

Қазақстан Республикасының
Білім және ғылым
Министрлігі

Д. Серікбаев атындағы
ШҚМТУ

Министерство
образования и науки
Республики Казахстан

ВКГУ
им. Д. Серикбаева

УТВЕРЖДАЮ
декан факультета Наук о Земле



А.К. Адрышев

2015 г.

ГЕОТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ КАРТАЛАУДЫҢ ҒЫЛЫМИ НЕГІЗДЕРІ

Дәрістер курсы

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

Курс лекций

Специальность: 6М070900- Металлургия «Современные и перспективные технологии разработки МПИ»

Количество кредитов дисциплины: 2

Өскемен
Усть-Каменогорск
2015

Курс лекций разработан на кафедре «Геология и горное дело» на основании Рабочего учебного плана, Каталога элективных дисциплин и Модульной образовательной программы специальности.

Одобрено учебно-методическим советом факультета Наук о Земле

Председатель  Г.А. Кокаева

Протокол № 1 от 10.09.2015 г.

Обсуждено на заседании кафедры «Геология и горное дело»

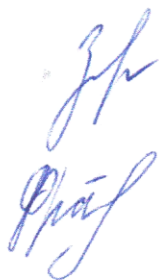
Зав. кафедрой  Г.Т. Нуршайыкова

Протокол № 2 от 08.09. 2015 г.

Разработал
Доктор PhD, ст. преподаватель
кафедры «Г и ГД»

ст. преподаватель
кафедры «Г и ГД»

Нормоконтролер



Н.А. Зимановская

О.В.Фролова

Министерство образования и науки республики Казахстан
ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Д. СЕРИКБАЕВА

Н.А. Зимановская, О.В. Фролова

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

Курс лекций для магистрантов специальности 6М070900- Metallургия «Современные и перспективные технологии разработки МПИ»

Оскемен
Усть-Каменогорск
2015

УДК 622.03.002.68:550.8

Зимановска Н.А., Фролова О.В. Научные основы геотехнологического картирования: Курс лекций для магистрантов специальности 6М070900- Metallургия «Современные и перспективные технологии разработки МПИ»/ВКГТУ – Усть-Каменогорск, 2015

Курс лекций содержит основы исследований, обеспечивающих оценку технологических свойств руд и оптимизацию комплекса вещественных и энергетических параметров, обеспечивающих эффективность флотационного обогащения и методов предобогащения на основе сортировок и сепарации.

Предназначен для магистрантов специальности 6М070900- Metallургия «Современные и перспективные технологии разработки МПИ»/

Одобен учебно-методическим советом факультета Наук о Земле
Протокол № 1 от 10.09.2015г

© Восточно-Казахстанский
государственный
технический университет
им. Д.Серикбаева, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1 ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

2 ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

2.1 Флотационное обогащение

2.2 Гидрометаллургические методы переработки рудного сырья

2.3 Методы обогащения на базе сортировок и сепараций

3 ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

3.1 Петрофизические основы флотационного обогащения

3.2 Петрофизические основы гидрометаллургического обогащения

3.3 Электрофизические свойства руд и основных рудных минералов колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая

3.4 Петрофизические основы систем управления качеством добываемых руд

4 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУД

4.1 Методы определения электрофизических, электрохимических свойств руд в полевых исследованиях

5 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

5.1 Особенности генезиса и онтогении колчеданно-полиметаллических месторождений (на примере Рудного Алтая)

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

К сложившееся к настоящему времени технология освоения разведанных запасов ПИ включает следующие три уровня: добычу, обогащение и металлургическую переработку ключения промежуточного звена «обогащения» в горно-металлургический процесс обусловлен следующим:

1. металлургические процессы базируются на переработке мономинеральных продуктов;
2. добываемая на рудниках руда, как правило, содержит несколько полезных компонентов и нерудные образования.

Общемировой тенденцией в сложившейся к началу XXI в. является постоянное уменьшение содержаний полезных компонентов в добываемых рудах на эксплуатируемых месторождениях практически всех видов минерального сырья. Кроме того, в некоторых странах (бывшие республики СССР, Индия) начали осваивать месторождения с так называемыми труднообогатимыми рудами, переработка которых традиционными технологиями сопровождается большими потерями полезных компонентов. Все это предопределило поиски путей усовершенствования технологий освоения месторождений, начиная от добычи, кончая процессами металлургической переработки. Вполне очевидно, что фундаментом для таких изысканий является более глубокое изучение минерально-сырьевой базы, причем, не только со стороны анализа природных типов руд, но и выделения среди них разновидностей, различающихся по технологическим свойствам как собственно руд, так и основных рудных минералов, определяющих протекание процессов переработки — обогащения (флотации, физических методов сепараций и т. д.). Все это обусловило организацию нового направления в геологии направленного на совершенствование подготовки разведанных запасов к освоению — геолого-технологическое картирование (ГТК). Основоположником геолого-технологического картирования был Б.И. Пирогов, разработавший методику геолого-технологического картирования для железорудных месторождений в конце 70-х годов. Эта методика в последующем послужила основой для разработки методики геолого-технологического картирования на оловорудных месторождениях (О.П. Иванов) и колчеданно-полиметаллических месторождениях (Ю.Б. Генкин, А.М. Дробышевский). В разработке методик геолого-технологического картирования, отдельных его технологических линий принимали участие такие институты, как ВИМС, Механобр, УНИИолово, ВНИИцветмет, Гипроникель (медно-никелевые месторождения), Средазгипроцветмет (молибден-вольфрамовые месторождения), Армнипроцветмет (медно-молибденовые месторождения) и многие производственные организации. Методика геолого-технологического картирования разрабатывалась производственными организациями для «внутреннего» пользования, например, для медно-порфириновых руд — на Алмалыкском, Балхашском и Сорском комбинатах, для свинцово-цинковых руд — на Лениногорском комбинате, для колчеданных медно-цинковых — на Башкирском, Гайском, Учалинском и Золотушинском комбинатах, для медно-барит-полиметаллических — на Маднеульском комбинате. Эти методики были разработаны для стадий промышленной и эксплуатационной разведки.

В конце 80-х годов в условиях рыночных отношений в небольшом объеме геолого-технологическое картирование эпизодически выполнялось на Николаевском и Малеевском месторождениях.

До этих работ геолого-технологическое картирование базировалось на использовании в качестве основных параметров вещественных характеристик руд (минеральный, гранулометрический, химический составы, геохимическая характеристика, текстурно-структурные характеристики).

При выполнении исследований на Николаевском и Малеевском месторождениях ВНИИцветметом впервые при оценке технологических свойств изучались физико-химические характеристики руд и основных рудных минералов. В результате были

установлены так называемые энергетические параметры руд, определяющие протекание процессов флотационного и гидрометаллургического обогащения. Кроме того, были установлены параметры, определяющие возможности использования физических методов сортировок и сепарации для предобогащения руд и разделения их в рудопотоке на технологические типы (сорта). Все это послужило основой для создания принципиально новой концепции геолого-технологического картирования. В основу его положено определение природного тела, сформированное академиком В.И. Вернадским, как объекта, объединяющего две составляющих: вещественную и энергетическую. Вещественная составляющая характеризуется такими параметрами, как минеральный, химический, гранулометрический, петрохимический и т.д. состав, соотношение минералов (текстурно-структурная характеристика). Энергетические параметры отображают физико-химические свойства минералов, генерируемые ими физические и геохимические поля. Вещественная и энергетическая составляющая природных тел, находящиеся в тесной корреляционной связи при неизменных условиях окружающей среды, всегда находятся в состоянии равновесия. При изменении состояния окружающей среды это равновесие нарушается и, как следствие, возникают в природном теле самопроизвольные, синергетические процессы, которые приводят в равновесие вещественную и энергетическую составляющие в условиях нового состояния окружающей среды. Причем, наиболее чувствительна к смене условий — энергетическая составляющая.

Суть технологии переработки руд состоит в том, что путем изменения внешних условий изменяются параметры энергетических составляющих, что обеспечивает в свою очередь изменение состояния вещественной составляющей. Например, разрушить куски руды как единое целое (дробление), выделить заданные минералы (обогащение), разделить минералы на составляющие с выделением полезных компонентов (металлургия). Как видно из этого перечня, основные действия во всех процессах производятся над энергетической составляющей, в результате которых изменяется состояние вещественной составляющей. Следует отметить, что при таком целенаправленном воздействии на природные, в данном случае геологические тела, возникают синергетические процессы, которые не всегда позитивно влияют на достижение поставленной задачи. В процессах переработки это проявляется в потерях металлов, получении некачественных продуктов. Таким образом, включение в состав параметров изучаемых в процессе геолого-технологического картирования физико-химических характеристик, с выявлением основных, влияющих на протекание процессов добычи и переработки (обогащение, металлургический передел), является вполне очевидным.

Исходя из этих положений, курс лекций по геолого-технологическому картированию включает следующие разделы:

1. Назначение геолого-технологического картирования;
2. Основные методы и способы обогащения руд;
3. Петрофизические основы различных методов обогащения;
4. Методы управления качеством руд и их петрофизические основы;
5. Технология и аппаратура определения вещественных и энергетических характеристик руд и основных рудных минералов;
6. Основы методики геолого-технологического картирования;
7. Геолого-технологического картирования на различных стадиях освоения разведанных запасов.

1 ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Геолого-технологическое картирование (ГТК) – это комплекс работ по изучению: пространственной изменчивости вещественного состава, текстурно-структурной характеристик, физико-химических свойств, физико-механических свойств определяющих поведение руд в процессах добычи обогащения металлургической переработки.

1. В совокупности эти характеристики определяют технологические свойства руд.

2. Выделению и изучению распределения на разведываемых и разрабатываемых месторождениях технологических типов и сортов с определением (прогнозированием) показателей обогащения по выделенным типам, сортам и участкам месторождения.

Работы по ГТК включают:

1. Детальное количественное изучение вещественных параметров: минерального, химического, гранулометрического составов и текстурно-структурных характеристик с целью выявления природных (текстурно-минералогических) типов и разновидностей, руд установление их пространственной локализацией и оценки изменчивости важнейших параметров природного качества руд.

2. Детальное количественное изучение физико-химических и физико-механических свойств руд определяющих поведение руд и входящих в их состав минералов определяющих протекание физико-химических процессов в естественном залегании различных способов обогащения; оценки изменчивости параметров характеризующих физико-химические и физико-механические свойства в пределах ПТР слагающих залежи.

3. Оценку обогатимости ПТР и разновидностей вещественными и физико-химическими характеристиками в пределах рудных тел.

4. Установление зависимости показателей обогащения от вещественных и физико-химических характеристик руд.

5. Разработку геолого-технологической классификаций (типизаций), руд с выделением технологических типов и сортов.

6. Оконтуривание (при невозможности оконтуривание – установление закономерности пространственного распределения и количественного соотношения) технологических типов и сортов на геологических планах, картах и разрезах составлением технологических карт и разрезов.

7. Составление объемных геолого-технологических моделей отображающих изменчивость информативных параметров вещественных и физико-химических характеристик и показатели обогащения руд по технологическим типам, сортам, участкам месторождений и периодом эксплуатаций.

Материалы ГТК используют для отбора представительных технологических проб по технологическим типам и сортам руд для проведения лабораторных и полупромышленных испытаний; составление ТЭО временных и постоянных кондиций, а также ТЭО обоснование детальной разведки и разработки месторождения; подсчеты запасов по технологическим типам и сортам руд; проектирование новых и реконструкций действующих горно-обогатительных предприятий; планирования добычи и управления качеством руд поступающих на обогащение (переработку).

Геолого-технологическое картирование – неотъемлемая часть единого геологоразведочного процесса и выполняется с полной увязкой со всеми геологоразведочными данными. Его проводят на всех стадиях разведки.

Объемы и детальность ГТК на каждой стадий разведки определяет исходя из требований ГКЗ к разведанности и изученности различных категорий запасов.

Общие требования изученности природных типов и разновидностей, технологических типов и сортов руд, запасах промышленных категорий А, В и С₁ получаемых на поисково-оценочной стадий предварительной, детальной и предварительной разведках:

1. определение природных разновидностей, технологических типов и сортов руд;

2. Качество выделенных технологических типов и сортов полезного ископаемого должно быть охарактеризовано по всем предусмотренным кондициям показателям.

3. Должны быть определены минеральные формы нахождения полезных и вредных компонентов.

В целях унификации и однозначного толкования применяемых терминов, часть которых сравнительно недавно вошла в практику геологоразведочных работ, ниже приводится перечень терминов, употребляемых при технологическом опробовании и картировании рудных месторождений в соответствии с рекомендациями инструкции №1 по малообъемному технологическому опробованию и картированию рудных месторождений при разведке (Мингео СССР, 1979 г.), временного методического руководства по технологическому опробованию месторождений цветных металлов в процессе разведки (Минцветмет, Мингео СССР, 1982 г.) с дополнениями авторов.

Качество руды — совокупность признаков вещественного и химического состава руды, ее текстурно-структурных и физико-механических характеристик, определяющих ее технологические свойства.

Технологические свойства руд — совокупность свойств руды, обуславливающих выбор технологической схемы ее обогащения.

Обогатимость руды — способность руды к обогащению по определенной технологической схеме с конкретными показателями.

Геолого-технологическая классификация (типизация) руд — систематика геологических и технологических признаков на основе идентификации параметров их качества и показателей обогащения.

Природный (геологический) тип руд (ПТР) — локальная совокупность минеральных образований пространственно обособленная в рудном теле, характеризующаяся устойчивым составом, ведущие параметры которого регламентированы заданными граничными значениями.

Природная (геологическая) разновидность руд (ПРР) — подразделение природного типа, выделяющееся по особенностям минерального состава.

Промышленный технологический тип руд (ТТР) — руда, принципиально отличающаяся от других руд составом, технологическими свойствами и схемой обогащения (переработки), занимающая значительный объем рудного тела или месторождения, добычу и переработку которой возможно осуществлять селективно.

Технологический сорт руды (ТСР) — подразделение промышленного технологического типа, выделяющееся по какому-либо параметру качества и показателям обогащения. Технологические сорта одного типа добываются и перерабатываются совместно в определенных соотношениях.

Представительность проб — заданная степень сходимости ведущих параметров качества руды в пробе и в опробуемом участке рудного тела (или соответствующего типа, сорта, разновидности руд).

Геолого-технологическое картирование (ГТК) — комплекс работ по геометризации руд с различными технологическими свойствами и обогатимостью.

Значения терминов, относящихся к разновидностям геологических и технологических проб, видам опробования, технологическим схемам и т. п. общеприняты.

Методология геолого-технологического картирования

Исследования выполненные в последние 40 лет ДПП ВНИИцветмет показали, что использование при оценке технологических свойств руд, только на базе вещественных характеристик не обеспечивает разработок эффективных технологий переработки руд особенно упорных, труднообогащаемых руд. По крайней мере, практически на всех крупных колчеданно-полиметаллических месторождениях, как показали исследования, выполненные Д. В. Титовым отобранные технологические пробы для разработки технологий флотационного обогащения оказались не представительными. В результате на большинстве месторождений не было достигнуто при их эксплуатаций предусмотренных проектом

показателей обогащения, так на месторождений Николаевском в среднем потери по цинку составили более 40% по меди более 30%. Изучение вещественного состава и физико-химических руд таких месторождений, что на протекание процессов флотаций влияют не только вещественные характеристики, но и электрофизические (электрохимические) свойства руд. Этот факт еще в 50-е годы установил Е. Н. Плаксин, в течение многих лет направление по оценке влияния физико-химических свойств на протекание электрохимических процессов обогащения выполнялось учениками Е. Н. Плаксина, В. А. Чантурия, Р. Ш. Шакировым и другими. С 1986 года подобные исследования проводятся в ДГП ВНИИцветмет (Борцов В. Д., Сулаквелидзе Н. Е., Кушакова Л. Б.) в результате этих исследований была разработана принципиально новая методология геолого-технологического картирования обеспечивающая оценку технологических свойств руд определяющих протекание процессов обогащения флотационном гидрометаллургическим (в том числе и биохимическим) методами и физическими методами обогащения на базе сортировок и сепараций. В основу этой методики было положено понятие о природных телах сформулированных академиком В. И. Вернадским «Природные тела включают (в том числе и геологическую) две составляющей: вещественную описываемую следующими параметрами: химический, минералогический, гранулометрический, петрохимический составы текстурно-структурные характеристики и прочие; энергетическая составляющая включает параметры характеризующие физико-химические свойства вещественных элементов на различных уровнях организации природных тел (атомы, молекулы, кристаллы, руды, рудные тела, рудные залежи) и генерируемые ими физические, химические поля».

Эти две составляющие природных тел при определенной стабильности окружающей среды находятся в определенном равновесии при изменении окружающей среды это равновесие нарушается. Причем к этим изменениям наиболее чувствительны энергетические составляющие, под её влиянием происходят перестройка вещественного составляющего вплоть до установления нового равновесия между вещественной и энергетической составляющей. Процессы, протекающие при этом, следует относить к явлениям самоорганизаций, все вышесказанное предопределило следующую методику геолого-технологического картирования:

1. Проведение на первых этапах изучение характеристик вещественных составляющих рудных тел результатом, который является выделение и картирование природных рудных тел.

2. Изучение физико-химических свойств руд и основных рудных минералов, при этом в основу положены представления Г. Г. Свешникова и Ю. С. Рысса о рудах и рудных телах как сложно построенных электрохимических элементов, а также результаты исследований природы электрохимических элементов колчеданно-сульфидных месторождений выполненных во ВНИИцветмет (Кушакова Л.Б., Борцов В. Д.) о тесной корреляционной связи электрофизической и электрохимической минеральных образований.

3. Процессы связанные с работой естественных гальванических элементов (микро и макро) в процессе работы которых происходит преобразование вещественной составляющей.

4. Изучение протекание процессов обогащения в зависимости от вещественного состава физико-химических свойств руд и рудных минералов и влияние на них выявлений самоорганизации связанные с работой естественных гальванических элементов.

Новая методология геолого-технологического картирования требует разработки новых технологий, в том числе и оперативных определения вещественных и энергетических характеристик и новых форм представления. К настоящему времени во ВНИИцветмете разработаны лабораторные и полевые оперативные методы на основе геофизических методов оценки вещественных и энергетических характеристик определяющих технологические свойства руд.

В качестве формы представления результатов разработана объемная технологическая модель содержащая частные модели отображающие вещественные и энергетические характеристики организаций их позволяет оперативно пополнять информацию наносить

исправления и анализировать как отдельно так и в совокупности используя современные математический аппарат обеспечивающий классификаций оценку корреляций между вещественными и энергетическими параметрами и оценку прогнозных показателей обогащения.

