радиоактивных отходов (Патент РФ № 2515578)

Верхняя часть котлована покрыта специальным плодородным слоем (6), содержащим 30 % дробленых ЦСП с целью формирования устойчивого грунтового покрытия. Результатом разработанной автором технологии является предотвращение возможности миграции токсичных и радиоактивных компонентов отходов из зоны захоронения в почву, грунты, подземные воды и атмосферу. Разработанная технология является составной частью способа сноса и захоронения зданий, загрязненных токсичными и отравляющими веществами (Патент РФ № 2393310).

Таким образом, разработанная Концепция управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования ЦСП с применением НДТ позволяет обеспечить интегральный

подход к управлению минеральными ресурсами и конкурентоспособность не только крупных промышленных компаний горной отрасли России, но и предприятий малого и среднего бизнеса.

Результаты исследований по реализации Концепции управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования ЦСП Восточного Забайкалья (рисунок 24) представлены в виде следующих ключевых научно обоснованных технологических и технических решений, базирующихся на результатах изучения вещественного состава, физико-химических и технологических свойств ЦСП:

- 1) альтернативные варианты технологий рудоподготовки – методы направленных воздействий;
- 2) альтернативные варианты технологий переработки ЦСП;
- 3) альтернативные варианты технологий обезвреживания сточных вод, рекультивации и захоронения техногенных отходов, очистки дымовых газов.

Выявленные эмпирические аналитические зависимости в виде обобщающих экспоненциально-степенных функций позволяют оптимизировать режимные параметры процессов и получать заданные технологические показатели, управлять качеством цеолитовых продуктов без дополнительных финансовых вложений на проведение исследований в лабораторных условиях.

Оценка экономической эффективности внедрения разработанных технологий рационального и комплексного использования ЦСП в производство показала, что затраты на получение высококачественного цеолитового продукта с содержанием мономинералов цеолита до 99,1 % составят порядка 10 тыс. рублей за тонну при рыночной стоимости продукции соответствующего качества до 100 тыс. рублей за тонну.

Обоснована эколого-экономическая целесообразность применения направленных воздействий в стадии рудоподготовки ЦСП Восточного Забайкалья. При этом установлено, что внедрение предлагаемых автором технологий для обогащения и переработки ЦСП Восточного Забайкалья является в достаточной степени эффективным – дисконтированный срок окупаемости затрат составляет год. Полученные расчетные технико-экономические показатели внедрения предлагаемых рекультивационных работ указывают на то, что вложения в реализацию проекта по рекультивации/консервации хвостохранилищ и отвалов пород являются экономически целесообразными.

Рентабельность данной технологии обуславливается доступными и эффективными материалами, такими как ЦСП и лигнин, полиакриламид ПАА-ГС и Праестол 2540. Критерий сравнительной эффективности комплексного использования ЦСП при внедрении разработанных технологий составляет 0,752, коэффициент комплексности использования ЦСП равен 0,98, коэффициент безотходности находится в пределах от 0,43 до 1,0, полный экономический эффект от переработки отходов обогащения и модификации ЦСП составит 44,45 млн руб/год.

Изучение вещественного состава ЦСП: химический, минеральный. Изучение физических свойств основных вмещающих минералов: микро-твердость, $кг/см^2$; плотность, $кг/м^3$; удельная магнитная восприимчивость, $n \cdot 10^{-8} м^3/кг$; электропроводность, $3853 м^{-1} \cdot см^{-1}$. Разработка виртуальных трехмерных молекулярных моделей методом визуализации и рендеринга.

Альтернативные варианты технологий рудоподготовки ЦСП – методы направленных воздействий

