

**ПЕШКОВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ РУД И  
ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ОСВОЕНИИ  
МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА**

**Специальность 25.00.21 – Теоретические основы  
проектирования горнотехнических систем**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр Российской академии наук в Отделе теории проектирования освоения недр

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
**Рыльникова Марина Владимировна**  
главный научный сотрудник ИПКОН РАН

Официальные оппоненты:

**Кузьмин Евгений  
Викторович**

доктор технических наук, профессор, заместитель  
генерального директора ЗАО «Эльконский ГМК»

**Холобаев Евгений  
Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, профессор  
кафедры Разработки месторождений  
стратегических видов минерального сырья и  
маркшейдерского дела Федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего профессионального  
образования «Российский государственный  
геологоразведочный университет имени Серго  
Орджоникидзе»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Уральский государственный горный университет», 620144, Свердловская обл.,  
г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д.30.

Защита диссертации состоится «16» апреля 2014 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.074.02 при Институте проблем комплексного  
освоения недр Российской академии наук по адресу 111020, г. Москва, Е-20,  
Крюковский тупик, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте  
[www.ipkonran.ru](http://www.ipkonran.ru).

Автореферат разослан « » февраля 2014г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

И.В. Милетенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Важнейшим направлением повышения эффективности освоения рудных месторождений является рациональное использование природных и техногенных ресурсов. Быстрые темпы развития горной промышленности России привели к истощению богатых по содержанию балансовых запасов месторождений и к накоплению на поверхности Земли значительных объемов техногенного сырья, качественные характеристики которого часто сопоставимы с содержанием ценных компонентов в перспективных месторождениях. Так, за последние 50 лет содержание основных ценных компонентов в добываемой руде на медно-колчеданных месторождениях Южного Урала значительно снизилось. Содержания меди снизилось в 2,6 раз, цинка, золота и серебра, соответственно в 3,1, 2 и 1,5 раза. Доля труднообогатимых руд возросла с 15 до 40% общей массы перерабатываемого сырья. Среднее сквозное извлечение полезных компонентов остается в течении многих лет практически на одном уровне. Остаются в недрах и теряются при переработке более 50% полезных ископаемых. Причем, богатые по содержанию металлов крупные медно-колчеданные месторождения Южного Урала, такие как Учалинское, Сибайское, Гайское, Молодежное, Александринское, находятся в стадии доработки. При этом в результате отработки запасов и переработки руд медно-колчеданных месторождений Урала накоплено более 1,5 млрд.т. техногенного сырья, которое может быть рассмотрено как альтернативный источник получения меди, цинка, железа, других цветных, драгоценных и редких металлов. Кроме того, в регионе есть резервные медно-колчеданные месторождения, которые в настоящее время не вовлечены в эксплуатацию, ввиду низкого качества руд (Западно-Озерное), малых объемов балансовых запасов (Озерное), значительной глубины залегания рудных тел (Ново-Учалинское, месторождения Подольской группы).

Эффективно вовлечь данные запасы в разработку возможно лишь сочетанием физико-технической и физико-химической геотехнологий в полном цикле комплексного освоения месторождений с обоснованием требований к качеству вовлекаемого в эксплуатацию природного и техногенного минерального сырья. Однако, в настоящее время методика обоснования требования к качеству руд и техногенного сырья в полном цикле комплексного освоения месторождений отсутствует. Поэтому разработка нового методического подхода к обоснованию требований к качеству природного и техногенного минерального сырья при комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологии представляет весьма актуальную задачу.

**Целью** диссертационной работы является разработка методики определения требований к качеству медно-колчеданного сырья, вовлекаемого в эксплуатацию комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологией, обеспечивающей повышение полноты и комплексности освоения месторождений медно-колчеданных руд и сопутствующих техногенных образований.

**Идея работы** состоит в том, что повышение эффективности освоения медно-колчеданных месторождений и сопутствующих техногенных образований комбинированной геотехнологией обеспечивается путем дифференциации требований к качеству минерального сырья, вовлекаемого в эксплуатацию различными геотехнологиями в полном цикле комплексного освоения месторождений.

**Задачи исследований:**

- обобщение методик обоснования требования к качеству рудного и техногенного сырья, вовлекаемого в эксплуатацию физико-техническими и физико-химическими геотехнологиями;

- изучение влияния горно-геологических условий залегания и особенностей вещественного состава медно-колчеданного природного и техногенного сырья, способов его добычи и переработки, экономических факторов на требования к качеству вовлекаемых в разработку минеральных ресурсов;

- оценка требований к качеству природного и техногенного сырья по видам применяемых геотехнологий;

- разработка методики обоснования требований к качеству природного и техногенного сырья в полном цикле комплексного освоения рудного месторождения;

- разработка технологических рекомендаций по комплексному освоению месторождения «Ново-Учалинское» комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологией.

Для решения поставленных задач в качестве **объекта исследований** выбраны горнотехнические системы комплексного освоения месторождений медно-колчеданных руд этажно-камерной системой разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства и кучным выщелачиванием окомкованных хвостов обогащения руд.

**Методы исследований:**

В работе использован комплексный метод исследований, включающий обобщение и анализ отечественного опыта обоснования требований к качеству минерального сырья, геолого-минералогические исследования и химический анализ, опытно-промышленные испытания показателей геотехнологий, имитационное моделирование, экономико-математический анализ и технико-экономические расчеты с обработкой результатов исследований методами математической статистики.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. При проектировании полного цикла комплексного освоения медно-колчеданных месторождений величина минимального промышленного содержания металлов в добываемых запасах должна быть дифференцирована по видам применяемых физико-технических и физико-химических геотехнологий с учетом эффекта от утилизации техногенного сырья, образующегося при добыче и переработке руд.

2. В полном цикле комплексного освоения медно-колчеданных месторождений использование хвостов обогащения руд для закладки выработанного пространства позволяет снизить минимальное промышленное содержание в извлекаемых запасах на 8 – 14 % в зависимости от производственной мощности рудника, глубины ведения горных работ, среднего содержания металлов в руде; при этом извлечение физико-химической геотехнологией металлов из хвостов дополнительно снижает минимальное промышленное содержание металлов в руде до 26% в зависимости от цены металлов и уровня их извлечения из хвостов.

3. Включение в полный цикл комплексного освоения медно-колчеданных месторождений подсистемы формирования и эксплуатации техногенных образований целесообразно при содержании металлов в хвостах выше значения, определяемого показательной функцией  $\alpha_{min}^T = b \cdot k_1^{\alpha^H} \cdot k_2^{\Pi} \cdot k_3^{A_p} \cdot k_4^{\varepsilon_T}$ , где  $b$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$  – постоянные, установленные множественной регрессией;  $\alpha^H$  – среднее содержание условной меди в руде, %;  $\Pi$  – цена меди на бирже, тыс. у.е./т;  $A_p$  – производственная мощность подземного рудника по руде, млн. т/год;  $\varepsilon_T$  – извлечение меди из хвостов обогащения.