В последующих главах приводятся сведения о методах обогащения методике и технике изучения вещественных физико-химических свойств методика проведения различных видов опробования и методики построения, объемных геолого-технологических моделей.

Принимая во внимание, что для геологических специальностей не предусмотрено изучение методов обогащения в учебнике изложены краткие основы этих методов.

2 ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

2.1 Флотационное обогащение

2.1.1 Процессы флотационного обогащения. Флотационный метод обогащения использует явления, происходящие при взаимодействии поверхностей твердых, жидких и газообразных веществ, называемых фазами и обозначаемых: твердая — т, жидкая — ж, газообразная — г. Основные из них — *поверхностное натяжение* и *смачивание*.

Поверхностное натяжение на границе взаимодействующих фаз обуславливается неуравновешенностью сил, действующих на молекулы, находящиеся на поверхности раздела этих фаз. Если взаимодействуют две фазы, разные по плотности, в поверхностном слое более плотной фазы появляется запас свободной поверхностной энергии. Отношение свободной поверхностной энергии к единице площади раздела фаз называют удельной поверхностной энергией, которая численно равна коэффициенту поверхностного натяжения, обозначаемому буквой σ (сигма) и определяемому по формуле

$$\sigma = F/l,$$

где F — сила поверхностного натяжения, Н; l — длина границы поверхностного слоя, м.

Смачивание характеризует силы сцепления молекул разных фаз на границе их взаимодействия. Если силы сцепления молекул жидкой фазы меньше сил сцепления между молекулами жидкой и твердой фазы, частицы твердой фазы смачиваются. Если же силы сцепления молекул жидкой фазы больше, твердые частицы не смачиваются или смачиваются плохо. Например, окунув в воду стеклянную и картонную пластинки, мы заметим, что стеклянная покрывается слоем воды, а картонная нет. В этом случае силы сцепления молекул воды и стекла выше, чем силы сцепления молекул воды между собой, т. е. стекло смачивается водой. Картон же, наоборот, не смачивается.

Поверхностное натяжение и смачивание при определенных условиях обеспечивает флотацию (всплывание) в воде одних минеральных частиц и нефлотируемость других. Для частиц, подвергаемых флотации, силы сцепления молекул при смачивании и силы поверхностного натяжения должны превышать архимедову силу и силу тяжести. Ослабить действие силы тяжести и архимедовой силы можно уменьшив размеры частиц, при этом площадь их поверхности и, следовательно, силы сцепления с другими фазами увеличатся. Поэтому флотации подвергают тонкоизмельченные (менее 1 мм и только в редких случаях до 3 мм) полезные ископаемые.

В зависимости от способа взаимодействия минеральных частиц с жидкой и газообразной фазами различают пленочную, масляную и пенную флотацию, пенную сепарацию и флотогравитацию. Для всех процессов фазой, в которой осуществляется всплывание (флотация) частиц, является вода. Явление смачивания тел водой называется гидрофилизацией, а несмачивания — гидрофобизацией, тела же соответственно гидрофильными и гидрофобными. По способности смачиваться водой минералы делят на три группы: минералы с гидрофобной поверхностью (молибденит, графит, тальк,

самородная сера), с незначительной гидрофобностью (сульфиты — галенит, сфалерит, пирит и др.) и с гидрофильной поверхностью (кварц, долевые шпаты, слюды, кальций и др.). Мерой гидрофобности поверхности минеральных частиц является косинус краевого угла смачивания, обозначаемый буквой θ (тета). Краевым углом смачивания θ называется угол между поверхностью минерала и касательной к поверхности воздушного пузырька (рис. 1, а, б), или капли воды (рис. 1, в) в любой точке трехфазного периметра смачивания. Он всегда отсчитывается от поверхности минерала в сторону жидкой фазы, т.е. между лучами угла должна быть жидкая фаза.

Периметром смачивания называется линия ABA_1B_1 (см. рис.1, в), по которой соприкасаются все три фазы. Капля воды, нанесенная на поверхность, будет находиться в равновесии в том случае, если силы поверхностного натяжения на границах фаз будут соответствовать условию

$$\sigma_{Т-Г} = \sigma_{Ж-Г} \cos \theta + \sigma_{Т-Ж},$$

где $\sigma_{Т-Г}$, $\sigma_{Ж-Г}$, $\sigma_{Т-Ж}$ — силы поверхностного натяжения на границах соприкосновения соответственно твердого — газа, жидкости — газа и твердого — жидкости.

Отсюда величина, характеризующая гидрофобность поверхности тела, — $\cos \theta$ будет равна

$$\cos \theta = (\sigma_{Т-Г} - \sigma_{Т-Ж}) / \sigma_{Ж-Г},$$

На полностью смачиваемой (гидрофильной) поверхности капля растекается, краевой угол $\theta \approx 0$, а $\cos \theta = 1$. Для полностью гидрофобной поверхности $\theta \approx 180^\circ$, а $\cos \theta = -1$. Переходную точку, в которой $\theta = 90^\circ$, а $\cos \theta = 0$, называют точкой инверсии. Флотация минеральных частиц происходит при углах, значительно меньших 90° , иногда при $\theta = 1-2^\circ$. Для каменного угля $\theta = 60-90^\circ$, для талька — $70-90^\circ$, для некоторых сульфидов $70-85^\circ$.

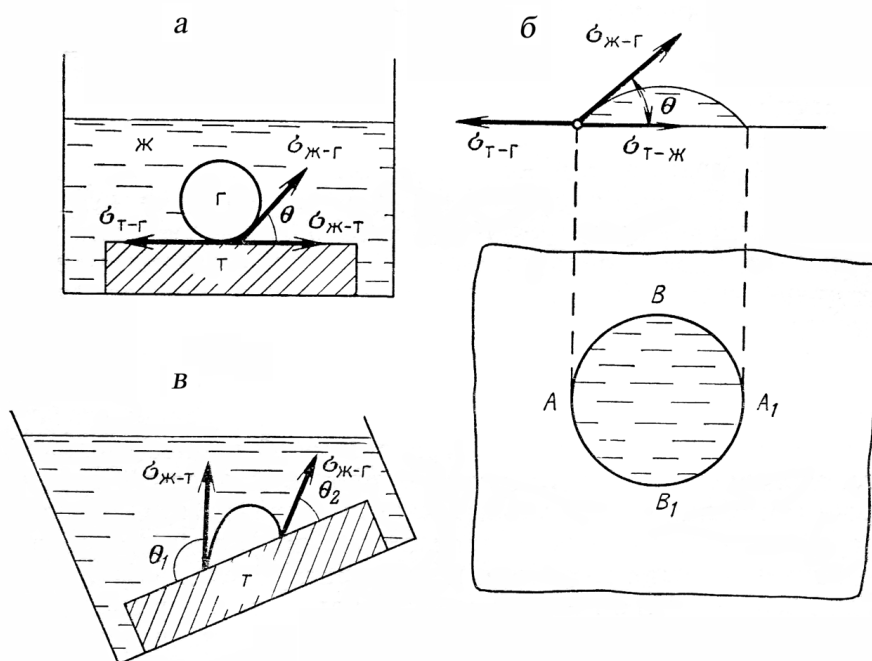


Рисунок 1 — Условия смачиваемости поверхности частиц

Пленочная флотация — это процесс, при котором тонкоизмельченное полезное ископаемое, содержащее природногидрофобные минеральные частицы, осторожно, тонким слоем подается на поверхность воды. Силы сцепления молекул гидрофильных частиц преодолева-

ют поверхностное натяжение воды на границе вода - воздух, и эти частицы тонут. Частицы с гидрофобной поверхностью практически не имеют сил, способных вступить во взаимодействие с поверхностью воды, и остаются на ней, образуя своеобразную пленку. Для увеличения гидрофобности частиц минералов их иногда обрабатывают небольшим количеством масла. В виду низкой эффективности и небольшой производительности на единицу площади поверхности воды пленочная флотация (как самостоятельный процесс обогащения) практически почти не применяется, но принцип ее используется при флотогравитации.

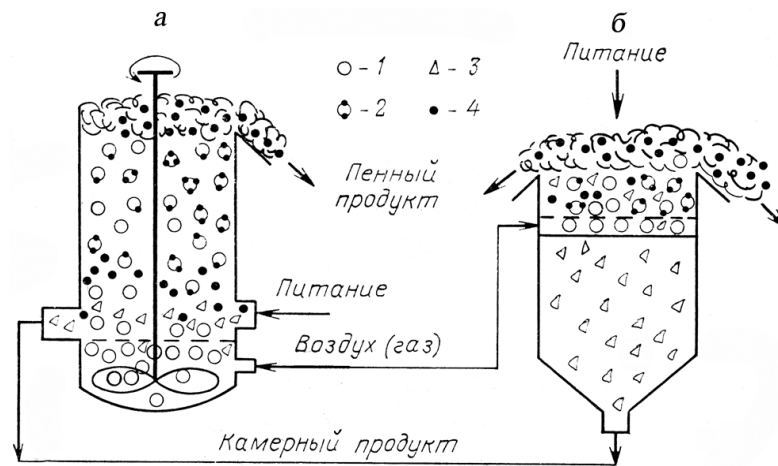
Флотогравитация представляет собой процесс гравитационного обогащения с использованием операций аэрации суспензии и обработки мелких минеральных частиц реагентами. В результате такого обогащения получают продукты гравитационного обогащения и флотационные хвосты или концентрат.

Масляная флотация заключается в следующем. Тонкоизмельченную руду перемешивают с большим количеством масла, плотность которого значительно меньше плотности воды. При перемешивании хорошо смачиваемые маслом частицы обволакиваются масляной пленкой. Обработанную маслом смесь минералов загружают в емкость с водой и перемешивают. Частицы, покрытые масляной пленкой, поднимаются на поверхность воды или в ее верхний слой. Непокрытые маслом частицы, чаще всего гидрофильные (хорошо смачиваемые водой), тонут. Масло в этом процессе выполняет роль подъемной силы, обеспечивающей всплытие флотируемых частиц. После отделения от всплывшей фракции масло направляют обратно в процесс. Потери масла с продуктами обогащения составляют более 2%. Вследствие высокой стоимости масла и большого его расхода масляная флотация не нашла широкого применения в практике обогащения полезных ископаемых.

Пенная флотация (рис. 2, а) представляет собой процесс, при котором в емкости (камере) с водой создается большое количество пузырьков воздуха или газа размером менее 2 мм. Гидрофобные частицы загруженного в камеру материала закрепляются на этих пузырьках и всплывают вместе с ними на поверхность. Гидрофильные частицы смачиваются водой и тонут. Большое количество всплывших пузырьков называют пеной, пузырьки закрепленными на них минералами — минерализованной пеной, всю массу поднятых пузырьками частиц, — пенным продуктом. Потонувшие частицы образуют камерный продукт. Если в пенный продукт извлекаются ценные минералы, а в камерный — хвосты, процесс флотации называют прямым, а если процесс протекает наоборот, — обратным. Пенная флотация получила широкое распространение после решения таких вопросов, как возможность получения прочных пузырьков и обеспечение закрепления частиц минералов на их поверхности. То и другое стало возможным при развитии химической промышленности, позволившем получать дешевые вещества (реагенты), добавление которых в суспензию обеспечивает прочность пузырьков и может изменять гидрофобность или гидрофильность поверхности частиц разделяемых минералов.

Процесс пенной флотации можно разделить на пять основных этапов:

- создание большого количества рассеянных по всему объему суспензии и несоединяющихся друг с другом мелких пузырьков воздуха или газа;
- обработка (контактирование) смеси разделяемых минералов реагентами, т. е. гидрофобизация поверхности зерен флотируемого минерала и гидрофилизация нефлотируемых зерен;
- контакт гидрофобизированных частиц с пузырьками воздуха или газа и подъем агрегатов пузырек — минерал на поверхность пульпы;
- сьем образовавшейся минерализованной пены;
- разгрузка камерного продукта.



1 — пузырек воздуха; 2 — минерализованный пузырек; 3 — гидрофильные частицы; 4 — гидрофобные частицы

Рисунок 2 — Принципиальные схемы пенной флотации (а) и пенной сепарации (б)

При воздействии реагентов на многофазную систему или на отдельную фазу (например, минеральную частицу) происходит адсорбция, т. е. на поверхности раздела фаз твердое — жидкость или жидкость — газ увеличивается концентрация этого реагента по сравнению с концентрацией его в объеме отдельной фазы (например, жидкости). В том случае, когда на поверхности раздела произойдет химическая реакция и образуется слой нового химического соединения, процесс называется хемосорбцией. Если же на поверхности раздела увеличение концентрации обусловлено силами межмолекулярного притяжения, процесс называется физической адсорбцией. В результате адсорбции реагентов на поверхности минеральных частиц изменяется их способность смачиваться водой, т. е. создается возможность регулировать гидрофобность поверхности разделяемых минералов. Адсорбируясь на поверхности раздела фаз газ — жидкость, реагенты уменьшают поверхностное натяжение воды, при этом воздушные пузырьки стабилизируются и, всплывая на поверхность суспензии образуют устойчивую пену.

Изменение поверхностного натяжения происходит при растворении веществ в воде. Вещества, которые при растворении в воде повышают поверхностное натяжение, называются поверхностно-инактивными, а вещества, при растворении понижающие поверхностное натяжение на границе газ — жидкость, называются поверхностно-активными (ПАВ). В зависимости от химической активности и строения все вещества подразделяются на полярные, аполярные и гетерополярные.

Полярные вещества химически активны, хорошо растворяются в воде, при этом их молекулы диссоциируют на ионы. К ним относятся неорганические соли и кислоты, вода и ряд природных минералов. Твердые полярные вещества гидрофильны.

Аполярные (неполярные) вещества химически малоактивны, плохо растворяются в воде. К ним относятся многие жидкие органические вещества (минеральные масла, жиры и др.) и твердые вещества с насыщенными ковалентными связями. Эти вещества гидрофобны.

Гетерополярные вещества состоят из молекул, в состав которых входят одновременно полярная группа и аполярная углеводородная цепь. Эти вещества обладают свойствами полярных и неполярных веществ. Полярные концы молекул гидрофильны, аполярные гидрофобны. Во флотационной суспензии гетерополярные вещества адсорбируются на поверхности раздела в соответствии с полярностью фаз: аполярный конец молекулы направлен в сторону менее полярной фазы. Поэтому молекулы гетерополярных веществ ориентируются на границе раздела жидкость-газ таким образом, что полярные группы направлены в воду, а аполярные в воздух (рис. 3, а). Молекулы гетерополярных веществ на схемах изображаются в виде спичек, головки которых представляют полярные группы. Эти вещества являются ор-

ганическими соединениями, у которых аполярной частью является углеводородная цепь. Ориентация молекул гетерополярного вещества на поверхности раздела частица минерала — вода или частица — воздух зависит от физико-химических свойств поверхности минеральных частиц. Если молекулы гетерополярного вещества будут ориентироваться полярной группой к частице, а неполярной к воде (рис. 3, б); то гидрофобность частицы увеличится, если же ориентация молекул будет противоположна, т. е. полярная группа будет обращена к воде, а аполярная к поверхности частицы, то гидрофобность частицы уменьшится.

Контактирование гидрофобизированных частиц с пузырьками воздуха или газа обеспечивается массовым образованием пузырьков и пропусканием их через все слои суспензии. В результате закрепление частиц на пузырьках (основной акт флотации) происходит самопроизвольно, т.е. по второму закону термодинамики, согласно которому самопроизвольно могут протекать лишь процессы, приводящие к уменьшению свободной энергии системы. Уменьшение свободной поверхностной энергии принимают за меру прочности закрепления частицы минерала на границе раздела фаз, иногда называют работой прилипания и определяют по формуле

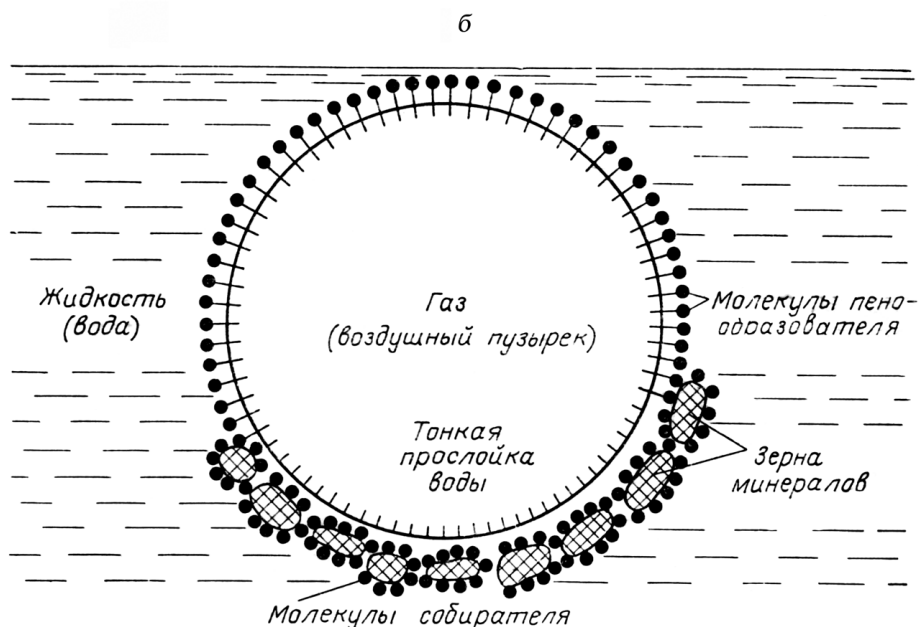
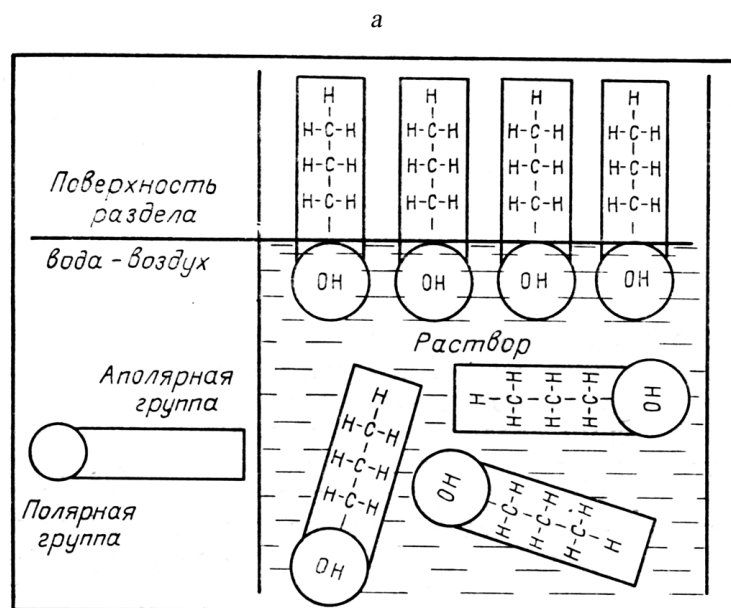
$$\Delta F = \sigma_{ж-г} (1 - \cos \theta)$$

где ΔF — уменьшение свободной поверхностной энергии системы, отнесенное к единице вновь образованной поверхности раздела твердое — газ; $\sigma_{ж-г}$ — свободная поверхностная энергия единицы поверхности раздела жидкость — газ; θ — краевой угол смачивания. Формула справедлива, если площадь поверхности раздела жидкость — газ при прилипании частицы не изменяется, так как размеры частиц малы по сравнению с размерами пузырьков.