Ультразвук		Обага		Мощные наносекундные электромагнитные импульсы		Поток ускоренных электронов	
Режимные параметры и технологические показатели в зависимости от сорта ЦСП	Эмпирические зависимости	Режимные параметры и технологические показатели	Эмпирические зависимости	Режимные параметры и технологические показатели	Эмпирические зависимости	Режимные параметры и технологические показатели	Эмпирические зависимости
Концентрация минералов примесей в сиве (у) от времени воздействия ультразвуком (х): - $\alpha_{11} = 27\%$; - $\alpha_{12} = 22\%$	$y = 10.2 \ln(1.5x + 1)$; $y = 12 \ln(1.5x + 1)$	Рост величины резонансного эффекта, ξ . Извлечение Fe-содержащих примесей из ЦСП от напряженности магнитного поля сепаратора при различных классах крупности: ЦСП Шиваруйского мест-я $\xi_1 = 88.1\%$, $\xi_2 = 93.9\%$, $\xi_3 = 95.2\%$, $\xi_4 = 97.8\%$; Талан-Гозарского мест-я $\xi_1 = 92.8\%$, $\xi_2 = 91.1\%$, $\xi_3 = 97.5\%$, $\xi_4 = 99.3\%$	$y = 4.4x - 1.34$ ЦСП Шиваруйского месторождения: 1. $y = 1.1389 \ln(x) + 79.972$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$); 2. $y = 6.578 \ln(x) + 46.074$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$); 3. $y = 4.1735 \ln(x) + 64.602$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$); 4. $y = 2.259 \ln(x) + 81.372$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$); ЦСП Талан-Гозарского месторождения: 1. $y = 3.20509 \ln(x) + 69.925$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$); 2. $y = 5E-06x^2 - 0.0101x + 98.145$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$); 3. $y = 1.477 \ln(x) + 86.79$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$); 4. $y = 0.5585 \ln(x) + 95.244$ ($кг \cdot м^{-3} \cdot с^{-1}$);	Рост величины резонансного эффекта, ξ . Извлечение Fe-содержащих примесей из ЦСП от напряженности магнитного поля сепаратора при различных классах крупности: 1. $y = 6.6935 \ln(x) + 45.655$ (класс крупности $-1+0.5$ мм); 2. $y = 4.518 \ln(x) + 62.845$ (класс крупности $-0.5+0.3$ мм); 3. $y = 95.8\%$, $\xi_4 = 98.3\%$, T-Г мест. $\xi_1 = 92.9\%$, $\xi_2 = 94.4\%$, $\xi_3 = 97.8\%$, $\xi_4 = 99.5\%$ ЦСП Талан-Гозарского месторождения: 1. $y = 2.5232 \ln(x) + 74.864$ (класс крупности $-2+1$ мм); 2. $y = 4E-06x^2 - 0.0078x + 97.451$ (класс крупности $-1+0.5$ мм); 3. $y = 1.0241 \ln(x) + 90.491$ (класс крупности $-0.5+0.3$ мм); 4. $y = 0.5616 \ln(x) + 95.356$ (класс крупности $-0.3+0.1$ мм).	Зависимость извлечения от крупности минеральных частиц при изменении ЦСП раскрытия минералов цеолита. Изменение: всей измельченной породы; цеолита, $f = 38\%$; шабазита, $f = 46\%$. Изменение с предварительной обработкой ускоренными электронами: всей измельченной породы; цеолита, $f = 54\%$; шабазита, $f = 62\%$.	Изменение без обработки ускоренными электронами: ЦСП Шив. мест-я: $y = 148.49e^{-0.04x}$ (крупность измельченной породы); $y = 82.097e^{-0.06x}$ (крупность цеолита в измельченной породе); ЦСП Т-Г мест-я: $y = 100.62e^{-0.026x}$ (крупность измельченной породы); $y = 75.204e^{-0.115x}$ (крупность цеолита в измельченной породе). Изменение с обработкой ускоренными электронами: ЦСП Шив. мест-я: $y = 0.0025x^2 - 0.9723x + 98.348$ (крупность измельченной породы); 2. $y = 0.0245x^2 - 3.1188x + 101$ (крупность цеолита в измельченной породе); ЦСП Т-Г мест-я: $y = 0.0029x^2 - 1.0553x + 98.193$ (крупность измельченной породы); 4. $y = 0.0281x^2 - 3.3387x + 100.31$ (крупность цеолита в измельченной породе)	
Концентрация минералов примесей в декантанном сиве (у) от частоты ультразвука (х): - $\alpha_{11} = 29\%$; - $\alpha_{12} = 27\%$	$y = -0.000048(x-44)^4$; $y = -0.000045(x-44)^4$						
Содержание минералов цеолита (у) от крупности сырья (х) после обработки ультразвуком при частоте 40 кГц: - $\beta_{11} = 45\%$; - $\beta_{12} = 51\%$	$y = -13.34 \ln(x) + 19.745$; $y = -11.50 \ln(x) + 10.625$						

Альтернативные варианты технологий переработки ЦСП (Патенты РФ: № 2455073, № 2229342, № 2278737)