#### **Научная новизна работы:**

1. Методика обоснования требований к качеству добываемого сырья, отличающаяся учетом результатов взаимодействия физико-технических и физико-химических геотехнологий в полном цикле комплексного освоения месторождений многокомпонентных руд для совместного вовлечения в эксплуатацию природного и техногенного сырья.

2. Дифференциация минимально-промышленного содержания при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений по видам применяемых геотехнологий с учетом эффекта от утилизации техногенного сырья, образующегося при добыче и переработке руд.

3. Зависимости минимально-промышленного содержания металлов в извлекаемых запасах медно-колчеданных руд от глубины ведения горных работ, производственной мощности подземного рудника, содержания металлов в руде, стоимости металлов и уровня их извлечения из техногенного сырья.

**Достоверность научных положений, выводов и результатов** обеспечивается надежностью и представительностью исходных данных, сопоставимостью результатов экспериментальных лабораторных и опытно-промышленных исследований, обработанных методами математической статистики с использованием современного оборудования и апробированных методик.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке рекомендаций по обоснованию требований к качеству медно-колчеданного сырья, позволяющих определить условия вовлечения в разработку природного и техногенного сырья различного вещественного и качественного состава физико-техническими и физико-химическими геотехнологиями.

Результаты работы использованы при выполнении государственного контракта с Минобрнауки РФ №16.515.11.5065 (руководитель академик РАН К.Н. Трубецкой).

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (V, VI, VII, VIII, IX и X Международная научная школа молодых ученых и специалистов, Москва, 2008-2013 гг.), научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2009– 2014 гг.), «Комбинированная геотехнология: теория и практика реализации полного цикла комплексного освоения недр» (Магнитогорск, 2011 г.), 66 научно-технической конференции Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

#### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе в 4-х изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН «Техногенное преобразование недр Земли: развитие теоретических основ эффективного использования и сохранения георесурсов», а также гранта Президента РФ НШ №.2986.2008.5 для государственной поддержки ведущей научной школы России, возглавляемой академиком РАН К.Н. Трубецким.

#### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 106 наименований и представлена на 164 страницах, включая 44 рисунка, 15 таблиц и 39 формул.

Личный вклад автора состоит в обобщении опыта разработки медно-колчеданных месторождений, исследовании влияния качества сырья на показатели физико-технических и физико-химических геотехнологий, разработке методики обоснования требования к качеству природного и техногенного сырья при полном цикле комплексного освоения месторождений многокомпонентных руд. Автор принимал участие в проведении лабораторных и опытно-промышленных экспериментов по определению технико-экономических показателей кучного выщелачивания техногенного сырья Бурибаевского и Учалинского ГОКов.

**Автор выражает благодарность** научному руководителю - проф., д-ру техн. наук М.В. Рыльниковой, чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунову, доц., канд. техн. наук Д.Н. Радченко за помощь в работе над диссертацией и ценные советы, а также сотрудникам кафедры ПРМПИ МГТУ им. Г.И. Носова и руководству Бурибаевского и Учалинского горно-обогатительных комбинатов за помощь при проведении исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В современных условиях комплексное освоение недр предусматривает использование с максимальным эффектом всего ресурсного потенциала месторождений – богатых, рядовых и бедных руд, сопутствующих полезных ископаемых, техногенных образований прошлых лет, минерализованных вод, подземного пространства, а также текущих отходов добычи и переработки руд.

В этой связи, современным требованиям проектирования отвечает идея полного цикла комплексного освоения месторождений, предложенная и развиваемая в Отделе теории проектирования освоения недр ИПКОН РАН, включающего не только добычу и глубокую переработку руд, но и вовлечение в эксплуатацию техногенного сырья - бедных руд, складированных до настоящего времени в отвалах, хвостов обогащения и иного, с обязательной утилизацией отходов в выработанном пространстве карьеров и шахт.

Идея полного цикла предусматривает совокупное наличие двух неотъемлемых условий – это безотходное (малоотходное) использование всех вовлекаемых в ходе освоения участка недр георесурсов и извлечение их рациональным сочетанием технологических процессов и оборудования различных способов добычи /Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., 2008/. Причем, одно без другого либо невозможно, либо явно неэффективно при вовлечении в промышленную разработку всех запасов месторождения какой-либо одной геотехнологией. Горнотехническая система комплексного освоения месторождений руд в полном цикле включает технологические подсистемы по извлечению балансовых запасов месторождения физико-техническими геотехнологиями (открытой, подземной, открыто-подземной) и вовлечение в разработку бедных, ранее некондиционных руд и техногенного сырья физико-химическими геотехнологиями (скважинное, шахтное или кучное выщелачивание) с утилизацией отходов в выработанном пространстве.

Очевидно, что при проектировании полного цикла комплексного освоения месторождений комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологий требования к качеству потоков природного и техногенного сырья, вовлекаемого в эксплуатацию различными технологиями добычи, существенно отличаются. Так, при открытой разработке месторождений требования к минимальному промышленному содержанию полезного компонента в руде - одни, для подземной разработки – другие. При реализации физико-химической геотехнологии требования к качеству сырья зависят от различных факторов: способов выщелачивания – чановое, кучное, кюветное, скважинное, шахтное; места производства работ – в карьере или на поверхности, в подземной камере; структуры выщелачиваемого массива – неразрушенный массив, разрыхленная рудная масса, гранулированные или тонкодисперсные отходы обогащения; вида сырья - руда на месте залегания, складированная в отвалах, оставленная в закладке или потерянная в зоне обрушения, либо техногенное сырье горно-металлургического производства – шламы, хвосты обогащения руд: текущие,

лежалые, находящиеся в эксплуатируемых или законсервированных хвостохранилищах.

Существенный вклад в решение проблемы обоснования требований к качеству минерального сырья, неразрывно связанной с важнейшими проблемами комплексного освоения недр с обеспечением требуемого качества продукции горных предприятий, внесли академики М.И. Агошков, Н.В. Мельников, А.В. Сидоренко, К.Н. Трубецкой, член.-корр. РАН Д.Р. Каплунов, доктора наук Я.М. Адигамов, Г.Г. Ломоносов, Ф.Д. Ларичкин, Е.И. Панфилов, Е.П. Прокопьев, С.С. Резниченко, М.В. Рыльникова, В.Н. Уманец, С.А. Филиппов, В.А. Шестаков, Б.П. Юматов и другие известные ученые.