Анализ формулы (4) показывает, что частицы с абсолютно гидрофильными поверхностями не прилипают к пузырьку и не флотируются, так как $\Delta F = 0$ при $\theta = 0$. Частицы же с абсолютно гидрофобными поверхностями будут иметь наибольшую работу прилипания, т. е. $\cos \theta = -1$ и $\Delta F = 2\sigma_{ж-г}$ при $\theta = 180^\circ$. При $\theta > 0$ $\Delta F > 0$, т. е. прилипание частиц к пузырьку и флотация их возможны. Краевым углом качественно определяют флотируемость минералов, значение его определяют на минеральных шлифах, так как во флотационной суспензии сделать это практически невозможно. Работа прилипания частицы к пузырьку зависит и от $\sigma_{ж-г}$. С уменьшением $\sigma_{ж-г}$ будет пропорционально уменьшаться прочность закрепления минеральных частиц на пузырьке.

В практике флотации бывают случаи, когда при обилии пузырьков (пены) процесс обогащения прекращается или идет с большими потерями флотируемого минерала в камерном продукте. Опытные флотаторы определяют это явление по цвету пены. Такое нарушение процесса возникает при изменении реагентного режима, повлекшего уменьшение $\sigma_{ж-г}$.

Рассмотренные зависимости справедливы для статических условий, процесс же прилипания частиц к пузырькам воздуха происходит в суспензии, которая постоянно перемешивается. Поэтому процесс флотации зависит от большого количества факторов: физико-химических свойств поверхности флотируемых минералов, свойств и концентрации реагентов: интенсивности перемешивания суспензии, вероятности столкновения частиц с пузырьками, свойств воды, в которой осуществляется флотация, и др. Закрепление частиц на пузырьке воздуха или газа, а значит и флотируемость улучшаются благодаря явлению *гистерезиса смачивания*.



а — жидкость — газ (воздух); б — минеральная частица — воздушный пузырек (газ)

Рисунок 3 — Схемы ориентации молекул гетерополярных веществ

Гистерезисом смачивания называется отставание изменения периметра смачивания от изменения краевого угла. Если на горизонтальную поверхность минерала в воде поместить пузырек воздуха (см. рис. 1, а), то образуется определенный равновесный угол и определенный периметр смачивания. При наклоне поверхности минерала (см. рис. 1, б) краевой угол изменится, периметр же смачивания (закрепления) пузырька остается неизменным, т. е. изменение периметра смачивания отстает от изменения краевого угла. Угол θ_1 больше равновесного и называется оттекающим, а угол θ_2 меньше равновесного и называется натекающим.

Гистерезис смачивания зависит от:

- порядка смачивания, т. е. вытесняется ли с поверхности минеральной частицы вода воздухом при прикреплении ее к воздушному пузырьку и вытесняется ли воздух водой при отрыва частицы от воздушного пузырька;
- абсолютной скорости перемещения пузырька по поверхности частицы;

– наличия адсорбированного слоя ориентированных молекул реагентов, которые могут препятствовать растеканию воды по поверхности частицы;

– неровности (шероховатости) поверхности частицы. На шероховатой поверхности гистерезис смачивания всегда выше, поэтому прилипание пузырьков воздуха к такой поверхности и флотиримость частиц улучшаются.

Частицы обогащаемого полезного ископаемого перемешиваются с водой (смачиваются) в процессе подготовительных операций. Смачивание водой сопровождается образованием вокруг каждой частицы гидратной оболочки. Это явление называется *гидратацией*, а частицы гидратированными. Гидратация обусловлена тем, что поверхность многих веществ под действием, диполей воды диссоциирует на ионы. Вокруг ионов в воде мгновенно образуется слой диполей воды, т. е. ион гидратируется. Образование гидратного слоя означает, что взаимосвязь между гидратированным ионом и диполями воды больше, чем между диполями воды. Полярные молекулы гидратируются сильнее, аполярные слабее. Гетерополярные молекулы гидратируются в зависимости от структуры, причем полярная группа гидратируется сильнее, неполярная значительно слабее.

Гидратация оказывает значительное влияние на прилипание частицы к пузырьку. Если поверхность частицы гидрофобна, то гидратная оболочка неустойчива, поэтому при столкновении частицы с пузырьком она разрывается самостоятельно, но не до конца. На участке прилипания частицы к пузырьку в пределах площади прилипания остается тонкая пленка воды (см. рис. 3, б) являющаяся новой двухмерной фазой, принципиально отличной по своим свойствам от объемной жидкости. Толщина водной прослойки в этом случае равна $4 \cdot 10^{-8}$ м. Но эта тонкая устойчивая пленка не препятствует прилипанию частицы к пузырьку. У гидрофильных поверхностей частиц гидратная прослойка значительно больше, она термодинамически устойчива, поэтому прилипания частицы к пузырьку не происходит — пузырек будет отталкиваться от частицы. Установлено, что удалению гидратной пленки с поверхности минерала способствует образование на гидратной поверхности частиц микропузырьков, которые сливаются (коалесцируют) с пузырьком и увеличивают площадь прилипания, что улучшает прочность закрепления частицы на пузырьке.

Для осуществления флотации минеральных частиц пузырьки, к которому они прилипли, должен поднять их на поверхность суспензии. При всплывании минерализованный пузырек испытывает действие различных механических сил (действие движущихся частей механизмов, струй суспензии и др.), которые могут оторвать частицу от пузырька. Поэтому прочность закрепления частицы на пузырьке и прочность самого пузырька должны быть значительно выше максимальной из всех действующих на агрегат пузырьков — частица сил. Установлено, что при закреплении частиц минералов на пузырьке прочность его увеличивается.

При пенной флотации, кроме образования прочного агрегата частица — пузырек и всплывания его на поверхность суспензии, важно и то, за какое время протекают эти процессы. От этого зависит производительность аппаратов при заданном качестве продукта обогащения. Процесс флотации с момента загрузки материала в камеру разделения и до получения пенного и камерного продуктов заданного качества оценивается скоростью флотации. Для определения скорости флотации имеется большое количество формул. Наиболее простой из них является

$$v_{ср} = \varepsilon/t,$$

где $v_{ср}$ — средняя скорость флотации; ε — извлечение флотиремого материала в концентрат, %; t — время флотации, мин.

На практике в зависимости от флотиремости минералов, качества получаемых продуктов и извлечения ценных минералов, время флотации принимают для основных операций от 5 до 40 мин, а для пересчетных и контрольных не выше 5-15 мин.

Контактирование реагентов с частицами обогащаемого материала производится в контактирующих аппаратах. Создание пузырьков, обеспечение их контакта с частицами разделяемых минералов, подъем агрегатов частица — пузырек на поверхность суспензии, сьем минерализованной пены и выгрузка камерного продукта осуществляются в аппаратах, называемых флотационными машинами.

Пенная сепарация (см. рис. 2, б) отличается от пенной флотации тем, что отделение гидрофобных минералов от гидрофильных производится непосредственно в пенном слое. Этот процесс нашел широкое применение при флотации крупнозернистых (до 3мм) калийных руд. Загрузка исходного сырья в машины пенной сепарации, называемые иногда пенными сепараторами, производится на слой пены.

2.1.2 Флотационные реагенты. В зависимости от назначения флотационные реагенты делятся на группы: пенообразователи, собиратели, активаторы, подавители и регуляторы среды. Активаторы, подавители и регуляторы среды иногда называют модификаторами.

Пенообразователями называются вещества, при добавлении которых в воду создаются условия образования достаточно прочных пузырьков воздуха и устойчивого слоя пены. Пенообразователи являются гетерополярными поверхностно-активными веществами и способны адсорбироваться на границе раздела жидкость — газ. При адсорбировании молекул на границе раздела жидкость — газ полярная часть их вступает во взаимодействие с диполями воды, а неполярные группы обращаются в воздушную среду. Поверхность пузырьков покрывается слоем адсорбированных молекул пенообразователя, который снижает поверхностное натяжение и упрочняет оболочку пузырьков. Этот слой препятствует коалесценции пузырьков и уменьшает скорость их движения в суспензии. Снижение скорости подъема благоприятно влияет на флотацию, так как увеличивает время пребывания пузырьков в суспензии, и тем самым повышает вероятность их минерализации. Слой молекул пенообразователя на поверхности пузырьков препятствует их разрушению при всплывании, т. е. способствует образованию устойчивой пены. Устойчивость минерализованной пены тем выше, чем гидрофобнее и мельче сфлотированные частицы.

К пенообразователям относятся вещества, имеющие в своем составе одну из полярных групп: —ОН (гидроксил), —СООН (карбоксил), —С=О (карбонил), —NH₂ (аминогруппа), —SO₂ОН и др. В зависимости от состава полярной группы пенообразователи подразделяют на кислые (спиртовые и крезоловые аэрофлоты, фенолы, алкиларилсульфонаты и др.), нейтральные (сосновое масло, терпинеол, Т-66, ОПСБ, ОПСМ и др.) и основные (тяжелый пиридин). Пенообразователи подают непосредственно в камеры флотационных машин.

Собиратели. Высокую естественную гидрофобность имеет ограниченное число минералов. Кроме этого она в значительной степени изменяется в процессе измельчения полезного ископаемого. Для избирательной гидрофобизации поверхности флотируемых минералов применяют реагенты-собиратели. При контактировании частиц минералов с реагентом-собирателем происходит закрепление молекул или ионов его на поверхности частиц и увеличивается гидрофобность этой поверхности.

В отличие от пенообразователей в качестве реагентов-собирателей используются вещества, не имеющие гетерополярной структуры и представляющие собой углеводородные аполярные жидкости. Такие вещества не диссоциируют в воде на ионы и называются неионогенными аполярными собирателями. Эти собиратели применяют для флотации минералов, обладающих хорошей природной гидрофобностью: угля, графита, серы, молибденита, алмазов и др. Их применяют также в сочетании с жирными кислотами для гидрофобизации силикатов, карбонатов и окислов и в сочетании с ксантогенатами для флотации, сульфидов. К аполярным собирателям относятся керосин, трансформаторное, машинное и смазочные нефтяные масла, смолы и продукты перегонки угля, сланца, торфа и др. Керосин не обладает пенообразующими свойствами, поэтому иногда используется для гашения излишней пены.

Реагенты-дификаторы (регуляторы) представляют собой большую группу веществ, которые изменяют флотируемость минералов путем регулирования действия собирателя на поверхность их частиц. Они повышают активность действия собирателей и тем самым обес-

печивают четкое разделение минералов при флотации. Эти реагенты позволяют из комплексных руд выделить последовательно все ценные минералы в отдельные концентраты или, выделив сначала все ценные минералы в один коллективный концентрат, затем разделить их на отдельные концентраты.

Например, при флотации руды, содержащей галенит PbS , сфалерит ZnS и пирит FeS_2 сначала флотируют галенит, а гидрофобность частиц сфалерита и пирита подавляют известью, цианистой солью или цинковым купоросом. Этот процесс называют подавлением флотируемых свойств, а реагенты подавителями. После флотации PbS восстанавливают гидрофобность частиц сфалерита добавлением медного купороса, одновременно добавляя известь для подавления пирита. Процесс восстановления флотируемости называют активацией, а реагенты для его осуществления активаторами. Сфлотируя частицы сфалерита, проводят активацию пирита, например серной кислотой, и флотируют его в пиритный концентрат.

Флотацию можно вести и по другому: сначала сфлотировать PbS , ZnS , FeS_2 в один коллективный концентрат, а затем с помощью реагентов-регуляторов разделить их на отдельные концентраты.

Деление модификаторов на подавители и активаторы имеет условный характер, так как одни и те же реагенты могут быть по отношению к разным минералам и в разных условиях активаторами и подавителями. Например, сернистый натрий при небольших расходах является активатором для окисленных минералов цветных металлов, а при больших расходах — подавителем для сульфидных минералов. Поэтому, называя то или другое вещество активатором или подавителем, нужно обязательно учитывать конкретные условия его применения.

Подавители, применяемые в настоящее время, представлены в основном неорганическими соединениями — кислотами, щелочами и их солями. Действие их на поверхность частиц сложно и многообразно. Они могут образовывать на поверхности частиц труднорастворимые химические соединения в виде гидрофильной пленки; вытеснять ионы собирателя, адсорбированные ранее; связывать ионы активатора, предотвращая активирующее его действие; образовывать труднорастворимые соединения с собирателем, предотвращая его действие, и др.

Подавитель должен прежде всего выполнять основную задачу — исключать флотируемость тех минералов, для которых он применяется как подавитель, т.е. он должен действовать избирательно. Необходимое время контакта подавителя с минералами в два раза больше, чем для пенообразователей и собирателей. Это следует учитывать при ведении процесса флотации.

Наиболее широкое применение получили: цианиды при флотации медно-цинковых и свинцово-медно-цинковых руд для подавления цинковой обманки, пирита и некоторых медных сульфидов; сернистый натрий Na_2S при флотации сульфидных и несulfидных минералов как подавитель-десорбент собирателя, активатор и регулятор pH суспензии, силикат натрия Na_2SiO_3 (жидкое стекло) для подавления кварца и других силикатных минералов, а также кальцита апатита, флюорита; кремнефтористый натрий Na_2SiF_6 при разделении рутила и циркона, пироксена и циркона и др.

В качестве подавителей применяют и некоторые органические вещества: крахмал, декстрин, танин (дубильная кислота), карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ). Применяют их в небольших количествах, действие их связано с образованием в суспензии коллоидных частиц (мицелл), которые закрепляются на поверхности частиц минералов и гидратируют ее.

Активаторы применяют для увеличения природной гидрофобности минералов, когда она недостаточна для флотации, и для восстановления флотируемости подавленных минералов. В результате активации происходит химическая очистка поверхности минералов от пленок, которые мешают адсорбции собирателя, или замена ионов поверхностного слоя частиц на ионы активатора. При активации некоторых окисленных минералов тяжелых металлов сернистым натрием вытесняются с поверхности частиц окисленных минералов ионы SO_4^{2-} или CO_3^{2-} ионами S^{2-} . Такой процесс активации называется сульфидизацией. При сульфид-

дизации, например, церуссита на его поверхности образуется сернистый свинец в виде пленки, которая затем взаимодействует с собирателем как сульфидный минерал.

В качестве активаторов применяют в основном неорганические кислоты и соли. Широкое использование получили: серная кислота — для активации пирита, подавленного известью, при флотации ильменита, рутила, слюды и др.; соли поливалентных металлов (меди, свинца и др.) — для активации сфалерита, пирита, кварца и некоторых несulfидных минералов; соли щелочноземельных металлов (кальция и др.) — применяемые в качестве активаторов при флотации кварца и других несulfидных минералов; плавиковая кислота, сода и др.

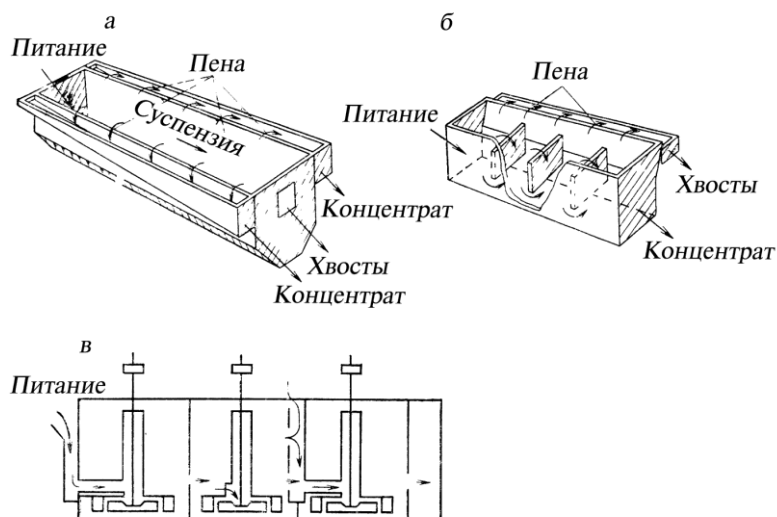
Процесс флотации может протекать по заданной технологии только при определенном содержании в жидкой среде ионов водорода. Концентрацию ионов водорода принято выражать через водородный показатель рН, представляющий собой отрицательный десятичный логарифм концентрации водородных ионов: $pH = -\lg[H^+]$. Для чистой воды $pH = 7$ — нейтральная среда. При добавлении в воду кислоты рН будет меньше 7 — среда кислая, при добавлении щелочи рН больше 7 — среда щелочная. Флотацию проводят при определенном значении рН.

Реагенты, обеспечивающие требуемое значение рН, называют регуляторами среды. Свободные ионы OH^- могут взаимодействовать с ионами тяжелых металлов и выводить их из процесса в виде гидратов окислов, представляющих собой труднорастворимые осадки. Ионы водорода влияют на устойчивость гидратных слоев, изменяют степень гидратации поверхности частиц минерала и, следовательно, их флотуемость. Состояние среды оказывает существенное влияние на эффективность применения собирателей, активаторов, подавителей. Изменением рН можно регулировать воздействие реагентов на поверхность частиц минералов.

В практике флотации принято регулировать щелочность суспензии. Для этой цели применяют известь CaO , серную кислоту H_2SO_4 , кальцинированную соду Na_2CO_3 . Известь применяют в виде суспензии, называемой известковым молоком (негашеная известь с водой). Серную кислоту применяют при флотации рутила, ильменита и др. Такие подаватели и активаторы, как сернистый натрий, цианистый натрий, жидкое стекло, железный купорос и другие, могут быть использованы в качестве регуляторов среды.

2.1.3 Флотационные машины. Все аппараты, в которых осуществляется процесс флотации, состоят из следующих основных узлов: камеры, в которой осуществляется процесс флотации; устройства для перемешивания суспензии и ее аэрации (насыщение достаточным количеством пузырьков воздуха или газа); механизмов для загрузки и перемещения флотуемого материала, выгрузки камерного продукта и съема минерализованной пены. Все узлы машин крепятся на общей раме.