Магнитная сепарация		Электроэлектрическая сепарация		Технологии химической модификации ЦСП		Моделирование технологических процессов обогащения ЦСП Восточного Забайкалья на базе сепарационных характеристик с целью разработки и выбора оптимальных технологических схем. Моделирование оборудования для извлечения железосодержащих примесей (Патент № 2278737). Моделирование технологических процессов химической модификации ЦСП.
Технологические показатели	Эмпирические зависимости	Технологические показатели	Эмпирические зависимости	Технологические показатели	Эмпирические зависимости	
Извлечение примесей Fe из ЦСП от крупности пород: - обогат; - мощные наносекундные электромагнитные импульсы; - ускоренные электроны	ЦСП Шив. мест-я: $y = -3.755 \ln(x) + 94.345$; ЦСП Т-Г мест-я: $y = -4.517 \ln(x) + 91.84$; ЦСП Шив. мест-я: $y = -3.57 \ln(x) + 94.9$; ЦСП Т-Г мест-я: $y = -4.779 \ln(x) + 92.361$; ЦСП Шив. мест-я: $y = -3.647 \ln(x) + 95.077$; ЦСП Т-Г мест-я: $y = -4.74 \ln(x) + 92.898$; ЦСП Шив. мест-я: $y = -3.647 \ln(x) + 95.077$; ЦСП Т-Г мест-я: $y = -4.74 \ln(x) + 92.898$	Извлечение цеолита в электропроводную фракцию (у) от крупности материала (х) и наличия подготовительной операции, %; - с использованием подогрева-электризации: $\beta_{11} = 99.8\%$; $\beta_{12} = 99.5\%$; - без использования подогрева-электризации: $\beta_{11} = 64.5\%$; $\beta_{12} = 75\%$	$y = -3169.6x^2 + 555.54x + 72.679$; $y = -3705.4x^2 + 594.82x + 71.679$; $y = 6160.7x^2 - 117.5x + 41.786$; $y = 3839.3x^2 - 163.21x - 38.929$	Разделение растворов H ₂ SO ₄ Степень разделения микросива (у) от продолжительности обработки раствором H ₂ SO ₄ (х): $D_{11} = 17.5\%$; $D_{12} = 13\%$; $D_{13} = 7.8\%$ Деалюминирование серной кислотой Извлечение Al ₂ O ₃ (у) от температуры обжига: $\alpha_{11} = 86.52\%$; $\alpha_{12} = 99.11\%$; $\alpha_{13} = 98.75\%$ Извлечение Fe ₂ O ₃ (у) от температуры обжига: $\alpha_{11} = 99.15\%$; $\alpha_{12} = 99.05\%$; $\alpha_{13} = 99.33\%$	$y = -0.0041x^2 - 0.471x + 0.191$ (микросива ЦСП Шиваруйского месторождения); $y = -0.026x^2 - 0.348x + 0.074$ (микросива ЦСП Хойнского месторождения); $y = -0.0020x^2 - 0.265x + 0.0072$ (микросива ЦСП Балдинского месторождения) $y = 39.957 \ln(x) - 193.35$ (ЦСП Балдинского мест-я); $y = 40.68 \ln(x) - 186.28$ (ЦСП Шиваруйского мест-я); $y = 36.944 \ln(x) - 160.2$ (ЦСП Хойнского мест-я) $y = -0.0163x + 105.01$ (ЦСП Балдинского мест-я); $y = -0.0163x + 105.01$ (ЦСП Шиваруйского мест-я); $y = -0.0095x + 101.45$ (ЦСП Хойнского мест-я)	

Отходы переработки ЦСП. Альтернативные варианты технологий обезвреживания сточных вод, рекультивации (захоронения) техногенных отходов, очистки дымовых газов