Проведенный анализ опыта разработки рудных месторождений, теории проектирования и практики добычи и переработки руд различного качества показал, что до настоящего времени нет единого подхода к дифференциации запасов по видам применяемых геотехнологий и сырья в единой горнотехнической системе комплексного освоения месторождений, отсутствуют методики определения требований к качеству техногенного медно-колчеданного сырья. Отсутствует опыт промышленной реализации комбинированных физико-технических и физико-химических геотехнологий применительно к разработке месторождений медно-колчеданных руд.

Как известно, на требования к качеству природного и техногенного сырья влияет большое количество факторов: глубина залегания руд, их качественный и вещественный состав, вид применяемых геотехнологий, товарная цена металлов, удельные капитальные и эксплуатационные затраты на добычу и переработку руд, производственная мощность рудника и другие.

Факторы, определяющие требования к качеству природного и техногенного сырья, разделены на три группы: геологические, экономические и технологические. Распределение запасов месторождения и формируемых в ходе их разработки минерально-сырьевых потоков по качественным и количественным характеристикам при полном цикле комплексного освоения месторождений следует производить с учетом промышленной ценности руд, отходов их добычи и переработки, применяемых технологий добычи и переработки руд, складирования и хранения техногенного сырья. В зависимости от вида сырья, его вещественного состава и способа образования для выбора геотехнологий разработки и эксплуатации руд и утилизации отходов минеральное сырье разделено на группы (табл.1):

- природное сырье, являющееся базовым для разработки рудных запасов месторождения;
- техногенное сырье, формируемое в ходе добычи и переработки руд;
- техногенные и природно-техногенные запасы сырья в техногенных образованиях прошлых лет или оставленные в недрах запасы после завершения эксплуатации рудных месторождений.



**Таблица 1 - Дифференциация требований к качеству природного и техногенного медно-колчеданного сырья в зависимости от вида применяемых геотехнологий**

Вид сырья	Группа	Условия вовлечения в эксплуатацию *	Вид геотехнологии	Характеристика минерального сырья
1	2	3	4	5
Природное сырье	Балансовые: кондиционное для физико-технической геотехнологии	$\alpha^P \geq \alpha_{min}^{PT}$ и $Q^P \geq Q_{min}^{PT}$	Открытая разработка	Руды с высоким и средним содержанием ценных компонентов
			Подземная разработка	Руды с высоким содержанием ценных компонентов и содержанием серы не более 35%
			Открыто-подземная разработка	Устойчивые руды в бортах и днище карьера с высоким и средним содержанием ценных компонентов
			Скважинная гидродобыча	Рыхлые, низкопрочные, слабосвязные, плотные глинистые и неустойчивые руды
	Балансовые: кондиционное для физико-химической геотехнологии	$\alpha_{min}^{PT} > \alpha^P \geq \alpha_{min}^{PX}$ и $Q^P \geq Q_{min}^{PX}$	Кучное выщелачивание	Руды с низким содержанием ценных компонентов, окисленные и другие некондиционные для физико-технической геотехнологии добытые в ходе разработки
			Скважинное выщелачивание	Трещиноватые и пористые руды с низким содержанием ценных компонентов, окисленные в бортах и днище карьера, выклинках рудных тел, изолированные рудные тела
Забалансовые	$\alpha^P < \alpha_{min}^{PX}$ , $\alpha^P < \alpha_{min}^{PT}$ , и/или $Q^P < Q_{min}^{PX}$ , $Q^P < Q_{min}^{PT}$	Не предусматривается	Руды с низким содержанием ценных компонентов, окисленные в бортах и днище карьера, изолированные рудные тела, камеры второй очереди	
Техногенное сырье	Кондиционное	$\alpha^T \geq \alpha_{min}^T$ и $Q^T \geq Q_{min}^T$	Выщелачивание	Отходы кондиционной фракции предконцентрации руд, текущие хвосты обогащения руд
				Поризованные хвосты обогащения руд размещенные в выработанном пространстве
	Временно некондиционное, но ценное в долгосрочной перспективе	$\alpha_{min}^T > \alpha^T \geq \alpha_{min}^{TP}$ и $Q^T \geq Q_{min}^{TP}$		Отходы кондиционной фракции предконцентрации руд, хвосты обогащения из затопленных и законсервированных хвостохранилищ
				Хвосты обогащения из затопленных и законсервированных хвостохранилищ
Некондиционное	$\alpha^T < \alpha_{min}^{TP}$ , и/или $Q^T < Q_{min}^{TP}$	Не предусматривается	Вскрышные породы и породы от проходки горных выработок, отходы сепарации, текущие и затопленные хвосты обогащения, отходы выщелачивания – руд, просыпи сепарации, окомкованных хвостов обогащения	
Техногенное сырье прошлых лет	Кондиционное	$\alpha^{ТПЛ} \geq \alpha_{min}^{ТПЛ}$ и $Q^{ТПЛ} \geq Q_{min}^{ТПЛ}$	Кучное и (или) подземное выщелачивание	Ранее некондиционные руды из отвалов, хвосты обогащения – затопленные, законсервированные и лежалые
	Некондиционное	$\alpha^{ТПЛ} < \alpha_{min}^{ТПЛ}$ и/или $Q^{ТПЛ} < Q_{min}^{ТПЛ}$	Не предусматривается	Отвалы породы, некондиционные руды из отвалов, хвосты обогащения – затопленные, законсервированные и лежалые

\* - условные обозначения в графе 3 табл.1:  $\alpha^P$ ,  $\alpha^T$ ,  $\alpha^{ТПЛ}$  – фактическое содержание условного металла, соответственно, в руде, текущих отходах и техногенных образованиях прошлых лет, %;  $\alpha_{min}^{PT}$ ,  $\alpha_{min}^{PX}$  – минимально-промышленное содержание условного металла, соответственно, для физико-технических и физико-химических геотехнологий, %;  $\alpha_{min}^T$ ,  $\alpha_{min}^{TP}$ ,  $\alpha_{min}^{ТПЛ}$  – минимальное содержание условного металла, соответственно, в техногенном сырье при его освоении в ближайшей перспективе, будущем и техногенных образованиях прошлых лет, %;  $Q^P$ ,  $Q^T$ ,  $Q^{ТПЛ}$  – объем минерального сырья, соответственно, в рудном массиве, текущих, образованиях прошлых лет, т;  $Q_{min}^{PT}$ ,  $Q_{min}^{PX}$  – требуемые минимальные объемы запасов руд, соответственно, для физико-технической и физико-химической геотехнологий, т;  $Q_{min}^T$ ,  $Q_{min}^{ТПЛ}$  – минимальные объемы техногенного сырья, соответственно, текущие и в образованиях прошлых лет, т.