Объем камеры, в которой флотуруются частицы обогащаемого минерала, определяет производительность машины при заданном качестве продуктов обогащения. Чтобы обеспечить полное выделение флотуемых частиц в пенный продукт, необходимо пропустить через суспензию такое количество пузырьков, которое способно не только вступить в контакт с каждой гидрофобной частицей, но и обеспечить всплытие их на поверхность суспензии. Количество пузырьков зависит от площади камеры (например, через площадь, равную 15мм^2 , можно пропустить одновременно примерно 15 пузырьков диаметром 1мм). Вероятность встречи пузырька, поднимающегося на поверхность, с частицами минерала зависит от высоты слоя суспензии, которая, в свою очередь, зависит от высоты (глубины) камеры. Значит, чем больше площадь камеры, тем больше пузырьков можно пропустить через нее, и чем она глубже, тем больше вероятность встречи пузырьков с частицами. Следовательно, при одинаковых показателях производительность флотационной машины с камерой большего объема будет больше производительности машины с камерой меньшего объема. Наиболее часто объем камеры флотационных машин увеличивают за счет увеличения площади, главным образом - длины. По форме камеры различают флотационные машины корытного типа, общего уровня и камерные.



a — корытного типа, *б* — общего уровня; *в* — камерного типа

Рисунок 4 — Принципиальные схемы флотационных машин

2.2 Гидрометаллургические методы переработки рудного сырья

Гидрометаллургические методы переработки рудного сырья основаны на извлечении металлов водными растворами реагентов (выщелачивании) с последующим выделением металлов из них в товарные продукты.

Классификация процессов выщелачивания

В зависимости от места проведения процессы выщелачивания подразделяется на следующие процессы:

- подземное выщелачивание;
- выщелачивание в отвалах;
- кучное выщелачивание;
- чановое выщелачивание.

По способу контактирования растворов с рудным сырьём процессы выщелачивания подразделяются на агитационное и перколяционное выщелачивание.

Агитационное выщелачивание проводят в реакторах с механическим (с помощью мешалок), пневматическим (путём подачи воздуха, острого пара или др. газов) или комбинированным перемешиванием.

Перколяционное выщелачивание осуществляется путём просачивания раствора через неподвижный слой руды. Скорость просачивания зависит от проницаемости рудного слоя (пористости), содержания мелких (иловых) частиц в твёрдом материале и высоты слоя.

Способ подземного выщелачивания - геотехнологическая разработка полезных ископаемых, основанная на избирательном переводе полезных компонентов, которые целенаправленно извлекаются из месторождения в виде продуктивных растворов с помощью растворителя в подвижное состояние.

Способ выщелачивания может применяться в самых разных сочетаниях с подземным и открытым способами, при разработке бедных и забалансовых руд и отдельных залежей с балансовым содержанием, не имеющих самостоятельного промышленного значения. Он характеризуется проведением небольшого объема трудоемких подготовительных выработок, высокой степенью механизации производственных процессов, относительной простотой конструктивного исполнения и весьма высокой интенсивностью подготовки месторождений к эксплуатации. Благодаря этим качествам, применение способа подземного выщелачивания обеспечивает быструю окупаемость капиталовложений, невысокую себестоимость подготовки

запасов и увеличение сырьевой базы за счет вовлечения в добычу значительных ресурсов неиспользуемых бедных и убогих месторождений полезных ископаемых.

Подземное выщелачивание в настоящее время широко применяется на территории Казахстана, Узбекистана как прогрессивный способ добычи урана. Этот метод за короткое время прошел все стадии исследований, разработки и промышленного внедрения на гидротермальных месторождениях, залегающих в проницаемых осадочных породах депрессионных зон земной коры, где вскрытие и подготовка рудных тел и добыча урана осуществляется через скважины. Имеется также большой положительный опыт добычи урана методом выщелачивания из труднопроницаемых руд, в которых проницаемость создается искусственным путем - предварительным дроблением их на месте залегания.

Методы подземного выщелачивания медных руд применяются на месторождении Олд Рейлэйбл в Соединенных Штатах, на руднике "Сан Доминго" (Португалия), "Планес" в Рио Тинто (Испания), на руднике "Оверсайт" в Кананеа (Мексика).

На территории бывшего Советского Союза следует отметить опытно-промышленную установку подземного выщелачивания меди на Дегтярском руднике. Это была одна из первых в мире установок, с помощью которой осуществлялось подземное выщелачивание меди с применением бактериально-химического выщелачивания.

Несмотря на то, что возможность отработки рудных месторождений методом подземного выщелачивания ограничивается достаточно жесткими требованиями (наличие подстилающих водонепроницаемых горных пород, высокая проницаемость самого рудного тела, удобная гидрогеологическая обстановка и др.) таким способом в некоторых странах добывают до 10 % урана и до 18% меди.

Отвальное выщелачивание - геотехнологический поверхностный способ добычи металлов из рудных отвалов. Разновидностью отвального выщелачивания является выщелачивание в траншеях, котлованах и других горных выработках.

Выщелачивание отвалов требует минимальной подготовки руд к процессу. Обычно в отвалы направляются фракции рудной массы с пониженным содержанием извлекаемого металла, но иногда в результате повышенной производительности горных работ отвалы используют как хранилища избыточно добытой балансовой руды. Наиболее значительные отвалы образуются при длительной эксплуатации крупных карьеров. Руда может складироваться в течение нескольких лет до того, как их могут подвергнуть выщелачиванию. Оптимальной высотой отвалов для выщелачивания считается высота 30-35 м, но практикуется выщелачивание и значительно более высоких отвалов (45-60 м). Самые высокие отвалы (до 370 м) находятся на руднике "Бингам Каньон".

Сам процесс выщелачивания может продолжаться в течение нескольких лет. Выщелачивание в отвалах наиболее часто применяется для переработки медных руд. Наиболее широко выщелачивание отвалов применяется в США (на 14 рудниках), на некоторых рудниках Мексики, Испании и др.

Начало внедрения технологии выщелачивания произошло на рудниках, которые располагались в районах теплого климата, что привело многих к такой точке зрения, что процесс* выщелачивания эффективен только в теплых климатических условиях. Однако медные рудники, применяющие процесс отвального выщелачивания также могут успешно функционировать и в более суровых климатических условиях, например, Эрдэнэт (Монголия), Гибралтар (Британская Колумбия).

Кучное выщелачивание

Принципиальными различиями процессов кучного выщелачивания и выщелачивания в отвалах являются:

крупность руды, выщелачиваемой в отвалах, не регулируется (максимальный размер кусков может достигать 1-1,5м);

при кучном выщелачивании руду дробят до оптимального размера (от 5 до 200 мм), который определяется целым рядом факторов (концентрацией и ценностью выщелачиваемого металла в руде, скоростью выщелачивания, затратами на дробление и др.);

количество обрабатываемого материала в отвалах гораздо больше, чем руды в кучах (в отвалах до 4 млрд т, в кучах от 10 тыс. до 2 млн. т руды).

Процессы кучного выщелачивания широко применяются для низкосортных и богатых золотосодержащих руд (от 0,35 до 4 г/т золота); для окисленных медных руд, содержащей, как правило, 0,5 и более % легкорастворимой меди.

Независимо от специфики кучного выщелачивания каждого типа руд технология их переработки складывается из следующих составных частей: добыча руды, рудоподготовка, сооружение водонепроницаемой площадки, отсыпка штабеля, орошение кучи растворами, сбор и переработка продуктивных растворов, обезвреживание отработанных рудных штабелей, рекультивация отвалов и нарушенных земель.

Подготовка руды состоит из смешивания, дробления и агломерации, причём могут применяться как все, так и только одна из операций. Преимущество мелкого дробления руды высокая скорость и высокая степень извлечения металла. Недостатки - увеличение капитальных и эксплуатационных затрат на дробление, снижение проницаемости и ухудшение равномерной циркуляции растворов. В каждом конкретном случае подбирается оптимальная крупность, до которой необходимо дробить руды (от 5 мм до 250 и выше).

Водонепроницаемые прокладки, укладываемые под основание кучи необходимы для сохранения технологических растворов в пределах действующего объекта. Для их изготовления используются глины или смеси глин, грунта и цемента, полимерные материалы, асфальт.

Формирование штабеля может совершаться разными методами, выбор которых прежде всего зависит от свойств руды. Засыпка руды может осуществляться грейдерами, погрузчиками, конвейерными механизмами и т.д. Метод сооружения штабеля должен ограничить уплотнение слоев руды, исключить сегрегацию частиц и обеспечить защиту водонепроницаемого основания.

Удельный вес затрат на сооружение и эксплуатацию штабеля кучного выщелачивания в стоимости товарной продукции составляет не менее 60-70 %.

Раствор выщелачивания передаётся от соответствующего сборника на штабель через систему насосов. Типичные скорости орошения 6-12 л/час на м поверхности руды. Продуктивный раствор после фильтрации через штабель собирается с помощью систем перфорированных труб или траншей и направляются на установки по извлечению металлов. Растворы после извлечения металлов подкрепляются соответствующими реагентами и снова подаются на штабель для выщелачивания руды.

Чановое выщелачивание

Чановое агитационное выщелачивание широко применяется на металлургических предприятиях для переработки концентратов, промпродуктов и др. богатого сырья.

На обогатительных предприятиях чановое выщелачивание применяется значительно реже и используется для переработки окисленных медных, урановых, золотосодержащих руд, калийных руд. Чановое выщелачивание обеспечивает более эффективное растворение металлов, однако его применение ограничивается экономическими факторами. Так, например, чановое выщелачивание медных руд экономически оправдано, как правило, при содержании меди не менее 1 %, золота не менее 8-10 г/т.

Чановое выщелачивание широко применяется при обогащении сильвинитовых руд. Процесс выщелачивания калийных руд обеспечивает получение высококачественной продукции (95-98% KCl) при высоком извлечении (90-95%) и используется на обогатительных фабриках перерабатывающих калийные руды.

Технология кучного и отвального выщелачивания медных руд

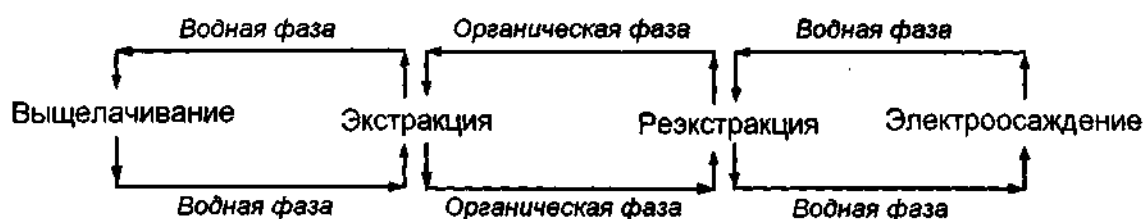
Выбор технологии переработки рудного сырья любых месторождений для извлечения цветных металлов определяется минералогическим составом руд и содержанием в рудах цветных металлов.

При извлечении меди для переработки сульфидных руд, в которых медь присутствует в основном в форме халькопирита, чаще всего используют технологию, включающую

флотационное обогащение с последующей плавкой или обжигом концентрата, в то время как для переработки окисленных руд предпочтение оказывают технологиям выщелачивания. При переработке сульфидных руд, содержащих халькозин и ковеллин, практически в равной степени могут рассматриваться обе технологии.

Процесс «экстракция - электроосаждение» - (SX-EW) впервые использован для извлечения меди из растворов кучного выщелачивания в 1968 году на руднике Ранчерс Блюберд (Ranchers Bluebird), расположенном на юго-западе США, с использованием LIX® 64N, первого успешного реагента для экстракции. Сегодня методу «экстракция - электроосаждение» отдаётся предпочтение на медных предприятиях во всём мире при получении меди из бедных окисленных и сульфидных руд. Высококачественную медь таким способом получают на многих крупных предприятиях мира в количестве более 2,5 миллионов тонн в год.

Процессы выщелачивания и процесс переработки растворов связаны в одну технологическую цепочку, так, как это показано ниже.



В каждой стадии экстракции и реэкстракции органическая фаза сначала смешивается с водной фазой, а затем отделяется от неё. Процесс осуществляется в экстракторах, конструкция которых весьма разнообразна.

В настоящее время имеется большой ассортимент экстрагентов для меди. Это экстрагенты типа Lix, относящиеся к кетоксимамам, которые обеспечивают хорошую эффективность экстракции. При экстракции обеспечивается:

Селективный перевод меди из продуктового раствора в органическую фазу, которая состоит из экстрагента и разбавителя (керосина), в то время как другие анионы и катионы, присутствующие в продуктивном растворе, практически туда не извлекаются;

Повышение концентрации меди в растворе, от 0,5-4 г/л в продуктивном растворе до 45-50 г/л в реэкстракте (концентрация меди, обеспечивающая высокие технологические параметры при электролитическом осаждении меди из растворов).

Для реэкстракции меди из обогащенной органической фазы используются растворы серной кислоты различного содержания. Электролитическое осаждение меди из растворов реэкстракции позволяет исключить операцию плавки и получить товарную медь в виде катодов. В процессе электролиза меди из реэкстрактивных растворов используют в основном традиционные режим электролиза и аппаратуру.

В Казахстане внедрение технологии SX-EW ожидается в ближайшее время на отвалах медных руд Коунрадского рудника, а также при переработке окисленных медных руд Актогайского месторождения кучным выщелачиванием.

Технология кучного выщелачивания золотосодержащих руд

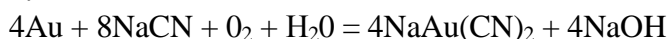
Кучное выщелачивание золотосодержащих руд широко применяется во многих странах мира. Основным реагентом кучного выщелачивания золота являются цианиды, но в настоящее время проходят экспериментальную проверку менее токсичные реагенты (тиомочевина, тиосульфаты и др.).

Первое промышленное применение кучного выщелачивания руд благородных металлов с применением цианирования было освоено в 1960 году компанией Карлин Голд Майнинг в северной части Невады. В последующем она получила широкое распространение в практике золотодобывающих предприятий и в настоящее время активно применяется в США, Австралии, Канаде, Мексике, Чили, Португалии, ЮАР, Узбекистане, КНР и др. странах.

Внедрение технологии переработки золотосодержащих руд методом кучного выщелачивания в Казахстане были начаты в 1991 г.

Не все руды могут быть пригодны для цианирования. Наиболее подходящими являются окисленные рассеянные руды; сульфидные руды, в которых благородные металлы не ассоциированы с сульфидными минералами, а также некоторые жильные или пластовые залежи, которые содержат тонкие частицы золота или частицы с высоким отношением площади поверхности к весу.

При орошении штабелей при кучном выщелачивании золота слабощелочными растворами цианида натрия растворение золота идёт преимущественно по следующей реакции:



Наиболее часто применяются растворы с концентрацией цианида -0,5-1,0 г/л и поддержании pH в пределах 10-10,5 (за счёт подачи извести, щелочи или др. реагентов). Продолжительность выщелачивания различна от 30 до 80 и выше суток. Извлечение золота в зависимости от типа руды, крупности, содержания золота составляет 60-80 %.

Процесс сорбции на угле или на ионообменной смоле складывается из следующих операций:

Насыщение - золото и серебро адсорбируются из продуктивного раствора на частицах угля или смолы. Растворы после выделения из них благородных металлов, подкрепляются по мере необходимости цианидом натрия, щелочью и возвращаются в цикл выщелачивания;

Элюирование и реактивация - золото и серебро десорбируются с богатой смолы или угля в концентрированный раствор, а затем сорбент регенерируется и возвращается на стадию насыщения;

Извлечение - золото и серебро извлекаются из концентрированного раствора электролизом. Из катодного металла (сумма золота и серебра до 85%) изготавливаются слитки.

Бактериальное выщелачивание. Особое место занимает метод бактериального выщелачивания цветных металлов, при котором окисление сульфидных минералов осуществляется специфическими бактериями. Поскольку при окислении сульфидов превращению подвергаются неорганические компоненты, - прежде всего сульфидная сера, то и основная роль в этом окислении должна принадлежать хемоавтотрофным микроорганизмам, т.е. таким, которые способны синтезировать органическое вещество целиком из углекислоты и воды за счет энергии окисления неорганических соединений. Такими организмами являются, так называемые, тионовые бактерии. Ведущая роль в окислении сульфидных руд принадлежит тионовым железоокисляющим и сероокисляющим бактериям - *Thiobacillus ferrooxidans* и *Thiobacillus thiooxidans*.

Эти организмы обладают уникальной способностью - окислять в кислых условиях среды железо двухвалентное в железо трехвалентное, либо сульфиды до сульфитов и тем самым многократно интенсифицировать скорость выщелачивания металлов из руд. Основным источником энергии для них служат ионы Fe^{2+} , элементарная сера, а также сульфидные минералы. По сравнению с обычным химическим выщелачиванием тионовые бактерии, например, ускоряют растворение халькопирита в 12 раз, арсенопирита и сфалерита в 7 раз, ковеллина и борнита в 18 раз. Основными путями совершенствования этого метода являются биологический и технический. Биологический путь предусматривает использование новых групп бактерий, смешанных культур, определение оптимальных условий их получения, размножения и восстановления. Технический путь включает изучение и учет всего многообразия факторов, влияющих на определение экономического потенциала процесса биовыщелачивания (начальная крупность минеральных частиц, степень разложения частиц при выщелачивании, технологическое и аппаратурное оформление процесса и др.

Бактериальное выщелачивание применяют для интенсификации процесса окисления сульфидных минералов при кучном и отвальном выщелачивании меди, путём создания

благоприятных условий для размножения бактерий, имеющихся на месторождении. Число бактерий в зоне окисления руд при благоприятных условиях может достигать 1млрд. в 1 г руды или 1 см³ воды.

При бактериальном выщелачивании необходимо достаточно жёстко соблюдать технологические параметры процесса, поскольку жизнедеятельность бактерий осуществляется только в достаточно узких пределах и ограничивается рядом факторов (температура, рН, окислительно-восстановительный потенциал раствора, концентрация металлов, оптимальный состав газовой среды и т.д.). Несмотря на это, а также на достаточно большую длительность процесса (до 6-8 суток) технологии извлечения золота с применением процессов бактериального выщелачивания очень перспективны и получают всё большее распространение. В настоящее время они широко применяются в Южной Африке, Бразилии, Австралии, Перу, Китае. В Казахстане технология, включающая процессы чанового бактериального окисления и последующего цианидного выщелачивания золота применяется на Суздальском месторождении (Восточный Казахстан).

2.3.5 Технологическое изучение руд.