Технологии очистки сточных вод		Технологии рекультивации (консервации) хвостохранилищ (Патент РФ № 2513468)		Очистка отходящих газов от SO ₂ с применением природных цеолитов. Очистка сточных вод. Биоремедиация хвостохранилищ. Очистка питьевой воды. Регенерация цеолитов. Утилизация противобледенительных жидкостей. Захоронение токсичных и радиоактивных отходов (Патенты РФ № 2513468, № 2515578, № 2393310)	Способы утилизации отходов переработки ЦСП: закладка выработанных пространств; строительство зданий и сооружений; отсыпка автомобильных дорог, обочин дорог, промплощадок, складов ГСМ, сточных вод для транспорта; строительство насыпей ж/д дорог. Санация, восстановление почв.
Технологические показатели	Эмпирические зависимости	Технологические показатели	Эмпирические зависимости		
Извлечение радиоизотопов цезия и стронция, очистка от нефтепродуктов		Средняя скорость отрастания многолетних трав (у) от содержания цеолита в породах (х), используемых в качестве добавки к грунту (при применении реагента ПАА-ГС), мм/сут: 1- $V_{11} = 4.4$; 2- $V_{12} = 4.35$; 3- $V_{13} = 4.32$; 4- $V_{14} = 4.29$	$y = 0.0582x^2 - 0.6067$; $y = 0.00004x^2 - 0.0599x - 0.1534$; $y = 0.0003x^2 - 0.265x + 0.0072$; $y = -0.0020x^2 + 0.265x + 0.0072$		
Коэффициент распределения (K _d) ¹³⁷ Cs от концентрации ионов Na ⁺ в растворе на различных сорбентах: (K _d) _{137Cs} = 1.0E+0.21% (ЦСП Балдинского мест-я); (K_d)_{137Cs} = 1.0E+0.21% (ЦСП Талан-Гозарского мест-я)}}	$y = 1639x^{-0.838}$; $y = 217.96x$	Средняя скорость отрастания многолетних трав (у) от содержания цеолита в породах (х), используемых в качестве добавки к грунту (при применении лигнина) 1- $V_{11} = 4.37$; 2- $V_{12} = 4.34$; 3- $V_{13} = 4.29$; 4- $V_{14} = 4.28$	$y = 0.0005x^2 - 0.0129x + 0.8788$; $y = 0.0004x^2 - 0.0035x + 0.7835$; $y = 0.00002x^2 + 0.0429x - 0.2526$; $y = 0.00007x^2 - 0.057x - 0.5874$		
Коэффициент распределения (K _d) ¹³⁷ Cs (у) от среднего размера гранулы (d ₅₀) (х)	$y = 114.9x^2 - 74.455x - 202.91$	Средняя скорость отрастания многолетних трав (у) от содержания цеолита в породах (х), используемых в качестве добавки к грунту (при применении реагента Праваста 2540): 1- $V_{11} = 4.37$; 2- $V_{12} = 4.33$; 3- $V_{13} = 4.27$; 4- $V_{14} = 4.26$	$y = 0.0005x^2 - 0.0151x + 0.9363$; $y = 0.0003x^2 - 0.024x - 0.5880$; $y = 0.00005x^2 - 0.0377x - 0.0511$; $y = 0.00009x^2 - 0.0601x - 0.6589$		
Изогерма адсорбции (от относительного давления)	$y = 259.24x^2 - 280.52x + 93.435x + 3.5176$; $y = 265.01x^2 - 295.76x + 96.105x + 3.2648$	Содержание класса крупности частицы пыли 0,071-0,25 мм при скорости ветра 3-5 м/с от расстояния палеуноса от источника пыления: - без обработки ПАА-ГС; - с обработкой ПАА-ГС	$y = 17.555e^{-0.024x}$; $y = 27.058e^{-0.017x}$		
Изогерма адсорбции (от относительного давления)	$y = 114.9x^2 - 74.455x - 202.91$				
Площадь поверхности ЦСП (методом БЭТ)	$y = 0.1213x - 0.0004$				
Площадь поверхности ЦСП по Ленгмюру	$y = 0.0837x - 0.139$				
Абсорбция от толщины сорбционной поверхности	$y = 19.792x^2 + 2.1322$				
Объем адсорбционных пор по методу ВПН (изотерма адсорбции)	$y = 2 \cdot 10^{-10} x^2 - 1 \cdot 10^{-10} x^2 + 3 \cdot 10^{-10} x^2 - 0.0002x - 0.0082x - 0.0064$				
Объем адсорбционных пор по методу ВПН (изотерма адсорбции)	$y = 2 \cdot 10^{-10} x^2 - 0.0027x^2 - 0.1433x^2 + 2.758x - 5.3722$				
Коэффициент распределения K _d ¹³⁷ Cs от концентрации ионов Ca ²⁺ в растворе на различных сорбентах, см ² /г: K _d ¹³⁷ Ca} = 1800 (ЦСП Балдинского мест-я); K _d ¹³⁷ Ca} = 340 (ЦСП Хойнского мест-я); K _d ¹³⁷ Ca} = 510 (ЦСП Шиваруйского мест-я); K _d ¹³⁷ Ca} = 170 (ЦСП Талан-Гозарского мест-я)	$y = 2155.1x^{-1.15}$; $y = 867.43x^{-1.09}$; $y = 1122.6x^{-0.95}$; $y = 238.6x^{-0.96}$				
Извлечение нефтепродуктов					
Нефтеемкость - C (M _c - масса цеолита, г; M и m - масса цеолита с матулом, г)	$C = \frac{M_c}{M} * 100\%$				
Влагоемкость - W (M _c - масса сырого сорбента, г; M - масса сухого сорбента, г)	$W = \frac{M_c - M}{M} * 100\%$				