В зависимости от вида сырья, его качественных и количественных характеристик, расчетными значениями минимально-промышленного содержания приведенного (условного) металла ( $\alpha_{min}$ ) и минимальных объемов запасов сырья ( $Q_{min}$ ) определяется предпочтительный вид геотехнологии. Условия вовлечения сырья в эксплуатацию той или иной геотехнологией, представлены в табл.1. Запасы руд разделены на балансовые для физико-технических геотехнологий; балансовые для физико-химических и забалансовые. Предпочтительное применение физико-технических геотехнологий для извлечения балансовых запасов богатых и рядовых руд объясняется тем, что они позволяют наиболее полно извлекать ценные компоненты из недр, а физико-химические технологии характеризуются меньшими эксплуатационными затратами и предпочтительны для эксплуатации бедных руд и техногенного сырья.

Расчет  $\alpha_{min}$  для вовлечения в разработку руд ( $\alpha_{min}^P$ ) физико-техническими и/или физико-химическими геотехнологиями производится, %:

$$\alpha_{min}^P = \frac{3_d + 3_n - П - П_T}{Ц \cdot \varepsilon \cdot (1 - P)} 100 \quad (1)$$

где  $3_d$ ,  $3_n$  – себестоимость добычи и переработки 1 т руды, руб./т; П – суммарная извлекаемая ценность попутных компонентов, не учтенных при определении условного металла, руб./т;  $П_T$  – прибыль от реализации товарной продукции, полученной при эксплуатации техногенного сырья, руб./т; Ц – цена основного металла, руб./т;  $\varepsilon$  – сквозное извлечение основного металла при переработке, доли ед.; P – разубоживание руд при добыче, доли ед.

При определении целесообразности промышленного освоения отдаленных участков месторождения, изолированных рудных тел или техногенных образований минимальные промышленные объемы запасов рассчитываются, т:

$$Q_{min} = \frac{3_{доп} \cdot P}{(Ц_n - 3_э) \cdot П} \quad (2)$$

где  $3_{доп}$  – дополнительные затраты, связанные со вскрытием, подготовкой и разработкой рудного массива или техногенного образования, руб.;  $Ц_n$  – извлекаемая ценность в расчете на 1 т добываемого природного или техногенного сырья, руб./т;  $3_э$  – эксплуатационные расходы на добычу и переработку сырья до конечной товарной продукции, руб./т; П – суммарные потери минерального сырья, доли ед.

Текущее техногенное сырье, образующееся при добыче и переработке руд, разделено на три группы: кондиционное; временно некондиционное, но ценное в долгосрочной перспективе и некондиционное. Минимальное содержание условного компонента для освоения техногенного образования ( $\alpha_{min}^T$ , %), рассчитывается, %:

$$\alpha_{min}^T = \frac{3_{\phi} + 3_p + 3_{пт}}{Ц \cdot \varepsilon^T \cdot (1 - K_{п})} 100, \quad (3)$$

где  $3_{\phi}$  и  $3_p$  – эксплуатационные затраты на формирование и разработку техногенного образования, соответственно, руб/т;  $3_{пт}$  – эксплуатационные затраты на переработку продуктивных растворов, полученных из техногенного сырья, руб/т;  $\varepsilon^T$  – сквозное извлечение основного металла при добыче и переработке, доли ед.;  $K_{п}$  – потеря качества сырья, происходящая в ходе формирования и разработки техногенного образования, доли ед.

Минимальное содержание условного компонента для освоения техногенного месторождения в будущем ( $\alpha_{min}^{ТП}$ , %):

$$\alpha_{min}^{ТП} = \frac{3_{\phi} + 3_p + 3_{пт}}{Ц \cdot \varepsilon^T \cdot (1 - K_{п} - P)} 100, \quad (4)$$

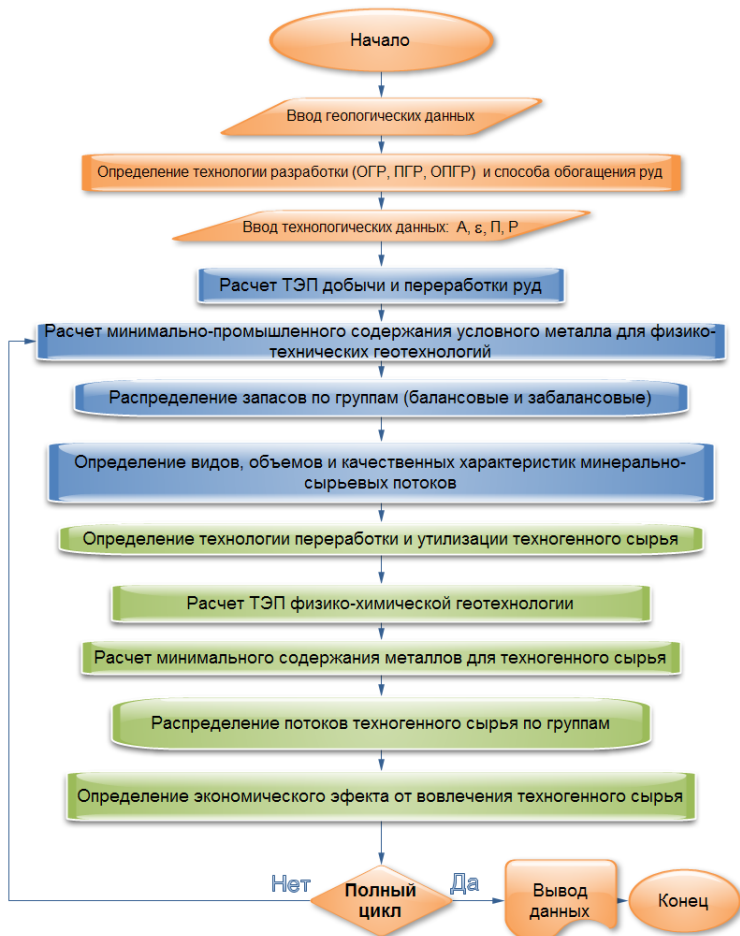
где  $3_{\phi}$  – эксплуатационные затраты на формирование техногенного образования и его поддержание в период консервации, руб/т;  $Ц$  – прогнозная цена 1 т основного металла на планируемый период, руб;  $K_{п}$  – потеря качества сырья, происходящая в ходе формирования, консервации и разработки техногенного образования, доли ед.