Отбор представительных малообъемных и минералого-технологических проб

Наличие подготовленной геологической основы с геометризованными природными типами и разновидностями руд позволяет произвести целенаправленный отбор оптимального количества представительных малообъемных технологических проб для изучения технологических свойств всего разнообразия руд. Оконтуренные по изложенной выше методике, каждая ПРР (или ПТР, если ПРР не выделялись) представляет, по-существу, относительно однородную руду. В этой связи нет необходимости в отборе большого количества малообъемных проб для характеристики каждой ПРР. Однако, учитывая возможные колебания параметров признаков природных разновидностей руд (в пределах граничных значений) в разных участках рудного тела, в каждом разведочном сечении, в каждом контуре природной разновидности рекомендуется отобрать одну малообъемную пробу. Набор малообъемных проб по всем разведочным сечениям охарактеризует с достаточной полнотой изменчивость технологических свойств руд, а строгая привязка каждой пробы к конкретной разновидности или типу руд определит высокую степень представительности технологических проб.

Предусматривается определенная последовательность отбора проб. В каждом разведочном сечении серии однородных (характеризующихся одинаковыми классами параметров одноименных признаков) групповых проб, представляющих одну ПРР, после отбора из них резервных дубликатов, объединяются.

Из собранного (тщательно перемешанного) материала отбирается малообъемная проба (весом 15-20 кг). Остальной материал направляется на формирование смеси, характеризующей природную разновидность руд в целом. В смесь поступает весь материал, оставшийся после отбора малообъемных проб данной разновидности руд. Из этой смеси, после соответствующей подготовки (шихтовки, перемешивания, квартования) производят отбор усредненной по разновидности малообъемной пробы. Остальной материал поступает на формирование минералого-технологической пробы по природному типу руд. Последняя создается из материала всех разновидностей руд данного ПТР (весом 250-300 кг). Если природные разновидности не выявлялись, эта операция выпадает, и минералого-технологическая проба формируется как средняя по данному природного типу. Сформированная минералого-технологическая проба сопровождается серией частных (усредненных) малообъемных проб, представляющих все ПРР, входящие в данный ПТР. Это позволяет при разработке оптимальных режимов технологической переработки руд данного типа произвести определения возможных отклонений в расходе реагентов, времени флотации и т. п. применительно к каждой ПРР этого ПТР. Строгая привязка каждой малообъемной пробы к конкретным ПРР и ПТР практически снимает вопрос как о представительности малообъемных проб, так и о представительности минералого-

технологических проб, сформированных из усредненных проб по разновидностям или природным типам руд. Это обстоятельство обеспечивает представительность стандартных схем обогащения, разработанных на МТ для испытаний МТП.

Документация технологического опробования производится в порядке, предусмотренном временным методическим руководством по технологическому опробованию месторождений цветных металлов в процессе разведки (Минцветмет СССР, Мингео СССР, 1982 г.).

Изучение качества и технологических свойств руд (на малообъемных и минералоготехнологических пробах)

Данные о качестве материала минералоготехнологических и малообъемных проб являются исходными для характеристики природных и технологических типов руд и для определения характера зависимости между параметрами качества и показателями обогащения. В этой связи на данных пробах предусматривается проведение широкого комплекса аналитических работ (см. табл. 2) для определения содержаний и форм нахождения основных полезных и попутных компонентов, минералогического анализа для характеристики рудных и нерудных минералов, текстурно-структурных особенностей и гранулометрического состава руд, характера сростков рудных зерен, петрографического анализа для определения рудовмещающих пород; физико-механические исследования. Для сопоставления данных по ГП и МТП виды анализов, применяемых для изучения руды МТП, должны соответствовать видам анализов, характеризующих независимые признаки, выявленные при исследовании руд ГП. Особое внимание уделяется полному изучению качества руд в минералоготехнологических пробах, т. е. на этих рудах разрабатываются принципиальные схемы обогащения природных типов руд.

Подбор стандартных технологических схем для технологической оценки малых проб осуществляется на основе принципиальных схем обогащения, разработанных (по общепринятой методике) на минералоготехнологических пробах по природным типам руд. В связи с существенной разницей в объемах проб МТП и МТ следует прежде всего выявить необходимость внесения поправок в схему и режим обогащения малой пробы для корректного сопоставления результатов ее обогащения с минералоготехнологической. С этой целью выполняют серию технологических опытов на навесках (15-20 кг), отквартованных от МТ, придерживаясь принципа достижения максимальной сходимости результатов обогащения руд в обоих типах проб.

Учитывая колебания вещественного состава природных типов руд, для технологической оценки малых проб (отобранных по ПТР) необходима разработка моделирующих схем и режимов обогащения, чтобы обеспечить сходимость (сопоставимость) показателей обогащения минералоготехнологических и малообъемных проб. Моделирующие схемы и режимы разрабатываются на усредненных по разновидностям или типам руд пробах. При сопоставлении режимов и показателей обогащения МТП и МТ следует учитывать, что размер допустимых отклонений в расходе реагентов от средних значений не должен превышать $\pm 10-20$ % отн., а показатели обогащения не должны различаться более, чем на 20-25 % (инструкция № 1 «по малообъемному технологическому опробованию и картированию рудных месторождений при разведке» Мингео СССР, 1979 г.).

Технологическая оценка малообъемных проб. Малообъемные технологические пробы испытываются на обогатимость по соответствующим моделирующим схемам и режимам, подобранным для природных типов и разновидностей руд, которые представляют испытываемые пробы. В исходной руде и продуктах ее обогащения определяются содержания и формы нахождения основных и попутных полезных компонентов. Результаты технологических испытаний, а также данные анализов руды и продуктов обогащения по каждой пробе, документируются в стандартной табличной форме с обязательным указанием схемы и режима обогащения. По общепринятым (в обогатительной практике) расчетным формулам определяют основные параметры обогащения (выход концентрата, показатель

извлечения и содержание металла в концентрате) и проверяют баланс распределения металлов по продуктам обогащения.

В случае несоответствия баланса какого-либо металла его содержанию в исходной руде выполняются контрольные анализы и (по возможности) новые технологические исследования на дубликаты пробы.

Паспортизация руды, оформленная в виде документов постоянного хранения, необходима при проведении последующих работ, связанных как с геологическими (например, переоценка запасов), так и с технологическими построениями. Паспорта руды следует рассматривать как обязательный фактический материал к технологическим картам, который позволяет при необходимости пересмотреть возможные варианты этих карт, особенно при изменении технических условий на руды или технических возможностей обогащения.

2.3.6 Аппаратурный комплекс и методика изучения вещественных и физико-химических характеристик руд

В изучении связи параметров, характеризующих поведение составляющих руды минералов в процессах обогащения, в Восточном Казахстане выделяется 2 этапа.

Первый этап - анализ зависимостей показателей обогащения от особенностей вещественного состава. Исследования в этом направлении начали проводиться с 1932 г. на месторождениях Риддерского района (Филипповское, Риддерское, Сокольное и др.). Основной вклад в этом направлении был внесен в 1955-1986 гг. сотрудниками ДГП «ВНИИцветмет» И.А. Строителевым, В.И. Ярыгиным, М.К. Воронцовой, М.Б. Асмоловой и др. под руководством Л.С. Гецкина и А.П. Сычева []. Ими для исследований минерального состава использовались не только оптические методы анализа, но и физические методы, обеспечивающие оценку элементов-примесей в минералах (КАМЕКА 46) и особенностей внутреннего строения минералов (рентгенография). Большой вклад в эти исследования внесла разработка КИВЦЕТной технологии.

Второй этап оформился в 1986 г. на основе исследований К.г. Свешникова, И.Н. Плаксина, Р.Ш. Шафеева, В.А. Чантурия, В.А. Глембоцкого []. Были начаты исследования физико-химических свойств минералов и их влияния на протекания процессов обогащения руд.

Выполненный в лаборатории РГУКР ДГП «ВНИИцветмет» при участии автора анализ результатов этих исследований позволил определить комплекс параметров, подлежащих изучению при оценке технологических свойств руд. Основой комплексирования параметров явились следующие предпосылки:

- изучение вещественных и физико-химических свойств на различных уровнях:

 - на микроуровне - отдельных кристаллов,

 - на макроуровне - полиминеральных образований,

 - в пределах ПТР - как устойчивой в пространстве минеральной ассоциации;

- изучение перечисленных выше параметров в объеме месторождения с учетом всего комплекса генетических факторов, а также влияния оказывающих на нее истории, онтогении, которая определена на сессии Всесоюзного геологического общества в декабре 1983г., как «история жизни минералов» (В.А. Попов, В.И. Ревнивцев, Петров, Ю.Б. Генкин и др. []);

По И.А. Строителю, М.К. Воронцовой, Б.И. Вейц, В.И. Ярыгину, М.Б. Асмоловой [] основными вещественными параметрами, подлежащими изучению, являются следующие:

- формы нахождения основных рудных минералов в рудах и продуктах

переработки;

- состав нерудных минералов, входящих в руды;

- гранулометрический состав;

- текстурно-структурные особенности руд, характеризующие взаимоотношение минералов;

- элементарный состав минералов и руд.

По данным изучения физико-химических свойств руд г.г. Свешниковым, Ю.С. Рыссом и исследованиям, выполненным в ДГП «ВНИИцветмет» в 1986-2007 гг. (В.Д. Борцов, Ю.Б. Генкин, Н.В. Сулаквелидзе, Л.Б. Кушакова, А.С. Филатов []) основную роль в обогащении играют следующие *физико-химические параметры*:

- тип проводимости минералов и руд;
- электродный потенциал минералов, слагающих руды;
- удельное электрическое сопротивление минералов и руд;
- магнитные свойства минералов и руд;
- естественные макро- и микрогальванические элементы.

Для изучения выше перечисленных параметров в ДГП «ВНИИцветмет» организован аппаратный комплекс и разработана методика измерения. С 1998 г. в этих работах принимает участие автор.

Изучение вещественных характеристик руд

Для изучения особенностей вещественного состава руд и продуктов их переработки из кусков и керна руд изготавливаются полированные шлифы (аншлифы), из рыхлых продуктов (россыпей кор выветривания, продуктов флотационного обогащения и т.д.) - искусственные аншлифы (полированные брикеты), из нерудных составляющих руды и околорудных пород - прозрачные шлифы.

Для исследования *минерального состава, текстурно-структурных особенностей, размеров зерен* минералов, слагающих пробы, по аншлифам и брикетам используются микроскопы типа Neophot 21 и Polyvar (рисунок 2.1), позволяющие вести наблюдения в отраженном свете. Последний, дает возможность проводить наблюдения также и в проходящем свете и получать качественные снимки наблюдаемых поверхностей и сечений проб. Прозрачные шлифы преимущественно исследуются на микроскопе Polyvar [].

В последние годы в содружестве с АО «Казцинк-геология» используется микроскоп Аxioskop 40 (рисунок 2.2), укомплектованный цифровой камерой и компьютером с программным обеспечением, позволяющим в автоматическом режиме решать задачи количественных оценок содержания минералов и гранулометрического состава. При использовании микроскопов Neophot 21 и Polyvar решение этих задач производится к традиционным методам с помощью масштабных сеток, линеек. При значительной контрастности цвета рудных минералов разработана методика оценки количественных параметров на компьютере с использованием сканированных фотографий, полученных на микроскопе Polyvar.

Кроме аншлифов и шлифов для изучения рыхлых и россыпных образований используется бинокляр МБС-Р (рисунок 2.3). Под бинокляром проводился также отбор мономинеральных фракций из измельченных до класса

-1 мм исходных руд, предварительно разделенных магнитной сепарацией на магнитные и немагнитные продукты.

В сложных случаях, например, при содержании в аншлифах железосодержащих сфалеритов и титаномагнетитов, используется «магнитная удочка», описание которой приведено ниже, а также определение удельных сопротивлений зерен.

Оценка *элементарного состава руд и минералов* производится с помощью химического, абсорбционного, спектрального, рентгенорадиометрического методов. В ДГП «ВНИИцветмет» разработана спектральная аппаратура СПАРК-1, позволяющая выполнять количественное определение металлов. *Особенности внутреннего строения минералов* оцениваются с помощью рентгеноструктурного метода на устройстве ДРОН-1.

2.2 Изучение физико-химических характеристик руд

Изучение *электродных потенциалов* минералов, составляющих руды, проводится по компенсационной схеме с использованием высокоомного потенциометра ППТВ-1.

Электродом сравнения служит насыщенный хлорсеребряный электрод. Полученные значения потенциалов пересчитываются по отношению к водородному электроду.

Электрохимическая ячейка состояла из отдельных анодных и катодных пространств. Ячейка термостатировалась с точностью ± 1 °С. Для определения потенциалов из образцов минералов изготавливаются электроды цилиндрической формы размером: высота - 10 мм, диаметр - 5 мм, которые запрессовываются во фторопластовую обойму. Перед каждым измерением поверхность тщательно шлифовалась и полировалась. Электрический контакт электрода осуществлялся с помощью ртути и платиновой проволоки. Для приготовления исходных растворов использовали бидистиллят, серную кислоту и другие реактивы марки «Х.ч.». Содержание растворенного кислорода в экспериментах, измеренное на приборе фирмы Меттлер Толодо, составляло 7,34 мг/дм³. Из электродов различных минералов комбинировались соответствующие гальванические пары. Электрический контакт между составляющими гальванопар осуществлялся через утолщенные медные проводники, гальванометр и

Для оценки величины электродных потенциалов минералов в руде и содержаний минералов в кусках породы использовался метод КСПК, методика которого была разработана ПОД руководством Ю.С. Рысса при проведении совместных работ ВНИИцветмета и ВИРГа. В качестве измерителя использовалась аппаратура, разработанная в ВИРГе. Эта аппаратура была изготовлена в единичном экземпляре и использовалась только при исследованиях на Николаевском месторождении. В ДГП «ВНИИцветмет» использовалась аппаратура, изготовленная на базе потенциалостата. На ней проводилось изучение проб, отобранных на Рубцовском, Орловском и Николаевском месторождениях. В настоящее время не функционирует.

Для оценки *типа проводимости* и *удельного сопротивления* минералов в ДГП «ВНИИцветмет» разработана аппаратура АМ 88 (рисунок 2.5); принципиальная схема аппаратуры приведена на рисунке 2.6. Она позволяет оценить ТЗДС минералов в интервале температур от 25 до 6000С, рядовые массовые измерения этого параметра выполняются при температуре 100 ос. Минимальный размер зерен, допускающий измерение ТЗДС и удельное сопротивление - 0,5 мм.

Конструкция горячего электрода следующая: в титановом стержне (6) с заостренным концом помещены термонагреватель (7) из нихрома и платиново-родиевая термопара (8).

Холодный электрод изготовлен из стальной иглы. Нагревательный элемент замкнут на трансформатор, подающий напряжение 20 В. Термопара соединена с терморегулятором, настроенным на 1000С на конце иглы (горячий электрод). В блок терморегулятора входят усилитель и реле, которое отключает и включает ток в зависимости от температуры, измеряемой термопарой. Холодный и горячий электрод включены на вход усилителя измерительного блока.

Измерение удельного электрического сопротивления минералов в лабораторных условиях выполняется по дипольной схеме (два электрода приемных, два - питающих) с помощью четырех электродной установки (5) при частоте тока 172 Гц. Конструкция электродов (9), установленных по углам квадрата и изготовленных из титановых игл, позволяет выполнять измерение на зернах размером 0,5 мм. В измерителе смонтирован блок питания и усилитель. Конструкция блока питания обеспечивает в автоматическом режиме в питающей цепи постоянную величину тока, поэтому измеряемая разность потенциалов легко преобразуется в величину удельного сопротивления.

Изучение *суммарной величины тэд с руд в кусках (эффект Зеебека)* производится на аппаратуре, разработанной и изготовленной в ДГП «ВНИИцветмет» (рисунок 2.7). Подготовка исследуемого образца (пробы) заключается в организации плоских граней (торцов) для лучшего контакта с горячими холодными электродами. Изучение динамики изменения величины эффекта Зеебека при постоянной температуре во времени дает представление об особенностях распределения минералов с различной характеристикой

ТЗДС в объеме образца (чем дольше нагревается, тем больше объем захватывается неоднородностей больше).

Для измерения *удельного сопротивления руд* используется установка «Резонанс» (рисунок 2.9), разработанная и изготовленная в НПО «Цветметавтоматика» []. Измерения производятся на частоте 17,5 МГц.

Вызванная поляризация, характеризующая электрофизические свойства руд и минералов измеряется с помощью устройства С-001, разработанного и изготовленного в ЗаБНИИ. Его внешний вид показан на рисунке 2.10. Это устройство позволяет измерять ранние стадии ВП с изучением временных характеристик нарастания сигнала ВП во время пропускания импульса тока через породу, смоченную в воде, и спада сигнала после его выключения. Максимальная мощность поляризующего тока - 400 Вт; максимальная амплитуда тока в импульсе - 1А; частота следования импульсов тока - 20 Гц; время отсечки начальной части измеряемых импульсов напряжения - 0,1 мс; фиксированное время регистрации напряжения относительно момента коммутации тока - 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 1; 2; 4; 6; 10 и 20 мс; пределы измерения напряжения в приемной линии во время пропускания тока - 10-3000 мВ; ВП - 3-3000 мВ.

Начиная с 90-хх гг., во ВНИИцветмете проводятся исследования по изучению *природы естественных электрических полей и влияния их на технологические свойства руд*. В основу исследований были положены баковые лабораторные эксперименты, выполненные в конце 70-х гг. П.С. Ревякиным []. Им было установлено, что при нагревании верхней части пластины, изготовленной из кристаллических руд, в пространстве, прилегающем к модели, формируется электрическое поле (рисунок 2.11).

Эти эксперименты автором работы были повторены в 2000-2006 гг. при изготовлении модели из руд Орловского, Николаевского, Тишинского и Малеевского месторождений, характеризующихся различным по эффекту Зеебека пиритными матрицами. Было установлено, что во всех случаях при нагревании верхнего конца модели в пространстве, прилегающем к модели, фиксируются аномалии ЕП, знак которых соответствует эффекту Зеебека руд. При матрицах с электронной проводимостью эти аномалии имеют отрицательный знак, при дырочной - положительный.

2.3 Изучение магнитных свойств

Аппаратура, входящая в комплекс, включает каппаметр КТ-5, роликовый магнитный сепаратор, «магнитную удочку».

Каппаметр КТ-5 используется для оценки *магнитной восприимчивости руд и пород*.

«Магнитная удочка» изготовленная в лаборатории РГУКР, представляет собой горизонтальные весы, коромысло которых изготовлено из высококоэрцитивного магнита. Это устройство позволяет выделять в аншлифах зерна минералов с повышенной *намагниченностью*.