Целевой ориентир: рациональное и комплексное использование цеолитсодержащих пород (экологическая безопасность)

Рисунок 24 – Результаты реализации Концепции управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования ЦСП Восточного Забайкалья

Заключение

В диссертации на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований изложены научно обоснованные технические и технологические решения по рациональному и комплексному использованию цеолитсодержащих пород, базирующиеся на наилучших доступных технологиях их обогащения, переработки и модификации, для управления горнопромышленными отходами, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Разработана Концепция управления горнопромышленными отходами на основе рационального и комплексного использования ЦСП Восточного Забайкалья, основанная на изучении вещественного состава, физических и физико-химических свойств пород, использовании направленных видов воздействия при рудоподготовке, с последующей магнитной и электростатической сепарацией с целью получения высококачественных цеолитовых продуктов для применения в различных отраслях промышленности и снижения негативного влияния техногенного сырья на окружающую среду.

2. Впервые с применением метода визуализации и рендеринга виртуальных трехмерных молекулярных моделей получены модели минерала клиноптилолита Холинского месторождения в проекциях X, Y и Z, позволяющие определить его основные сорбционные характеристики: удельная поверхность $1096,31 \text{ м}^2/\text{г}$ ($1916,34 \text{ м}^2/\text{см}^3$), параметры ячейки: $a - 17,5230 \text{ \AA}$, $b - 17,6440 \text{ \AA}$, $c - 7,4010 \text{ \AA}$, объем – $2054,8 \text{ \AA}^3$, максимальный диаметр сферической молекулы для адсорбции в порах – $5,97 \text{ \AA}$, и характеризующие параметры молекул, способных адсорбироваться на цеолите.

3. Разработана стратегия повышения эффективности и конкурентоспособности горных предприятий на основе наилучших доступных технологий рудоподготовки, обогащения и модификации, обезвреживания сточных вод, рекультивации и захоронения техногенных отходов, очистки отходящих дымовых газов.

4. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что применение акустической обработки в стадии рудоподготовки ЦСП при частоте волн 40 кГц повышает эффективность отделения вмещающих примесей от минералов цеолита за счет звукокапиллярного и диспергирующего эффектов, а также увеличивает показатель магнитной восприимчивости содержащегося в них гематита до $215-220 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ за счет удаления пленок оксидов железа и частиц тонкодисперсного монтмориллонита с его поверхности.

5. Выявлено, что применение к ЦСП направленных воздействий (обжиг, МЭМИ, ускоренные электроны) в значительной степени повышает эффективность электромагнитной сепарации за счет увеличения в породах доли крупнокристаллического гематита и повышения значений его магнитной восприимчивости до $520-690 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Такое сочетание процессов воздействия

на сырье позволяет получать цеолитовую продукцию с содержанием примесей железа 0,08–2,09 %.

6. Впервые установлена закономерность увеличения коэффициента раскрытия (по минералам клиноптилолит и шабазит) в результате применения к цеолитсодержащим породам воздействия ускоренными электронами в качестве операции рудоподготовки в диапазоне невысоких доз облучения (от 2 до 4 кГр) для клиноптилолита Шивыртуйского месторождения с 38 до 54 %, для шабазита Талан-Гозагорского месторождения с 46 до 62 %, обусловленная направленной селективной дезинтеграцией по границам срастания зерен минералов за счет образования дефектов, трещин и микротрещин, вызванных создаваемым внутренним напряжением.

7. Доказано, что использование для контрастного заряжения поверхности тонкодисперсных ЦСП операции обработки парами салициловой кислоты с концентрацией $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ кг/см³ в течение 30–60 мин с подогревом до 80–100 °С обеспечивает содержание цеолитов в концентрате до 99,88 % за счет повышения эффективности применения электростатической сепарации.

8. Разработаны патентозащищенные технологии обогащения ЦСП, построенные на основе рационального сочетания технологических операций направленных воздействий (акустическая, ускоренные электроны, мощные электромагнитные импульсы, химическая модификация, обжиг) с традиционными методами обогащения (магнитная и электрическая сепарация), позволяющими получать высококачественную минеральную продукцию с содержанием цеолитов до 99,8 %.