Техногенное сырье прошлых лет, в соответствии с условиями (табл.1), разделено на: кондиционное и некондиционное. Минимальное содержание условного компонента для освоения техногенных образований прошлых лет ( $\alpha_{min}^{ТПЛ}$ ) рассчитывается, %:

$$\alpha_{min}^{ТПЛ} = \frac{3_{д} + 3_{\phi} + 3_p + 3_{пт}}{Ц \cdot \varepsilon^T \cdot (1 - K_{п} - P)} 100 \quad (5)$$

На основе анализа опыта разработки медно-колчеданных месторождений Южного Урала, систематизации требований к качеству минерального сырья и в соответствии с современной концепцией комплексного освоения недр разработан алгоритм определения требований к качеству природного и техногенного сырья при комплексном освоении рудного месторождения в полном цикле (рис. 1).

Алгоритм регламентирует последовательность расчетов и операций и включает основные блоки: определение физико-технической геотехнологии разработки месторождения (открытой, подземной, открыто-подземной) и технологии обогащения руд; расчет технико-экономических показателей (ТЭП) добычи и переработки руд; расчет минимально-промышленного содержания условного металла для физико-технической геотехнологии и распределение запасов по группам (балансовые и забалансовые); определение видов, объемов и качественных характеристик минерально-сырьевых потоков; определение технологии переработки техногенного сырья; расчет ТЭП физико-химической геотехнологии; расчет минимального содержания металлов для техногенного сырья; распределение потоков техногенного сырья по группам.



**Рисунок 1** - Алгоритм определения требований к качеству природного и техногенного сырья при комплексном освоении рудного месторождения

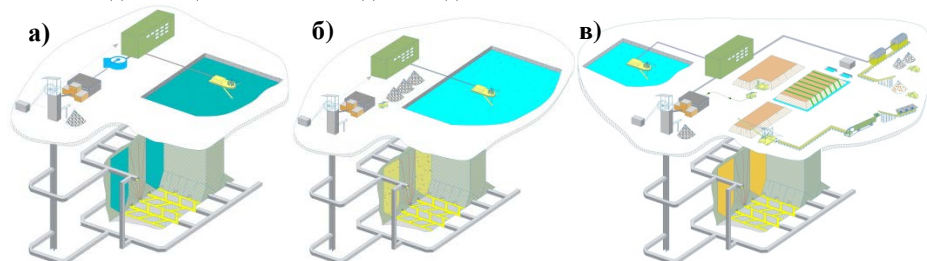
Для определения технико-экономических и технологических показателей физико-химической геотехнологии в условиях Бурибаевского ГОКа в 2007 г была проведена опытно-промышленная апробация технологии кучного сернокислотного выщелачивания текущих хвостов обогащения медно-колчеданных руд с предварительным окомкованием. Анализ результатов эксперимента позволил установить показатели извлечения металлов из техногенного сырья и зависимости себестоимости:

- подготовки сырья к выщелачиванию от влажности хвостов, производственной мощности комплекса окомкования и расхода вяжущего;
- выщелачивания от содержания меди в хвостах, производительности участка кучного выщелачивания, расхода серной кислоты, рабочего раствора, интенсификаторов и времени выщелачивания;

- переработки продуктивных растворов методом экстракции от содержания меди в продуктивном растворе, производительности цеха переработки растворов и расхода экстрагента.

Для установления закономерностей влияния геологических, экономических и технологических факторов на требования к качеству природного и техногенного сырья была разработана исследовательская геотехнологическая модель функционирования горнотехнической системы при комплексном освоении месторождения медно-колчеданных руд (рис.2) с изменяющимися горно-геологическими и горнотехническими характеристиками (табл.2). В модели рассматривалась отработка крутопадающего месторождения подземным способом этажно-камерной системой разработки с закладкой выработанного пространства. Моделирование производилось по трем сценариям развития завершающей стадии:

- А. Складирование отходов обогащения руд в хвостохранилище
- Б. Утилизация хвостов обогащения руд в выработанном пространстве подземных камер в виде закладочной смеси
- В. Кучное сернокислотное выщелачивание хвостов обогащения руд и утилизация отходов выщелачивания в виде закладочной смеси



**Рисунок 2** - Горнотехнические системы комплексного освоения месторождений медно-колчеданных руд

**Таблица 2** - Варьируемые при моделировании параметры

Геологические	Экономические	Технологические
<p>Содержание условной меди в руде - <math>\alpha^P = 0,5 \div 3,0\%</math>;                      глубина залегания рудного тела <math>H = 100 \div 800</math> м;                      крепость руд по шкале проф. М.М. Протодяконова <math>f = 8 \div 16</math>;                      объем техногенного сырья <math>Q_{хв} = f(A_p)</math>, млн. т/год;                      содержание условной меди в хвостах обогащения руд <math>\alpha^T = f(\alpha^P, \varepsilon_n)</math>, %</p>	<p>Биржевая цена на медь <math>C = 2,5 \div 8,0</math>, тыс. у. е./т;                      стоимость товарного концентрата <math>C_k = 0,5C</math>;                      затраты на добычу (<math>Z_d \approx 600 \div 1200</math>) и переработку руд (<math>Z_p \approx 450 \div 550</math>), руб./т;                      затраты на формирование штабеля (<math>Z_{\phi} \approx 50 \div 150</math>), выщелачивание (<math>Z_p \approx 50 \div 110</math>) и переработку продуктивных растворов (<math>Z_{пт} \approx 50 \div 110</math>), руб/т</p>	<p>Производственная мощность подземного рудника (<math>A_p = 0,5 \div 4,0</math>) и участка кучного выщелачивания (<math>A_{кв} \approx 0,4 \div 3,7</math>), млн. т/год ;                      извлечение условной меди в концентрат (<math>\varepsilon_n = 60 \div 93</math>), %;                      извлечением меди в продуктивный раствор (<math>\varepsilon_T = 45 \div 75</math>) и при его переработке (<math>\varepsilon_{гм} = 80 \div 95</math>), %;                      коэффициент потери качества техногенного сырья (<math>K_n = 1 \div 20</math>), %</p>

Анализ факторов, оказывающих влияние на минимально-промышленное содержание условной меди для условий подземной разработки месторождения, показал, что в наибольшей степени влияют: цена металлов, содержание условной

меди в руде, глубина залегания руд, производственная мощность рудника, извлечение меди из отходов обогащения.