Магнитная проницаемость руд и минералов оценивается с использованием устройства «Резонанс», в состав которого, кроме электрического канала входит магнитный канал.

Роликовый магнитный сепаратор (рисунок 2.13) используется для решения следующих задач: *выделение магнитных минералов* из продуктовобогачения и руд, измельченных до заданного размера, определяемого порезультатам минералогических исследований (гранулометрический состав). Сепарация производится при нескольких значениях силы тока в катушках электромагнита, определяется магнитная восприимчивость минералов выделенных фракций, предварительно под бинокулярном удаляются другие минералы, изготавливается брикет и уточняются особенности минерального состава. Эта технология позволяет оценить количественное содержание магнитных минералов в выделенных фракциях и их соотношение. На рисунке 2.14 показаны результаты магнитной сепарации цинкового концентрата метаморфизованных медно-цинковых руд Малеевского месторождения. Как видно из этой информации, в первую магнитную фракцию, выделенную

присиле тока 0 А в катушках сепаратора, присутствует значительное количество халькопирита, а сфалерит отмечается лишь в виде единичных зерен и сростков с халькопиритом. В последующие магнитные фракции, выделенные присиле тока в катушках сепаратора, равной 0,6 и 1, 2, 3, 4 А, халькопирит наблюдается лишь в виде редких зерен и вкрапленников в сфалерите. Это послужило основанием для утверждения, что халькопирит первой магнитной фракции характеризуется наибольшей магнитной восприимчивостью.

При анализе результатов измерений использовались методы математической статистике в программе MO Excel, MathCAD и в программе FSON3, разработанной в лаборатории НЦ КПМС РК В.Л. Лосем .

3 ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Классификация природных типов руд полиметаллических месторождений.

В общем виде в основу геолого-технологического картирования должна быть положена классификация природных типов и разновидностей руд.

Для учета типоморфных генетических особенностей полиметаллического оруденения — поликомпонентности, широкого диапазона и зонального характера изменчивости качества и технологических свойств руд требуется, чтобы при выделении приходных категорий руд использовалась единообразная система опознавательных признаков качества руды и количественные критерии, обеспечивающие однозначную геометризацию выделенных категорий руд.

К числу основных опознавательных признаков качества относятся характер рудной массы — набор и соотношение основных металлов, характер рудной основы — соотношения основных рудных минералов меди, свинца и цинка с пиритом и баритом, интенсивность оруденения — абсолютные содержания основных металлов, степень окисления и размерность зерен рудных минералов. К вспомогательным признакам относятся текстурно-структурная характеристика руд, содержание элементов-примесей, содержание основных породообразующих минералов. В тех случаях, когда текстурно-структурная характеристика имеет количественное выражение, этот признак следует считать основным (опознавательным).

В предлагаемой классификации природных типов руд полиметаллических месторождений (табл. 1) использованы только основные опознавательные признаки. Критериями выделения ПТР являются заданные параметры качества — граничные значения признаков, подобранные с учетом утвержденных кондиций на полиметаллические руды и данных по их обогащению.

Минимально учитываемое в классификации содержание компонента принимается равным или больше бортового. В тех случаях, когда бортовое содержание не утверждалось, рекомендуется учитывать лишь те компоненты (из числа основных), содержания которых превышают 5-10 % (относительно суммы содержаний всех основных компонентов). При этом пятипроцентный уровень принимается, если сумма абсолютных содержаний всех основных компонентов более 10 %. Для барита и пирита минимально учитываемое содержание принимается равным 20 % (относительно суммы содержаний галенита, сфалерита, халькопирита, барита и пирита). Как показывает опыт обогащения полиметаллических руд, при содержаниях основных и попутных компонентов в рудах ниже указанных пределов, эти компоненты, как правило, в самостоятельные концентраты не извлекаются.

При пользовании классификацией необходимо исходить из следующего обстоятельства. Каждый опознавательный признак ПТР имеет порядковый номер, обозначенный римскими цифрами (от I до V). Природные типы руд, выделяемые по каждому конкретному признаку, нумеруются арабскими цифрами. Название ПТР формируется путем последовательного суммирования названий по всем учитываемым признакам. При этом соблюдается принцип доминирования для составляющих каждый признак параметров качества руды: при перечислении однотипных характеристик последней называется характеристика, имеющая наибольшее значение. Для унификации названий выделяемых ПТР и во избежание громоздких перечислений всех названий признаков ПТР, а также для наглядности при сопоставлениях различных типов руд и для подготовки данных к машинной обработке, рекомендуется применение символического обозначения ПТР:

$$\text{ПТР} = \sum \text{П}_N^T,$$

где: П — основной опознавательный признак ПТР;
N — порядковый номер признака;

T — порядковый номер ПТР, выделяемого по данному признаку.

Пример обозначения:

$$\text{ПТР}_I = \text{П}_I^8 + \text{П}_{II}^7 + \text{П}_{III}^2 + \text{П}_{IV}^2 + \text{П}_V^7$$

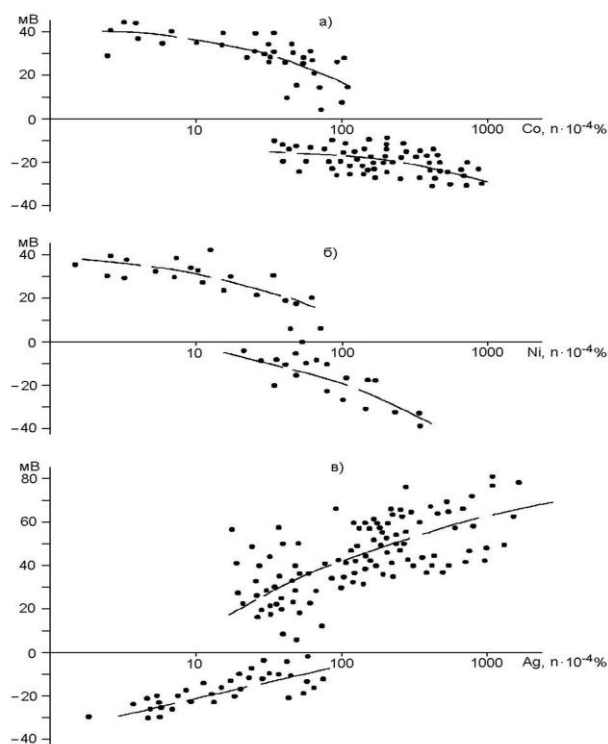
Расшифровка: свинцово-цинковый, полиметаллически-баритовый, богатый, смешанный, мелко-зернистый.

В связи с тем, что классификация носит обобщающий характер, в применении к конкретным месторождениям в нее могут вноситься коррективы, касающиеся количественных значений каких-либо из опознавательных признаков или дополнения, связанные с необходимостью привлечения вспомогательных признаков. При этом рекомендуется использовать схематическую геолого-технологическую систематику полиметаллических месторождений, составленную с учетом взаимосвязи их генетических особенностей с основными технологическими свойствами руд (П. I.).

3.1 Петрофизические основы флотационного обогащения

Флотационные процессы обогащения полезных ископаемых базируются на взаимодействии реагентов флотационной пульпы с поверхностью минералов. Особенностью рудных минералов колчеданно-полиметаллических месторождений является то, что все они относятся, в электрофизическом смысле, к классу полупроводников. Проведенные во ВНИИцветмете с участием автора настоящей работы лабораторные работы показали, что природа их полупроводниковых свойств связана с элементами-примесями. На рисунке 16 показана зависимость термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) пиритов Николаевского колчеданно-полиметаллического месторождения от содержаний в них некоторых элементов-примесей. Следует отметить, что вхождение элементов-примесей в решетку минералов обуславливается термо-баро-геохимическими условиями образования минералов. Полигенность, многостадийность формирования руд колчеданно-полиметаллического месторождения Рудного Алтая (Иванкин П. Ф., Попов В. В., Горжевский Д. И., Стучевский Н. И., Мысник А. И., Кузубный В. С. и др.) обусловили различный состав и концентрацию элементов-примесей, а следовательно, и электрофизических свойств, одноименных рудных минералов, образовавшихся на различных стадиях становления месторождения.

Природа взаимодействия реагентов с поверхностью минералов определяется тем, что граница твердой и жидкой фаз обладает некоторым избытком поверхностной энергии, одним из главных следствий чего является существование электрического поля поверхности частиц. В этом электрическом поле выделяются дальнедействующая (региональная) и короткодействующая (локальная) составляющая. Первая возникает при образовании избытка одноименных зарядов на поверхности минералов или является следствием дипольно-поляризационного смещения в ней электрических зарядов при адсорбции реагентов. Напряженность этого электрического поля поверхности минерала является основным фактором, определяющим вероятность достижения ионами и молекулами реагента поверхности минерала. Короткодействующая составляющая потенциального электрического поля обуславливается ван-дер-ваальсовыми адсорбционными и химическими обменными силами. Она обеспечивает закрепление флотационного реагента на поверхности частиц. Механизм формирования электрического поля частиц минералов в жидкой фазе рассматривается в работах Глембоцкого В. А. (1973, 1980), Шафеева Р. Ш. (1960, 1963, 1977), Чантурия В. А. (1900, 1977), Плаксина И. М. (1969, 1977) и др.



a — зависимость термо-ЭДС пиритов от содержания кобальта; *б* — зависимость термо-ЭДС пиритов от содержания никеля; *в* — зависимость термо-ЭДС пиритов от содержания серебра

Рисунок 16 — Корреляционная зависимость электрофизических свойств дисульфидов железа Николаевского месторождения от содержания элементов-примесей

В общем случае электрический потенциал поверхности является следствием совместного протекания двух процессов: растворения ионов в поверхности минерала и появления заряда на поверхности при растворении. Процесс растворения продолжается до тех пор, пока не будет достигну минимум свободной энергии всей системы «минерал-раствор» и не установится равновесное электрически нейтральное состояние. При этом вблизи границ раздела фаз по обе стороны формируется слой, называемый двойным электрическим слоем. Равновесному состоянию каждой химической системы отвечает двойной электрический слой определенного строения, характеризующийся определенной величиной емкости и тока обмена. Возможные модели двойного электрического слоя рассмотрены в работах Гельмгольца (1953), Гуи (1970), Чапмана (1913), Штерна (1924), Фрейдлиха (1948) и др. На рисунке 17 показана модель двойного электрического слоя, характерного для сульфидов, обладающих полупроводниковыми свойствами. Главной особенностью этой модели является протяженность границы раздела не только в пределах жидкой фазы, но и вглубь от контакта тел. Толщина границы раздела представляется в виде суммы дебаевской длины экранирования в минерале и толщины двойного электрического слоя в жидкости. Основными факторами, обуславливающими толщину переходного межфазного слоя, являются электрический потенциал границы раздела фаз и плотность электрического заряда свободных электронов и дырок, находящихся в поверхностном слое минерала в пределах дебаевской длины.

3.2 Петрофизические основы гидрометаллургического обогащения

Гидрометаллургические методы обогащения на Рудном Алтае планируются для освоения забалансовых руд, минерализованных вскрышных пород, отвальных продуктов обогащения, маломощных месторождений цветных металлов со сложной горно-геологической характеристикой, разработка которых традиционными системами горных

работ не укладывается в нормы рентабельности, а также месторождений с упорными, труднообогатимыми рудами.

Для переработки указанных видов низкокачественного сырья в мировой практике, в том числе Казахстана, используются или планируются методы подземного, кучного и чанового выщелачивания из них цветных металлов. В последние десять-пятнадцать лет эти три вида технологических процессов интенсифицируются за счет применения микробиологического окисления сульфидных минералов. В любом из способов гидрометаллургического извлечения цветных металлов первой технологической операцией является перевод металлов из содержащих их минералов в раствор, то есть собственно операция выщелачивания, которая осуществляется при непосредственном вымывании металлов растворителем (в основном из окисленных руд) или путем предварительного окисления минералов, совмещенного по месту и времени с их растворением (для сульфидных руд). Затем раствор освобождается от взвеси в отстойнике и поступает в отделение, где из него методами цементации, электролиза или экстракции извлекается металл. Далее раствор после соответствующей корректировки химического состава направляется в оборот для использования при выщелачивании или сбрасывается в отвал.

Все три способа гидрометаллургического обогащения базируются на одних и тех же реакциях взаимодействия рудных металлов с растворителем.

Как указывалось выше, сульфидные минералы руд колчеданно-полиметаллических месторождений относятся к классу полупроводников. Проведенные во ВНИИцветмете исследования с участием автора свидетельствуют о том, что окисление сульфидных минералов руд колчеданно-полиметаллических месторождений определяется следующими двумя процессами:

- химическим окислением (на поверхности сульфидов-полупроводников протекание этого процесса связано с их химической активностью, которая в свою очередь определяется положением уровня Ферми);

- работой естественных гальванических элементов, образованных сростками минералов с резко различными электрофизическими свойствами, а также контактирующими минеральными обособлениями, отличающимися по электрофизическим свойствам.

В 1998-2003 гг. во ВНИИцветмете были проведены экспериментальные исследования по моделированию формирования и работы гальванических элементов образованных природными сростками минералов. Из труднообогатимых руд были приготовлены мономинеральные электроды цилиндрической формы, которые запрессовывались во фторопластовую обойму. Рабочей поверхностью электродов служили основания цилиндров. Электрический контакт электродов осуществлялся с помощью ртути и платиновой проволоки. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

В экспериментах 1 и 5 халькопиритовый и сфалеритовый электроды находятся непосредственном контакте. Располагаются в емкости с дистиллированной водой. В экспериментах 2 и 6 оба электрода находятся в емкости с дистиллированной водой, удалены друг от друга на 10-15 мм, то есть непосредственно не контактируют. В экспериментах 3 и 7 в емкости дистиллированной водой располагается лишь электрод халькопирита, в экспериментах 4 и 8 — электрод сфалерита.

Халькопирит в электроде характеризуется электронной проводимостью, сфалерит — дырочной проводимостью.

Из таблицы 2 следует:

- при образовании гальванической пары халькопирит+сфалерит переход в раствор меди и цинка увеличивается почти в два раза (эксперимент 1, 5) по сравнению с отдельным выщелачиванием халькопирита и сфалерита (эксперименты соответственно 3, 7 и 4, 8);

- некоторое повышение извлечения в раствор металлов при совместном нахождении неконтактирующих электродов халькопирита и сфалерита по-видимому связано с образованием ионной электрической связи.

Таблица 2 — Влияние гальванических элементов сфалерит+халькопирит из руд Николаевского колчеданно-полиметаллического месторождения на переход в раствор меди и цинка (по Л.Б. Кушаковой)

Номер эксперимента	Минерал	Содержание, %			
		меди в растворе через		цинка в растворе через	
		24 часа	48 часов	24 часа	48 часов
без продувки воздуха					
1	халькопирит+сфалерит	0,31	0,49	1,57	1,77
2	халькопирит, сфалерит	0,18	0,23	0,64	0,77
3	халькопирит	0,17	0,19	–	–
4	сфалерит	–	–	0,21	0,28
с продувкой воздуха					
5	халькопирит+сфалерит	0,35	0,54	1,70	1,85
6	халькопирит, сфалерит	0,20	0,25	0,75	0,88
7	халькопирит	0,18	0,19	–	–
8	сфалерит	–	–	0,25	0,33

3.3 Электрофизические свойства руд и основных рудных минералов колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая

Основными электрофизическими свойствами рудных минералов и руд, оказывающих влияние на протекание процессов флотационного и гидрометаллургического обогащения, как следует из информации, изложенной в предыдущих главах, являются:

- тип проводимости сульфидов-полупроводников, определяющих взаимодействие реагентов с поверхностью этих минералов;
- удельное сопротивление минералов, определяющее скорость сорбции (силу взаимодействия молекул реагентов и минеральных частичек в пульпе);
- формирование сростков и минеральных обособлений с резко различными электрофизическими свойствами, образующих естественные электрические элементы, влияющие на протекание электрохимических реакций.

В таблице 3 приведена характеристика термо-ЭДС и удельного сопротивления сульфидных минералов руд основных месторождений Рудного Алтая. Из приведенной информации следует, что термо-ЭДС и удельное сопротивление сульфидов, слагающих руды, колеблется в широких пределах. Причиной этого является:

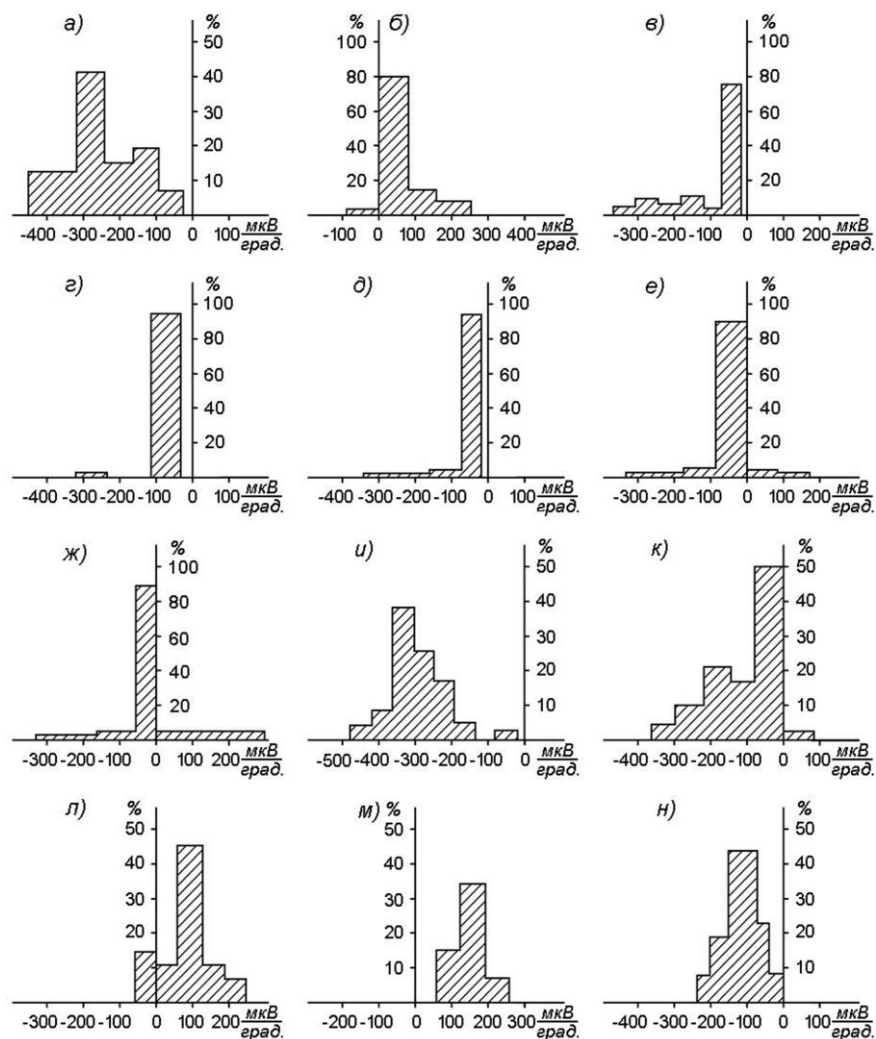
- полупроводниковая природа сульфидов руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая по данным исследований П. С. Ревякина, В. Д. Борцова, Д. В. Титова и др. связана с составом и концентрацией в них элементов-примесей;
- исследованиями В. И. Вернадского, В. М. Гольдшмидта, А. Е. Ферсмана, А. К. Болдырева, С. С. Смирнова и др. установлено, включение элементов-примесей в кристаллические решетки минералов определяется термо-баро-геохимическими условиями их формирования;
- по условиям генезиса колчеданно-полиметаллические месторождения являются полигенными и полихронными (Горжевский Д. И., Яковлев Г. Ф., Иванкин П. Ф., Кузубный В. С., Иншин П. В., Воробьев Ю. Ю., Стучевский Н. И., Панкуль Л. И., Каюпов А. К., Кузьменко М. А. и др.).