9. Выявлено, что применение комбинирования методов направленной рудоподготовки ЦСП с электромагнитной и электростатической сепарациями обеспечивает их глубокую очистку от вмещающих примесей, что обуславливает повышение их сорбционной емкости на 24–26 % и определяет широкие возможности использования цеолитов высокого качества в технологиях управления горнопромышленными отходами.

10. Впервые установлено, что получение модифицированных в необходимом направлении цеолитовых продуктов достигается сочетанием традиционных методов обогащения с кислотным dealюминированием, обеспечивающим удаление оксидов алюминия, кремния, кальция, магния и железа с увеличением диаметра входных окон цеолитов до 0,6–0,75 нм, а также повышением значений их адсорбционной емкости на 4–13 % и модуля Si/Al (до 19,85–32).

11. Выявлено, что эффективное использование цеолитов для очистки сточных и оборотных вод от радионуклидов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs до установленных предельно допустимых концентраций (7 мг/л) определяется применением к ЦСП технологий обогащения и модификации, обеспечивающих существенное повышение показателя их адсорбционной емкости. Наиболее высокой сорбционной способностью и селективностью при этом обладают обогащенные ЦСП Талан-Гозагорского месторождения. Наилучшими сорбционными

характеристиками по отношению к ^{90}Sr ($K_d \text{ } ^{90}\text{Sr} = 1800 \text{ см}^3/\text{г}$) обладают обогащенные ЦСП Бадинского месторождения.

12. Установлено, что разработанные технологии обогащения позволяют получать цеолитовую продукцию, обладающую достаточно высокой нефтеемкостью по сравнению с необогащенными ЦСП, что обуславливается повышением их сорбционной способности за счет удаления вмещающих примесей. Наилучшими показателями по нефтеемкости обладают обогащенные ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений крупностью $-1+0,5$ мм.

13. Разработаны патентозащищенные технологии рекультивации хвостохранилищ и захоронения токсичных и радиоактивных отходов, позволяющие существенно уменьшить пыление техногенных образований и исключить возможность миграции токсичных и радиоактивных компонентов в почву, подземные воды и атмосферу за счет применения ЦСП.

14. Установлено, что эффективность очистки цеолитсодержащим породами Восточного Забайкалья отходящих дымовых газов от диоксида серы составляет 90–95 %.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Монографии

1. Хатькова, А. Н. Рациональные технологии переработки цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья: монография / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин**. – Чита: ЗабГУ, 2012. – 274 с.

2. **Размахнин, К. К.** Современные технологии переработки и модификации цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья: монография / К. К. Размахнин, А. Н. Хатькова. – Чита: ЗабГУ, 2014. – 309 с.

Издания WoS и Scopus

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

4. Мязин, В. П. Комплексная переработка золошлаковых отходов тепловых электростанций Восточного Забайкалья / В. П. Мязин, Л. В. Шумилова, **К. К. Размахнин**, С. А. Багидаев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 5. – С. 159–173.

5. **Razmakhnin, K. K.** Geocological aspects of processing zeolite-containing rocks in Eastern Transbaikalia / K. K. Razmakhnin, A. N. Khatkova, Y. Y. Blinovskaya // Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 262. – P. 012055.

6. Khatkova, A. N. Role of mineralogical and technological evaluation in development of processing technologies for zeolitecontaining rocks. Challenges for

Development in Mining Science and Mining Industry / A. N. Khatkova, **К. К. Razmakhnin** // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 262. – P. 1–3.

7. **Razmakhnin, К. К.** Modern techniques to process Eastern Transbaikalia zeolite-bearing rock / К. К. Razmakhnin, A. N. Khatkova // Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 262. – P. 012056.

8. Milyutin, V. V. Natural Zeolites of Eastern Transbaikalia in Technologies for Mining Enterprises Wastewater Treatment / V. V Milyutin, **К. К. Razmakhnin**, A. N. Khatkova, N. A. Nekrasova // Journal of Environmental Research, Engineering and Management. 2020. – Vol. 76, No. 3. – P. 62–70.

9. Бондарев, А. В. Классификация минерального фармацевтического сырья / А. В. Бондарев, Е. Т. Жиликова, **К. К. Размахнин** // Гармонизация подходов к фармацевтической разработке: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Москва: МГУ, 2020. – С. 109–110.

10. Хатькова, А. Н. Обогащение и модификация свойств цеолитсодержащих пород с целью расширения областей их практического применения / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин**, Л. В. Шумилова, В. Г. Черкасов, И. Б. Размахнина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3–2. – С. 153–163.