Аппроксимацией результатов моделирования установлены зависимости минимально-промышленного содержания условной меди в руде при подземной разработке медно-колчеданных месторождений этажно-камерной системой разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства для сценариев:

$$- \text{А: } \alpha_{min}^P = 8,0001 \cdot 1,0003^H \cdot 0,8935^{\alpha^n} \cdot 0,8137^{\Pi} \cdot 0,9752^{A_p} \quad (6)$$

$$- \text{Б: } (\alpha_{min}^P)^{ЗХВ} = 7,0102 \cdot 1,0003^H \cdot 0,8934^{\alpha^n} \cdot 0,8137^{\Pi} \cdot 0,9759^{A_p} \quad (7)$$

$$- \text{В: } (\alpha_{min}^P)^{ПЦ} = 7,9351 \cdot 1,0003^H \cdot 0,89^{\alpha^n} \cdot 0,8072^{\Pi} \cdot 0,9691^{A_p} \cdot 0,9988^{\varepsilon_T} \quad (8)$$

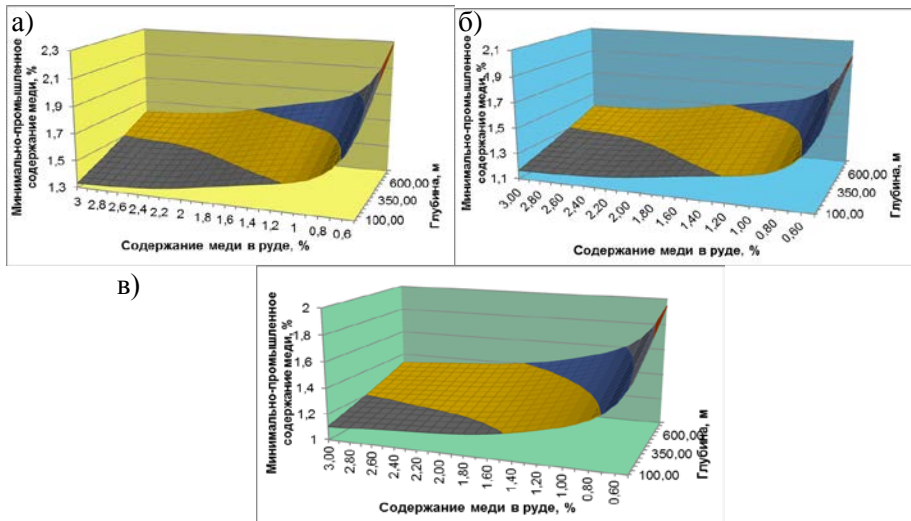
Минимальное содержание условной меди в хвостах обогащения руд при кучном сернокислотном выщелачивании от содержания условной меди в рудной массе, поступающей на обогатительную фабрику, цены меди, извлечения ее в продуктивный раствор и производственной мощности рудника:

$$\alpha_{min}^T = b \cdot k_1^{\alpha^n} \cdot k_2^{\Pi} \cdot k_3^{A_p} \cdot k_4^{\varepsilon_T} \quad (9)$$

где  $b=2,2361$ ,  $k_1=1,0469$ ,  $k_2=0,8141$ ,  $k_3=0,8884$  и  $k_4=0,9865$  – постоянные, установленные по данным моделирования множественной нелинейной регрессией.

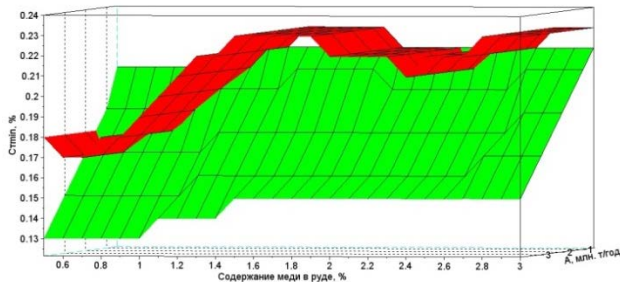
Например, при производственной мощности подземного рудника 2 млн.т/год, при исследовании влияния на  $\alpha_{min}^P$  геологических факторов и содержания условной меди в руде установлено, чем ниже среднее содержание меди в руде и больше глубина разработки, тем выше значение минимально-промышленное содержание условной меди (рис.3 – а, б, в). Аналогичные зависимости были получены при других значениях производственной мощности подземного рудника. Снижение  $\alpha_{min}^P$  при росте среднего содержания металлов в руде, поступающей на обогащение, объясняется увеличением процента извлечения металлов в концентрат. Увеличение значений  $\alpha_{min}^P$  с ростом глубины ведения горных работ обусловлено повышением себестоимости добычных работ. Сопоставимый анализ результатов моделирования (рис.3), показал, что использование хвостов обогащения руд для приготовления закладочной смеси позволяет снизить  $\alpha_{min}^P$  в среднем на 11% (рис.3-б) относительно базового сценария А (рис.3-а), а предварительное извлечение металлов из хвостов обогащения руд методом кучного выщелачивания обеспечивает дополнительное снижение этого показателя в среднем на 15% (рис.3-в).

Анализ данных моделирования показал, что изменение коэффициента крепости руд в пределах 8-16 оказывает незначительное влияние на  $\alpha_{min}^P$ , изменяя его не более, чем на 1,5-1,7%. Ввиду этого, при моделировании значение коэффициента крепости было принято равным 12. Наибольшее влияние из геологических факторов на  $\alpha_{min}^P$  оказывают содержание металлов в руде ( $\sigma \sim 18\%$ ) и глубина залегания ( $\sigma \sim 12,5\%$ ), где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение  $\alpha_{min}^P$  при изменении параметров в исследуемом интервале варьирования.



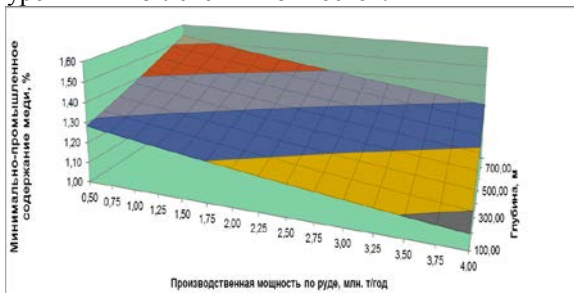
**Рисунок 3** - Зависимость минимально-промышленного содержания условной меди от ее среднего содержания и глубины залегания руд при производительности рудника 2 млн.т/год для сценариев: а – А; б – Б; в – В

На значение минимального содержания условной меди в хвостах обогащения руд ( $\alpha_{min}^T$ ) наибольшее влияние оказывает производственная мощность рудника ( $\sigma \sim 3\%$ ), а наименьшее - среднее содержание металлов в руде ( $\alpha^P$ ,  $\sigma \sim 0,95\%$ , рис. 4). При росте производственной мощности подземного рудника по руде,  $\alpha_{min}^T$  снижается, а при увеличении  $\alpha^P$  - растет. Точки, расположенные ниже пересечения красной поверхности ( $\alpha^T$ ) с зеленой ( $\alpha_{min}^T$ ) указывают на возможность реализации сценария «В», при котором экономически целесообразно доизвлечение металлов из хвостов обогащения руд методом выщелачивания. В этом случае  $\alpha_{min}^P$  снижается на 18,5 – 20% в зависимости от глубины ведения горных работ, причем чем больше глубина ведения горных работ, тем меньше тренд изменения  $\alpha_{min}^P$  (рис.5).