Таблица 3 — Характеристика электрофизических свойств рудных минералов колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая

Месторождение, минералы	Термо-ЭДС, мВ/град.						Удельное электрическое сопротивление, Ом·м					
	п-проводимость			р-проводимость			п-проводимость			р-проводимость		
	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
I. Николаевское месторождение												
А. Метаколлоидные руды												
Марказит	–	–	–	14,6	62,0	48,0	–	–	–	–	–	–
Пирит	–	–	–	3,0	49,0	12,0	–	–	–	–	–	–
Халькопирит	-33,4	-19,0	-26,0	–	–	–	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	5,2	$9,0 \cdot 10^{-2}$
Сфалерит	-3,4	0,0	–	0,1	2,1	–	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^4$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^4$
Пирротин	–	–	–	0,8	3,2	–	–	–	–	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Мельниковит, мельниковит-пирит	–	–	–	11,8	27,1	16,0	–	–	–	$6,7 \cdot 10^{-2}$	1,42	$3,5 \cdot 10^{-1}$
Б. Переходные руды												
Пирит	-13,3	-1,2	-3,4	5,2	23,6	8,4	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,7	$8 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	1,4	0,6
Халькопирит	-2,6	-2,4	-23,3	–	–	–	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
В. Кристаллические руды												
Пирит	-12,3	-2,5	-6,1	–	–	–	$15 \cdot 10^{-6}$	1,1	$2 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
Халькопирит	-58,4	-20,8	-28,4	–	–	–	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
II. Малеевское месторождение												
Пирит	-14,6	-6,7	-8,2	3,8	15,2	4,6*	$2,7 \cdot 10^{-5}$	5,2	$3,4 \cdot 10^{-2}$	–	–	–
Халькопирит	-35,6	-100*	-24,5	–	–	–	$3,2 \cdot 10^{-5}$	1,1	$2,2 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
Сфалерит	-0,8	0,0	–	0,27	4,3	1,4	–	–	–	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^6$	–
Пирротин	–	–	–	0,8	4,6	2,1	–	–	–	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$124 \cdot 10^{-5}$
Галенит	-38	-16,4	-29,2	–	–	–	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^2$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
III. Орловское месторождение												
Пирит	-18,0	0,2	-16,0	0,1	22	13,3	$9,4 \cdot 10^{-4}$	1,1	$8,18 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$	1,8	$2,1 \cdot 10^{-1}$
Халькопирит	-52,4	-18,3	-28,0	–	–	–	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
Галенит	-48,0	-0,8	-32,0	0,1*	3,4*	–	$13,2 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-1}$	–	–	–	–
Сфалерит	-8,2	0,0	–	0,2	4,2	–	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^7$	–	–	–	–

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IV. Тишинское месторождение												
Пирит	-14,3	-2,8	–	4,2	12,3	–	$1,2 \cdot 10^{-4}$	8,0	$5,0 \cdot 10^{-2}$	–	–	–
Халькопирит	-32,5	-16,1	-26,0	–	–	–	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
Галенит	-33,5	-18,6	-29,6	–	–	–	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,86	$7,1 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
I. Серно-колчеданные руды												
Пирит	-28,0	-2,2	-13,5	0,1	16,3	9,4	–	–	–	–	–	–
Халькопирит	-18,0*	-8,3*	-12,0*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	-36,6	-24,2	-29,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Галенит	-35,3	-12,0*	-25,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
II. Медно-колчеданные руды												
Пирит	-32,0	-0,15	-12,0	0,56*	20,0*	13,0*	–	–	–	–	–	–
Халькопирит	-38,3	-24,5	-32,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
III. Существенно медные руды												
Пирит	-36,3	-4,2	-19,6	4,3*	29,6*	16,0*	–	–	–	–	–	–
Халькопирит	-16,0*	-3,7*	-12,0*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	-21,4	-36,3	-29,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Галенит	-37,0	-15,0	-27,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
IV. Существенно цинковые руды												
Пирит	-28,0	0,0	-12,3	0,1	16,0	8,4	–	–	–	–	–	–
Халькопирит	-35,6	-20,0	-28,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Галенит	-34,5	-15,8	-24,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
V. Медно-цинковые руды												
Пирит	-27,0	-4,3	-12,2	4,2*	11,9*	8,3*	–	–	–	–	–	–
Халькопирит	-35,3	-20,3	-28,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Галенит	-30,4	-12,3	-20,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–
VI. Полиметаллические руды												
Пирит	-31,8	-3,72	-15,8	4,0*	18,3*	9,4*	–	–	–	–	–	–
Халькопирит	-34,5	-20,0	30,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Галенит	-36,2	-8,3	-21,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Примечание – Минералы со значком * пользуются ограниченным распространением.												



а — термо-ЭДС галенитов; *б-ж* — термо-ЭДС сфалеритов, содержащих микровключения пиритов (*б*), эмульсионные включения халькопирита (*в*), микровключения галенита (*з*), включения галенита и халькопирита (*д*), включения пирита и халькопирита (*е*), включения галенита и пирита (*ж*); *и* — термо-ЭДС халькопирита; *к* — термо-ЭДС халькопирита, содержащего включения пирита; *л-н* — термо-ЭДС пиритов переходных (*л*), метакolloидных (*м*), кристаллических (*н*) руд

Рисунок 19 — Гистограммы распределения термоэлектрических свойств рудных минералов Николаевского месторождения

3.3.2 Электрофизические свойства руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. При одновременном измерении величины термо-ЭДС зерен кристаллов, имеющих разные знаки, результирующая термо-ЭДС будет пропорциональна доле участка и в величине ЭДС кристаллов преобладающего знака. П.С. Ревякиным для обозначения суммарной величины термо-ЭДС минералов в руде для отличия от термо-ЭДС каждого из минералов введен термин «эффект Зеебека».

Выполненные измерения эффекта Зеебека в карьере Николаевского колчеданно-полиметаллического месторождения с помощью разработанной им аппаратуры позволили сделать следующие выводы:

- эффект Зеебека применим при изучении вещественного состава сульфидных руд в горных выработках;

– величина эффекта Зеебека при регистрации ее в горных выработках не зависит от положения холодного электрода по отношению к «горячему» и не зависит (в определенных пределах) от омического сопротивления измерительной цепи.

В таблице 4 приведена характеристика эффекта Зеебека для руд основных колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая.

Измерение эффекта Зеебека проводилось в основном в кусках и кернах руды размером 35-210 мм. Исключение составляют руды Николаевского месторождения. Эффект Зеебека измерялся не только в кусках, но и непосредственно в стенках горных выработок П.С. Ревякиным, В.Д. Борцовым, А.С. Филатовым с помощью аппаратуры, разработанной П.С. Ревякиным.

Таблица 4 – Эффект Зеебека руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая

Месторождение, природные типы руд	Тип проводимости, мкВ/град.					
	преобладание электронной проводимости			преобладание дырочной проводимости		
	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	сред.
I. Николаевское месторождение						
Метаколлоидные руды	–	–	–	98	510	275
Переходные руды	–258	–0,63	–125	18,7	420	110
Кристаллические руды	–520	–110	–315	–	–	–
II. Орловское месторождение						
Полиметаллические руды	–480	–18	–276	5	520	206
Медно-колчеданные	–590	–127	–360	–	–	–
III. Малеевское месторождение						
Полиметаллические руды	–510	–12,8	–260	34	490	211
Медно-цинковые руды	–605	–208	–418	–	–	–
IV. Рубцовское месторождение						
Полиметаллические руды	–390	–23	–186	11,8	620	316

При анализе результатов желательно иметь представление по особенностям распространения в рудном теле руд с различным типом проводимости (эффект Зеебека). Возможны варианты, приведенные ниже.

По электрофизическим свойствам в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений устанавливается следующая дифференциация минералов:

– пириты металлоидных руд характеризуются дырочной проводимостью и максимальными значениями удельного сопротивления среди дисульфидов железа;

– пириты руд, характеризующихся типичными кристаллическими структурами (гипидиоморфнозернистыми, аллотриоморфнозернистыми, панидиоморфнозернистыми и т. п.), не содержащих колломорфных структур, имеют электронную проводимость и минимальное значение удельного электрического сопротивления;

– низкотемпературные сульфиды железа, в том числе осадочного происхождения, характеризуются дырочной проводимостью (мельниковит, мельниковит-пирит, марказит);

– пирротины характеризуются, в основном, дырочной проводимостью и самым низким удельным сопротивлением среди сульфидов (по этому параметру они близки к металлам);

– халькопириты обладают только электронной проводимостью, причем значения термо-ЭДС не превышают –20 мкВ/град. (исключение составляют зерна, содержащие микровключения пирита), по удельному электрическому сопротивлению занимают второе место после пирротина;

– галениты имеют электронную проводимость, а их удельное электрическое сопротивление несколько больше удельного сопротивления халькопиритов (единичные зерна галенитов с дырочной проводимостью обнаруживаются лишь в рудах Орловского месторождения);

– электронная проводимость сфалеритов связана с присутствием в них эмульсионной вкрапленности халькопирита. Дырочная проводимость характерна для железосодержащих сфалеритов (марматитов). Сфалериты с термо-ЭДС более 3,5 мкВ/град. характеризуются повышенной магнитной восприимчивостью. Термо-ЭДС сфалеритов, не содержащих эмульсионной вкрапленности халькопиритов и железа, равна нулю. Сфалериты характеризуются высокими значениями удельного электрического сопротивления. Самые низкие из измеренных значений этого параметра обнаруживаются у зерен с повышенной магнитной восприимчивостью или содержащих микрозернистую вкрапленность халькопиритов вдоль плоскостей спайности (рисунок 20).

Изучение особенностей электрофизических свойств сульфидных минералов в рудах, характеризующихся различными типами суммарной проводимости и ее величиной, показало, что они находятся в тесной корреляционной связи. Отсюда представляется возможным оценить технологические свойства руд по измерению термо-ЭДС наиболее распространенного минерала. На рисунке 21 показана зависимость извлечения меди и цинка при флотации руд, характеризующихся пиритной матрицей с дырочной, электронной и смешанной проводимостью. Из этой информации следует, что при различных типах проводимости содержание металлов в рудах практически не влияют на извлечение:

– максимальное извлечение металлов наблюдается из руд с электронной матрицей при минимальных концентрациях меди и цинка в исходной руде;

– несколько меньше металлов извлекается из руд с дырочной проводимостью пиритов;

– минимальное извлечение металлов имеет место из руд с пиритной матрицей со смешанной проводимостью.

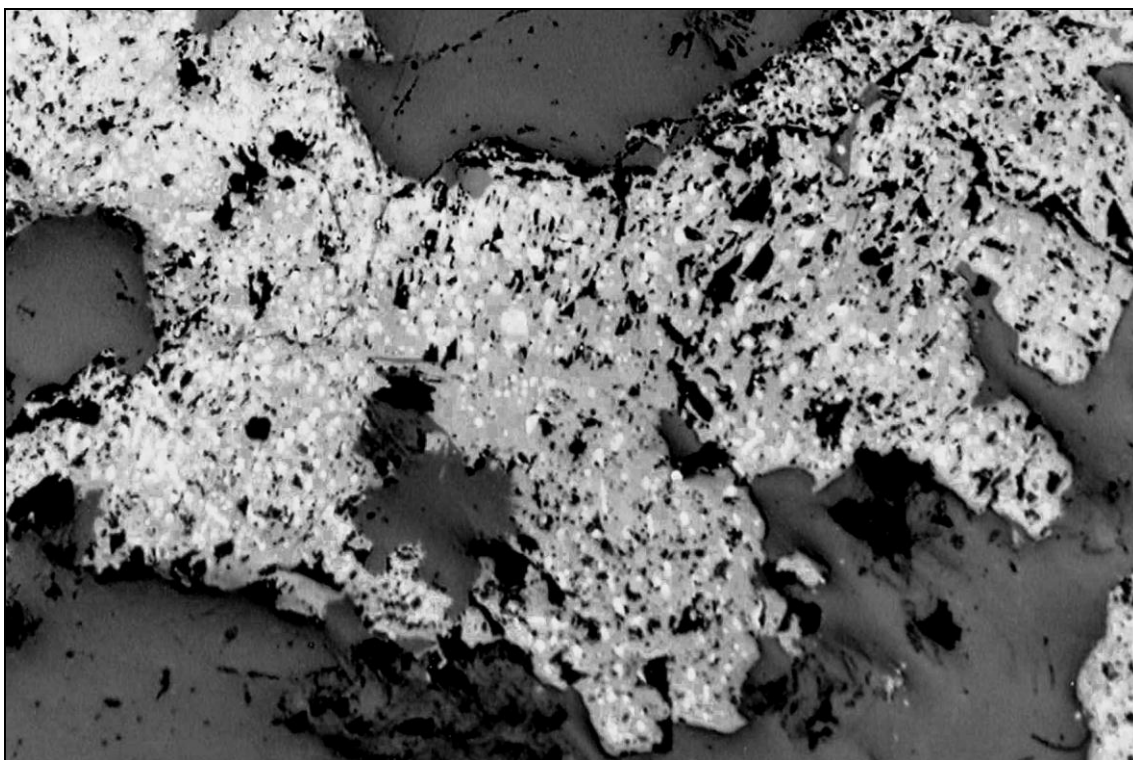
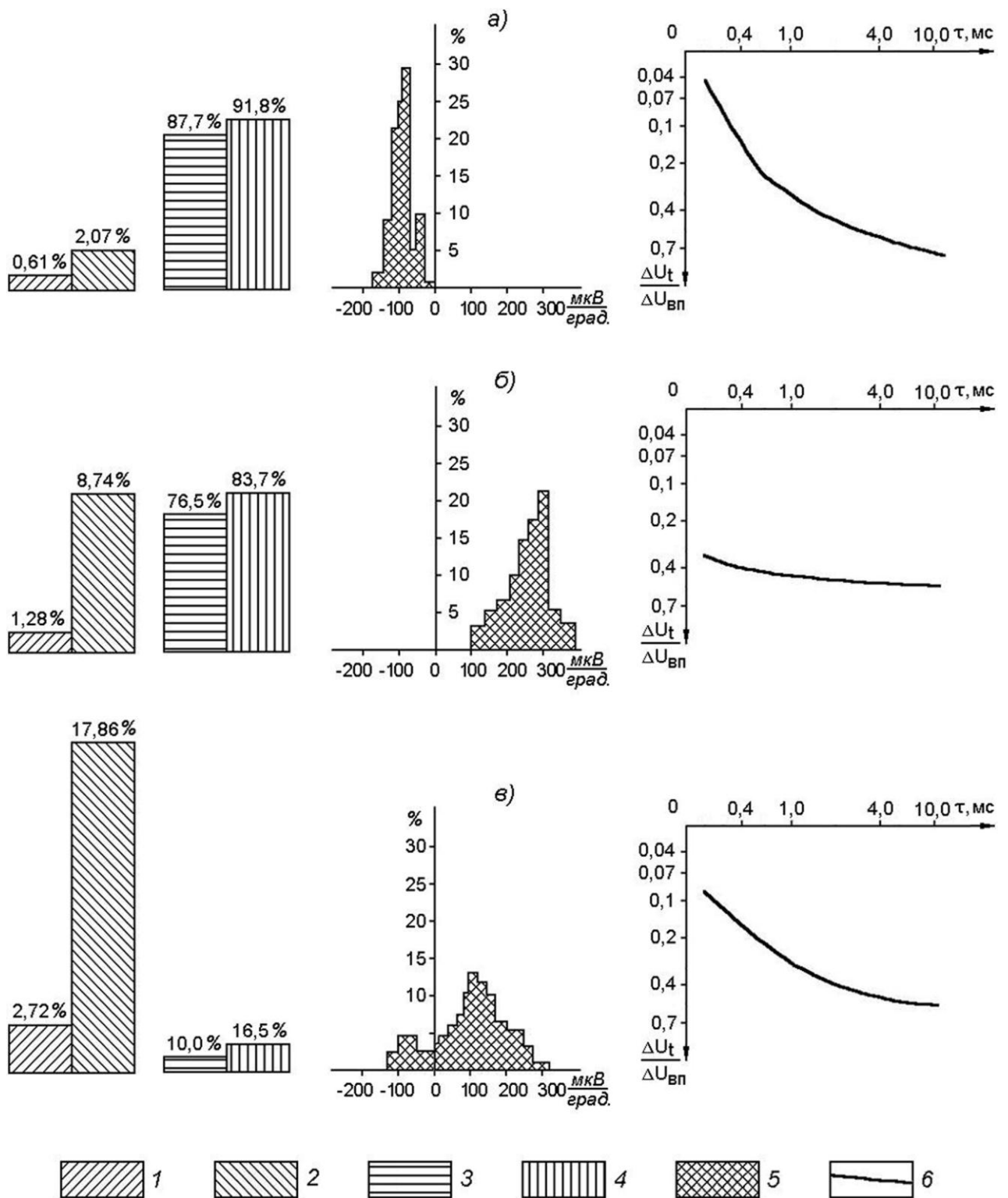


Рисунок 20 — Эмульсионная вкрапленность халькопирита (белый) по сфалериту (светло-серый)



a-b — руды с пиритной матрицей электронной (*a*), дырочной (*б*) и смешанной (*в*) проводимости; 1 — содержание меди в исходной руде, 2 — содержание цинка в исходной руде, 3 — извлечение меди в медный концентрат, 4 — извлечение цинка в цинковый концентрат, 5 — распределение термо-ЭДС пиритов, 6 — график зависимости характера спада ранних стадий ВП от типа проводимости пиритной матрицы

Рисунок 21 — Зависимость извлечения меди и цинка при флотации руд, характеризующихся пиритной матрицей с различным типом проводимости

3.4 Петрофизические основы систем управления качеством добываемых руд

Вовлечение в эксплуатацию труднообогатимых руд требующих селективной добычи и переработки, бедных руд со сложными горно-геологическими условиями, применение для их отработки высокопроизводительного горного оборудования и систем с массовым обрушением снижают качество сырья, поступающего на обогащение, усложняют технологические схемы его переработки. Этим объективным отрицательным фактором, понижающим эффективность процессов обогащения, в настоящее время противопоставляется система управления качеством добываемых руд или система рудоподготовки. В последние годы благодаря экспериментальным работам ВНИИцветмета, Механобра, НПО «Союзцветметавтоматика» и др. открылась возможность вовлечения в переработку, с помощью этой системы, значительной части руд, относимых к забалансовым.