11. **Размахнин, К. К.** Обоснование и разработка технологий обогащения и модификации цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья / К. К. Размахнин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 3. – С. 148–157.

12. **Razmakhnin, К. К.** East Transbaikal zeolite production: Potential and integrated Ecological safety / К. К. Razmakhnin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – No. 2021. – P. 012033.

13. **Razmakhnin, К. К.** On the question of using natural zeolites to increase the environmental safety of mining regions / К. К. Razmakhnin // Mining Sciences and Mineral Field Development: Challenges and Solutions. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 991. – P. 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012039.

Издания ВАК

14. Мязин, В. П. Исследование на обогатимость шабазитсодержащих базальтов Талан-Гозагорского месторождения / В. П. Мязин, А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 11. – С. 198–199.

15. **Размахнин, К. К.** Характеристика вещественного состава и технолого-минералогические характеристики цеолитсодержащих туфов Восточного Забайкалья / К. К. Размахнин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – Вып. 4. – С. 315–328.

16. **Размахнин, К. К.** Разработка и обоснование схем переработки цеолитсодержащего сырья на основе применения направленных и

ультразвуковых воздействий / К. К. Размахнин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – Вып. 4. – С. 437–446.

17. Чукалкин, Б. Д. Проблема использования отвалов забалансовых руд на Шерловогорском месторождении (Восточное Забайкалье) / Б. Д. Чукалкин, **К. К. Размахнин** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Вып. «Забайкалье». – С. 315–319.

18. **Размахнин, К. К.** Модификация свойств цеолитов с целью расширения областей их применения / К. К. Размахнин, А. Н. Хатькова / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Вып. 4. – С. 246–252.

19. **Размахнин, К. К.** Организация ресурсосберегающих технологий добычи и переработки цеолитсодержащего сырья и оценка перспектив его использования для извлечения алюминия / К. К. Размахнин, А. Н. Хатькова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Вып. 5. – С. 145–146.

20. **Размахнин, К. К.** Сырьевая база и технологии переработки цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья / К. К. Размахнин // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2011. – Вып. 1. – С. 7–10.

21. Хатькова, А. Н. Перспективы использования модифицированных цеолитсодержащих пород основных месторождений Забайкалья / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Вестник Читинского государственного университета. – 2011. – № 3. – С. 119–124.

22. **Размахнин, К. К.** Влияние механоактивации на процесс интенсификации извлечения алюминия из цеолитсодержащих пород / К. К. Размахнин, А. Н. Хатькова, Н. Н. Бурнашова // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 4. – С. 65–67.

23. Хатькова, А. Н. Возможность извлечения алюминия из цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин**, В. Н. Емельянов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 95–100.

24. Хатькова, А. Н. Изучение эффективности влияния ускоренных электронов на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья / А. Н. Хатькова, В. И. Ростовцев, **К. К. Размахнин**, В. Н. Емельянов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 2. – С. 85–92.

25. Хатькова, А. Н. Оценка возможности комплексной переработки цеолитсодержащего сырья / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 6. – С. 48–49.

26. Хатькова, А. Н. Цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья: новые технологии переработки / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. – 2016. – № 1. – С. 30–33.

27. Хатькова, А. Н. Минералого-технологическая оценка цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья как основа для создания

эффективных технологий их переработки / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 10. – С. 33–36.

28. Трубачев, А. И. Научно-практические результаты геолого-минералогического и технологического изучения природного и техногенного минерального сырья Восточного Забайкалья / А. И. Трубачев, А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. – 2019. – № 3. – С. 51–55.

29. Шумилова, Л. В. Стратегии рационального и комплексного использования минерального сырья на основе наилучших доступных технологий и оценки жизненного цикла отходов горного производства / Л. В. Шумилова, А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин**, В. Г. Черкасов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 32–44.

Патенты

30. Патент № 2229342 Российская Федерация. Способ обогащения цеолитсодержащих туфов: опубл. 02.07.2002 / А. Н. Хатькова, В. П. Мязин, Е. А. Никонов, **К. К. Размахнин**; заявитель ЧитГТУ. – 6 с.

31. Патент № 2278737 Российская Федерация. Устройство для обогащения магнитосодержащего сырья: опубл. 27.06.2006 / **Размахнин К. К.**, Мязин В. П. заявитель ЧитГУ. – 5 с.