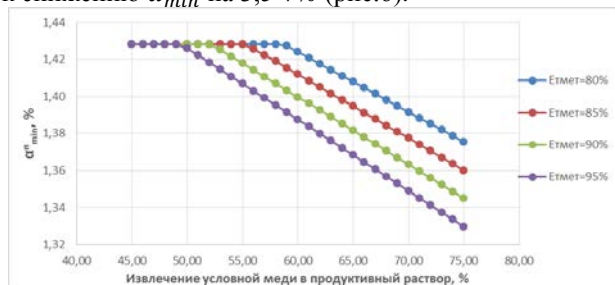
**Рисунок 4** - Зависимость минимального содержания условной меди в хвостах обогащения медно-колчеданных руд от содержания металлов в руде и производственной мощности рудника при цене меди 7355 у.е/т

Рост производственной мощности рудника на 0,5 млн.т/год позволяет снизить значение  $\alpha_{min}^P$  на 1,2-1,4 %. При производственной мощности рудника 4 млн. т в год использование хвостов обогащения руд для закладки выработанного пространства позволяет снизить  $\alpha_{min}^P$  на 14%. При этом извлечение физико-химической геотехнологией металлов из хвостов дополнительно снижает минимальное промышленное содержание металлов в руде на 26% в зависимости от цены металлов и уровня их извлечения из хвостов.



**Рисунок 5** - Зависимость минимального промышленного содержания условной меди в руде от производственной мощности рудника и глубины горных работ при ( $\alpha^P$ ) = 1,55% и Ц=7355 у.е/т

Повышение сквозного извлечения металлов в продуктивный раствор с 36 до 71% приводит к снижению  $\alpha_{min}^P$  на 3,5-7% (рис.6).

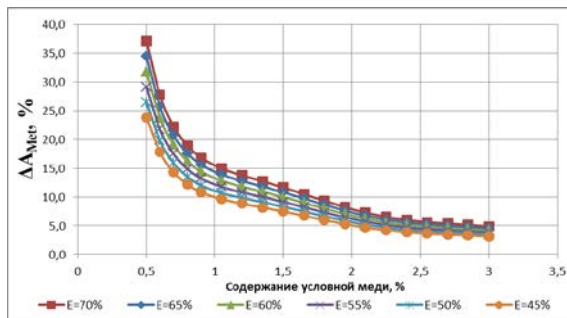


**Рисунок 6** - Зависимость минимального промышленного содержания условной меди в руде от ее извлечения в продуктивный раствор и товарную медь при  $\alpha^P = 1,55\%$

Таким образом, вовлечение техногенного сырья в разработку методами кучного выщелачивания с целью извлечения ценных компонентов позволяет получить дополнительную товарную продукцию в виде товарных металлов и, как следствие, увеличить производственную мощность по металлу всей горнотехнической системы. Результаты моделирования позволили установить зависимость прироста производственной мощности горнотехнической системы по товарной меди ( $\Delta A_{met}$ , %) от содержания условной меди в руде и ее извлечения при кучном выщелачивании окомкованных хвостов обогащения руд (рис. 7):

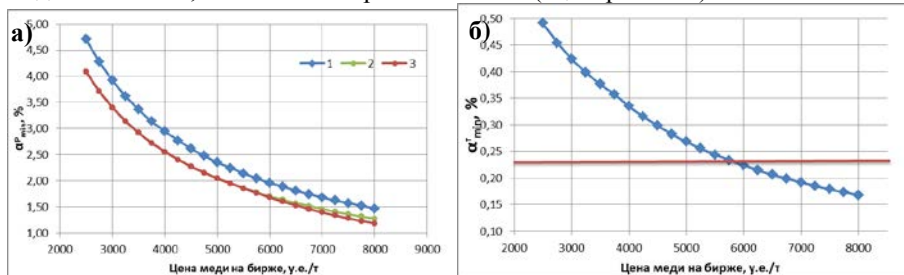
$$\Delta A_{met} = 10.823 \cdot 1.018^{Et} \cdot 0.48^{\alpha^P} \quad (10)$$





**Рисунок 7** - Зависимость прироста производственной мощности ГЭС по товарной меди от содержания условной меди в руде и ее извлечения при выщелачивании окомкованных хвостов обогащения руд.

Одним из важнейших экономических факторов, определяющих требования к качеству природного и техногенного сырья, является конъюнктура рынка и уровень цен на металлы. Однако, стоимость металлов на мировых биржах постоянно меняется, поэтому при проектировании полного цикла комплексного освоения месторождений необходимо закладывать среднюю цену основного металла за последние 10 лет. Например, при стоимости товарной меди на бирже менее 6000 у.е./т и курсе 30 руб/у.е. вовлечение хвостов обогащения со средним содержанием меди не менее 0,23 % является рентабельным (сценарий «В»).



**Рисунок 8** - Зависимость от цены меди: а – минимально-промышленного содержания в руде, б – минимального в хвостах обогащения для сценариев (1 –А, 2 –Б, 3 –В) при сквозном извлечении 0,6

Методика обоснования требований к качеству природного и техногенного сырья была апробирована и учтена при разработке технологических рекомендаций по комплексному освоению в полном цикле Ново-Учалинского месторождения медно-колчеданных руд. Для условий отработки горизонта - 420 м, производственной мощности подземного рудника 2,5 млн.т/год и стоимости меди 7355 у.е./т. вовлечение хвостов обогащения руд для приготовления закладочной смеси позволит снизить минимально-промышленное содержание условной меди на 14% (сценарий Б) по сравнению с заложенным в проекте базовым сценарием А; в случае доизвлечения металлов выщелачиваем из хвостов обогащения руд, минимально-промышленное содержание условной меди в руде может быть снижено на 22% по сравнению со сценарием А.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной квалификационной работой, дано решение актуальной научно-технической задачи – предложена новая методика обоснования требований к качеству природного и техногенного сырья при полном цикле комплексного освоения медно-колчеданных месторождений, которая позволяет дифференцировать минимально-промышленное содержание металлов в добываемых запасах по видам применяемых геотехнологий.

Основные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. На основе анализа опыта разработки медно-колчеданных месторождений и технологических решений по использованию природного и техногенного сырья в полном цикле комплексного освоения месторождений многокомпонентных руд произведена дифференциация требований к качеству вовлекаемого в эксплуатацию минерального сырья в зависимости от его вида, качественных и количественных характеристик и технологии утилизации отходов.