32. Патент № 2393310 Российская Федерация. Способ сноса и захоронения зданий, загрязненными токсичными и отравляющими веществами, и поточная линия для его осуществления: опубл. 27.06.2010 / Мязин В. П., Шестернев Д. М., **Размахнин К. К.**, Олевский И. Л., Мязин А. В.; заявитель ЧитГУ. – 6 с.

33. Патент № 2455073 Российская Федерация. Способ обогащения цеолитсодержащего сырья: опубл. 10.07.2012 / **Размахнин К. К.**, Хатькова А. Н.; заявитель ЗабГУ. – 6 с.

34. Патент № 2515578 Российская Федерация. Способ захоронения токсичных и радиоактивных отходов: опубл. 10.05.2014 / Мязин В. П., **Размахнин К. К.**; заявитель ЗабГУ. – 5 с.

35 Патент № 2513468 Российская Федерация. Способ рекультивации хвостохранилищ: опубл. 20.04.2014 / Мязин В. П., Шекиладзе В. Т., Шильникова Т. Л., **Размахнин К. К.**; заявитель ЗабГУ. – 7 с.

Прочие издания

36. Мязин, В. П. Оценка возможности обогащения шабазитсодержащих базальтов Восточного Забайкалья / В. П. Мязин, А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья: сб. ст. – Чита, 2002. – С. 131–134.

37. **Размахнин, К. К.** Разработка технологии комплексной переработки цеолитсодержащего сырья Восточного Забайкалья / К. К. Размахнин, А. Н. Хатькова // Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения – 2010). – Казань, 2010. – С. 365–368.

38. Размахнин, К. К. Перспективы применения природных цеолитов Забайкалья / **К. К. Размахнин** // VI Всероссийская цеолитная конференция с международным участием: сборник материалов. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. – С. 124–125.

39. Перспективы модифицированных природных цеолитов Восточного Забайкалья / **К. К. Размахнин** // Сорбенты как фактор качества жизни и здоровья: материалы IV Междунар. науч. конф. – Белгород: ИД «Белгород», 2012. – С. 143–148.

40. Хатькова, А. Н. Исследование параметров извлечения алюминия из цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья. / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Новые технологии в науке о Земле и горном деле: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Нальчик: КБУ, 2012. – С. 185–191.

41. Хатькова, А. Н. Технологические особенности химической переработки цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин** // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья: сб. ст. – Томск, 2013. – С. 286–289.

42. Хатькова, А. Н. Применение физико-химических методов при переработке цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья / А. Н. Хатькова, **К. К. Размахнин**, В. Н. Емельянов // Вестник РАЕН. – 2013. – Т. 13, вып. 6. – С. 106–110.

43. **Размахнин, К. К.** Переработка природных цеолитов, используемых в фильтрах ТЭС Забайкальского края / К. К. Размахнин // Экомониторинг. Экологическая эффективность. – 2014. – № 10. – С. 27–32.

44. Милютин, В. В. Методы очистки техногенных сточных и оборотных вод / В. В. Милютин, Б. Е. Рябчиков, **К. К. Размахнин**. – Чита: ЗабГУ, 2016. – 132 с.

45. Немчинова, Н. В. Комплексное устойчивое управление отходами. Металлургическая промышленность / Н. В. Немчинова, Л. В. Шумилова, С. П. Салхофер, **К. К. Размахнин**, О. А. Чернова. – Москва: ИД Академии Естествознания, 2016. – 494 с.

46. **Размахнин, К. К.** Роль минералого-технологической оценки при разработке технологий обогащения цеолитсодержащих пород / К. К. Размахнин, А. Н. Хатькова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 199–202.

47. **Размахнин, К. К.** Современные технологии переработки цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья / К. К. Размахнин, А. Н. Хатькова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5, № 2. – С. 196–201.

48. Литвиненко, В. Г. Природные цеолиты в технологиях обеспечения экологической безопасности горнопромышленных предприятий / В. Г. Литвиненко, **К. К. Размахнин** // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 157–162.

49. **Размахнин, К. К.** Природные цеолиты в наилучших доступных технологиях при обращении с отходами горного производства / К. К.

Размахнин, В. Г. Литвиненко, И. Б. Размахнина // Безопасность и ресурсосбережение в техносфере. – Краснодар: КубГТУ, 2021. – С. 336–340.

Остальные статьи (общим количеством 44) опубликованы в материалах международных, всероссийских, региональных конференций.

Подписано в печать 16.05.22.

Форм. бум. 60×84/16. Бумага ксерографическая.

Способ печати оперативный. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,6.

Заказ № _____. Тираж 150 экз.

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30