2. Доказано, что при полном цикле комплексного освоения медно-колчеданных месторождений требования к качеству природного и техногенного сырья должны быть дифференцированы по видам применяемых геотехнологий. Так, при освоении крутопадающего медно-колчеданного месторождения с глубиной залегания руд 450 м, мощностью залежи 80 м, среднем содержании условной меди в руде 1,55% этажно-камерной системой разработки с твердеющей закладкой без использования хвостов обогащения для приготовления закладочной смеси при годовой производственной мощности рудника 2 млн. т минимально-промышленное содержание условной меди в руде составляет 1,6%; при использовании отходов обогащения для закладки выработанного пространства оно составляет 1,38%; в случае доизвлечения выщелачиванием металлов из хвостов обогащения руд  $\alpha_{min}^P$  снижается до 1,3%, при этом содержание условной меди в хвостах должно быть не менее 0,18%.

3. Установлено, что при обосновании минимально-промышленного содержания металлов в запасах руд при полном цикле комплексного освоения месторождений много-компонентных руд необходимо учитывать экономический эффект от эксплуатации техногенного сырья. Использование хвостов обогащения руд для закладки выработанного пространства позволяет снизить минимальное промышленное содержание в извлекаемых запасах на 8 – 14% в зависимости от производственной мощности рудника, глубины ведения горных работ, среднего содержания металлов в руде; при этом извлечение физико-химической геотехнологией металлов из хвостов дополнительно снижает минимальное промышленное содержание металлов в руде до 26% в зависимости от цены металлов и уровня их извлечения из хвостов.

4. Доказано, что включение в полный цикл комплексного освоения медно-колчеданных месторождений подсистемы формирования и эксплуатации техногенных образований целесообразно при содержании металлов в хвостах выше значения, определяемого показательной функцией  $\alpha_{min}^T = b \cdot k_1^{\alpha^T} \cdot k_2^{\Pi} \cdot k_3^{A_p} \cdot k_4^{\varepsilon_T}$ ,

где  $b=2,2361$ ,  $k_1=1,0469$ ,  $k_2=0,8141$ ,  $k_3=0,8884$  и  $k_4=0,9865$  – постоянные, установленные множественной регрессией.

5. Установлены зависимости минимально-промышленного содержания условной меди при разной степени полноты и комплексности освоения медно-колчеданного месторождения от глубины ведения горных работ, производственной мощности подземного рудника, содержания металлов в руде, стоимости металлов и уровня их извлечения из техногенного сырья. Наибольшее влияние на величину  $\alpha_{min}^P$  из технологических факторов, оказывает производственная мощность рудника: ее увеличение на 0,5 млн. т в год приводит к снижению  $\alpha_{min}^P$  на 1,2-1,4%. Из геологических факторов наибольшее влияние оказывает среднее содержание металлов в руде: ее увеличение с 0,5% до 3% позволяет снизить  $\alpha_{min}^P$  на 31%.

6. Разработана методика обоснования требований к качеству природного и техногенного сырья при проектировании полного цикла комплексного освоения месторождения многокомпонентных руд, отличающаяся учетом экономического эффекта от утилизации техногенного сырья образующегося в процессе добычи и переработки руд, и кондиционного техногенного сырья. Реализация методики для условий Ново-Учалинского медно-колчеданного месторождения позволила обосновать возможность снижения минимально-промышленного содержания условной меди в рудах на 14 % при утилизации хвостов обогащения в закладке и на 22 % в случае дополнительного извлечения из них металлов кучным выщелачиванием и последующей утилизации в закладке.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах: в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Красавин В.П., Радченко Д.Н., Милкин Д.А., Звягинцев А.Г., Пешков А.М. Исследование технологии выщелачивания отходов добычи руд / Недропользование XXI век, 2009, №3. С. 38 – 41.

2. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А., Звягинцев А.Г., Пешков А.М. Обоснование параметров и режима выщелачивания сырья техногенных образований, сопутствующих разработке медно-колчеданных месторождений. Москва, ГИАБ, 2010, №3. С. 340-350.

3. Рыльникова М.В., Пешков А.М. Обоснование требований к качеству природного и техногенного минерального сырья при комплексном освоении месторождений. Москва, ГИАБ, 2011, №1. С. 58-64.

4. Пешков А.М. Формирование требований к качеству природного и техногенного минерального сырья при комплексном освоении рудных месторождений. // Проблемы проектирования технологии подземной и комбинированной разработки рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск), 2013. - №5. С. 86-96.

### **в прочих изданиях:**

5. М.В. Рыльникова, О.В. Петрова, А.Г. Звягинцев, А.М. Пешков. Мониторинг параметров выщелачивания отходов обогащения медно-колчеданных руд. // Материалы 66 науч.-техн. конференции: сб. докл. - Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ", 2008. - С.226-229.

6. Петрова О.В., Пешков А.М. Изыскание технологической схемы освоения месторождения «Озерное» комбинированной физико-технической и физико-химической

геотехнологией. Проблемы освоения недр в XXI век глазами молодых. – М: УРАН ИПКОН РАН, 2008 – с. 182-184.

**7.** Пешков А.М. Обоснование требований к природному и техногенному минеральному сырью при комбинированной физико-технической и физико-химической технологии //Сборник трудов конференции «Молодые – наукам о земле», т.1. РГГРУ, 2009 г. – с. 243.

**8.** Рьльникова М.В., Пешков А.М. Анализ влияния качественных характеристик медно-колчеданного сырья на выбор геотехнологии / 6-я международная конференция. Комбинированная геотехнология: теория и практика реализации полного цикла комплексного освоения недр. Магнитогорск, 2011. С. 12-15.

**9.** Пешков А.М. Обоснование требований к качеству медно-колчеданного сырья при проектировании комплексного освоения месторождений комбинированной геотехнологией // Проблемы освоения недр в XXI век глазами молодых. – М: УРАН ИПКОН РАН, 2011 – с. 255-258.

**10.** Пешков А.М. Исследования влияния качественных характеристик медно-колчеданных руд на выбор стратегии комплексного освоения месторождения. // Проблемы освоения недр в XXI век глазами молодых. – М: УРАН ИПКОН РАН, 2012 – с. 199-201.

**11.** Пешков А.М. Исследование влияния геологических, экономических и технологических факторов на требования к качеству природного и техногенного сырья при разработке рудных месторождений в полном цикле / 7-я международная конференция. Комбинированная геотехнология: масштабы добычи и качество сырья при комплексном освоении месторождений. Магнитогорск, 2013. С.55-57.

**12.** Пешков А.М. Закономерности формирования технологических показателей минерально-сырьевых потоков в полном цикле комплексного освоения медно-колчеданных месторождений. // Проблемы освоения недр в XXI век глазами молодых. – М: УРАН ИПКОН РАН, 2013 – с. 224-225.