В основу такой системы заложена принципиально новая стратегия обогащения, основное отличие которой от традиционной технологии состоит в том, что она предусматривает предварительную концентрацию полезных компонентов в отбитой руде, разделение руд по минеральному составу, текстурно-структурным особенностям и содержанию элементов на технологические типы и сорта. Эффективность процесса технологии управления качеством руд определяется следующими факторами: коэффициентом рудоносности и коэффициентом разубоживания руд при добыче. Чем ниже рудоносность и выше разубоживание, тем эффективнее протекают процессы предварительной концентрации. Общетеоретические основы этой технологии – представление о контрастности руд (Архипов О. А., 1985, Мокроусов В. А., Лилеев В. А., 1979, Кремнев И. А., Мильчаков В. И., 1986), а ее методическая и техническая база – плотностные, ядерно-физические, электрофизические характеристики руд, методика, технология их оценки и организаций обогащения с использованием этих характеристик в качестве разделительных критериев.

Работами Б. П. Лемана, Е. И. Крапивского, В. И. Ревнивцева, Ю. Б. Генкина, В. Д. Борцова и др. было установлено, что эффективное функционирование системы управления качеством руд возможно лишь при многоуровневой ее организации, обеспечивающей последовательное сокращение объема добытой горнорудной массы с одновременным увеличением предконцентрации полезных компонентов. В связи с этим оформились следующие разновидности методов управления качеством руд: крупнопорционная, мелкопорционная сортировки и покусковая сепарации.

К настоящему времени А. Ю. Большаковым (1989), Б. Г. Егизаровым (1978), Е. И. Крапивским (1985), Г. Г. Козловым (1984), М. И. Кротковым (1973, 1983), Е. П. Леманом (1985, 1990), Э. Г. Литвинцевым (1976), В. А. Мейером (1984), В. А. Мокроусовым (1976), А. П. Соцким (1979) разработаны методика и аппаратура, базирующаяся на использовании следующих порций:

- крупные порции, равные объемам кузовов вагонов, автомобилей, вагонеток и используемые для организации крупнопорционной сортировки в транспортных потоках;
- мелкие порции весом 10-200 кг и более, используемые при организации мелкопорционной сортировки на лентах транспортера;
- куски класса $-150+10$ мм, используемые при организации покусковой сепарации;
- отдельные зерна рудных минералов, сростки зерен различных минералов размером от 3 до 0,05 мм (с таким кластическим материалом работают при организации различных видов сепараций, в том числе и при работе с пульпой).

Эффективность методов сортировок и сепараций, согласно работам О. А. Архипова (1986), А. Ю. Большакова (1989), Г. Г. Козлова (1977), Е. И. Крапивского (1985), В. И. Ревнивцева, Т. Г. Рыбаковой, Е. П. Лемана (1983, 1987, 1990), Л. Ч. Пухальского (1983) и др. определяется следующими факторами:

- степенью изменчивости распределения полезных компонентов, форм нахождения их в порциях, используемых при сортировках и сепарациях;

- глубинной связи содержаний полезных компонентов в порциях с физическими параметрами, принятыми в качестве разделительного критерия;
- эффективность сепарации дополнительно зависит от разделения после дезинтеграции исходной горнорудной массы на сепарируемый (машинный) и несепарируемый классы, а также от характера распределения между ними полезных компонентов.

Понятие «изменчивость» характеризует сложность строения объекта и выражает внутренние связи между значениями параметра, относящимися к разным точкам пространства (Букринский, Коробченко, 1972). В этом понятии реализуется связь между двумя определениями объекта — субстациональным и пространственно-временным. При этом объектом рассмотрения является не фактически существующая в природе «абсолютная» изменчивость, а «наблюдаемая» изменчивость, отражающая с одной стороны, в той или иной степени методику проведения замеров (Четвериков, 1968), с другой стороны, размеры и конфигурацию выделяемых порций. Таким образом, при оценке неоднородности изучаемого объекта он рассматривается как состоящий из множества элементов и характеризуется путем сопоставления этих элементов.

3.4.1 Гравитационное обогащение. Условие эффективного применения гравитационных методов обогащения — достаточная разница в плотности разделяемых минералов. Крупность обогащаемого минерала находится в пределах 0,02-300 мм. Гравитационные методы обогащения реализуются в сложных многокомпонентных и многофазовых взвесах. Расслоение зерен, кусков достигается по одному из разделительных признаков путем гидро- и аэродинамических воздействий на минеральную смесь. На Рудном Алтае из всего многообразия гравитационных методов используется обогащение в тяжелых средах (А. В. Богданович, Г. И. Иванов, А. Д. Кубарев, Е. И. Шумская, Г. Г. Штойк, 1970-1992), в основе которого лежит разделение горнорудной массы, минеральных смесей по их плотности. Куски или минералы меньшей плотности, чем тяжелые среды, всплывают в ней, а более тяжелые погружаются, вследствие чего происходит разделение на легкий — всплывший и тяжелый — потонувший продукты. Цехи тяжелых суспензий функционируют на Зырянской обогатительной фабрике Зырянского горно-обогатительного комплекса и на Тишинском руднике Риддерского горно-обогатительного комбината. Обогащению в тяжелых средах подвергаются бедные и некоторая часть забалансовых руд. Обобщенные характеристики по плотности кластического материала размером 0,3-300 мм бедных руд давно эксплуатируемых месторождений (Иртышское, Белоусовское, Тишинское) приведены в таблице 6, составленной автором по результатам измерений кусков из технологических проб. Применяемая суспензия при гравитационном обогащении обычно принимается равной 2,65-2,68 г/см³. Выделяемая при гравитационном обогащении в тяжелых суспензиях легкая фракция имеет среднюю плотность 2,57-2,59 г/см³, тяжелая — 3,22-3,36 г/см³. Следует отметить, что показатели обогащения в тяжелых суспензиях различных природных типов руд несколько отличаются между собой. Это обуславливается, как показано в таблице 7, различием характера связи плотности этих руд с содержаниями в них полезных компонентов. Различие в коэффициентах корреляции в изученных выборках обуславливается попаданием в тяжелую фракцию при обогащении колчеданных руд значительного количества кусков серно-колчеданного состава, содержащих низкие (менее 0,2%) концентрации полезных компонентов (К. В. Борцов, В. П. Наумов).

Следует отметить, что другим мешающим фактором, снижающим показатели обогащения в тяжелых суспензиях всех типов руд, является присутствие в обогащаемой горнорудной массе кусков пород основного состава из даек, сопровождающих и секущих рудные зоны (Иртышское, Ново-Березовское, Тишинское и др.).

Таблица 6 — Характеристика плотностных свойств кусков класса –100+20 мм бедных руд полиметаллических месторождений Рудного Алтая

Типы руд	Статистические характеристики			
	мин.	макс.	средн.	коэффициент вариации
Медно-колчеданные	2,55	4,8	3,28	80
Медно-цинковые	2,48	4,6	3,05	108
Полиметаллические	2,46	5,8	3,11	120
Серно-колчеданные	2,50	4,4	3,21	90
Вмещающие породы	2,52	2,78	2,59	60
Дайки основных пород	2,89	3,48	3,25	140

Таблица 7 — Парные коэффициенты корреляции, характеризующие взаимосвязь плотности кусков бедных и забалансовых руд с содержаниями в них суммы металлов: медь+свинец+цинк (полиметаллические месторождения Рудного Алтая)

Суммарное содержание металлов в кусках	Плотность кусков класса –100+20 мм природных типов руд		
	медно-колчеданные	медно-цинковые	полиметаллические
Медь+свинец+цинк	0,318	0,546	0,658

Таким образом, для прогнозной оценки показателей гравитационного обогащения в тяжелых суспензиях вполне достаточно информации по связи плотности с содержаниями металлов в объемах, эквивалентных кускам горнорудной массы, используемых при реализации этой операции.

3.4.2 Магнитное обогащение. Дифференциация руд и основных рудных минералов составляет основу магнитных методов обогащения (разделения). Технология и техника магнитного обогащения разрабатывалась В. К. Аркадьевым, С. В. Вонсовским, И. С. Дацюком, В. Г. Деркачем, В. И. Кармазиным, Е. И. Кондорским, Л. В. Киренским, Н. Ф. Олофинским, И. Н. Плаксиным, О. Н. Тихоновым и др.

При организации магнитной сепарации работает различие магнитных свойств на следующих иерархических уровнях рудных образований:

- в объемах, эквивалентных кускам размером 20-150 мм: такие куски кластического материала используются в радиорезонансной покусковой сепарации при организации разделения по магнитной проницаемости, либо по комплексному электромагнитному параметру;

- на уровне зерен и их сростков размером от 0,05 до 3 мм: на этой основе базируются работы различных магнитных сепараторов, обеспечивающих разделение как слабомагнитных, так и сильно магнитных руд.

Носителями магнитных свойств в полиметаллических рудах Рудного Алтая являются следующие минералы: магнетит, титаномагнетит, пирротин, кубанит, железистые разности сфалерита, мельниковит-пирит (В. Д. Борцов, 1969-1990, К. В. Борцов, В. П. Наумов, Н. Г. Шилина, 1988-1991). Магнитные характеристики основных рудных минералов полиметаллических руд приведены в таблице 8. На рисунке 22 приведены гистограммы, характеризующие магнитные свойства руд основных месторождений Рудного Алтая.

Таблица 8 — Магнитные характеристики основных рудных минералов полиметаллических руд Рудного Алтая

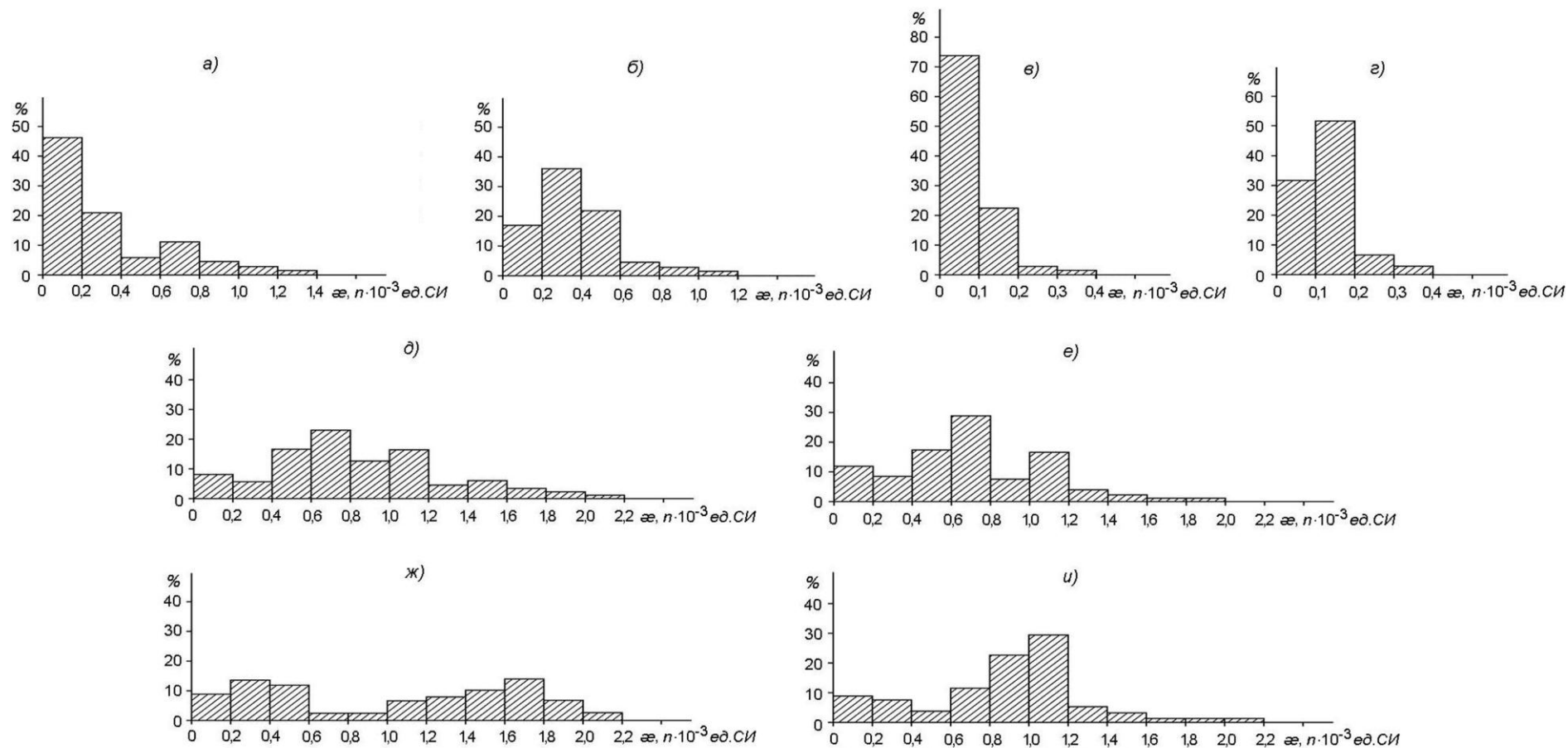
Наименование минералов	Магнитная восприимчивость, $n \times 10^{-5}$ ед. СИ, статистические параметры			
	мин.	макс.	средн.	коэффициент вариации
Галенит	0,25	1,80	0,73	43
Халькопирит	2,46	426	27	80
Кубанит	115	47500	8370	120
Сфалерит	2,14	27,4	12,6	60
Сфалерит железосодержащий	16,3	218	189,6	73
Пирит	1,18	12,7	8,14	64
Мельниковит-пирит	8,6	294,7	213,3	110
Пирротин	8320	15680	14600	97
Магнетит	1400	780000	127000	128

Присутствие перечисленных в таблице 8 минералов определяет магнитные свойства руд, в том числе и кусков в отбитой горнорудной массе. На рисунке 23 приведены гистограммы распределения различных типов руд Малеевского месторождения по магнитной восприимчивости. Повышенные значения магнитных характеристик руд связаны с присутствием в них магнитных минералов: пирротина, магнетита и марматита. Как видно из этих рисунков, наибольшей магнитной восприимчивостью характеризуются метаморфизованные медно-колчеданные руды, содержащие пирротин и магнетит. Следует отметить, что упомянутые выше минералы оказывают негативное влияние на процессы флотации, так что их удаление из шихты, поставляемой на обогатительную фабрику, способствует улучшению качества переработки руд.

Железосодержащие сфалериты и обыкновенные сфалериты обладают различными флотационными свойствами. Присутствие кубанита в халькопирите приводит к потерям меди при флотации. При переработке руд колчеданно-полиметаллических месторождений, относимых к так называемым труднообогатимым, магнитная сепарация эффективно решает следующие задачи. Раздельная их флотация с корректировкой реагентного режима позволяет значительно повысить эффективность обогащения. Сопоставления результатов раздельной флотации магнитной и немагнитной фракций руд Николаевского месторождения, приведенных на рисунке 24, показывает значительное повышение как концентрации полезных компонентов в полученных продуктах раздельной флотации, так и их извлечения в соответствующие концентраты.

Таблица 9 — Результаты флотации метаморфизованных руд Малеевского месторождения, содержащих магнитные халькопириты

Номер пробы	Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
			свинец	цинк	медь	свинец	цинк	медь
13-23	руда	100	0,47	2,05	3,67	100	100	100
	цинковый концентрат	2,0	0,64	42,63	5,83	2,73	41,51	3,18
	медный концентрат	10,4	1,52	4,9	28,92	33,73	24,81	82,01
	хвосты флотации	87,6	0,34	0,79	0,62	63,54	33,68	14,81
13-30	руда	100	0,20	5,76	3,67	100	100	100
	цинковый концентрат	10,09	0,10	48,76	5,13	5,25	85,35	14,09
	медный концентрат	30,84	0,26	1,11	9,46	42,07	5,94	79,46
	хвосты флотации	59,07	0,17	0,85	0,4	52,68	8,71	6,45



a — полиметаллические руды Рубцовского месторождения; *б-г* — руды Николаевского месторождения: метаколлоидные (*б*), кристаллические (*в*), переходные (*г*); *д-е* — руды Орловского месторождения: полиметаллические (*д*), медно-колчеданные (*е*); *ж-и* — руды Малеевского месторождения: барит-полиметаллические (*ж*) и медно-цинковые (*и*)

Рисунок 22 — Характер распределения магнитной восприимчивости богатых руд полиметаллических месторождений Рудного Алтая

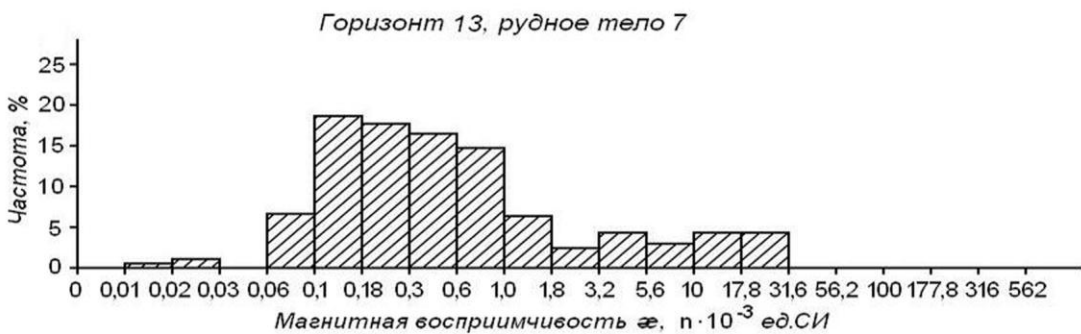
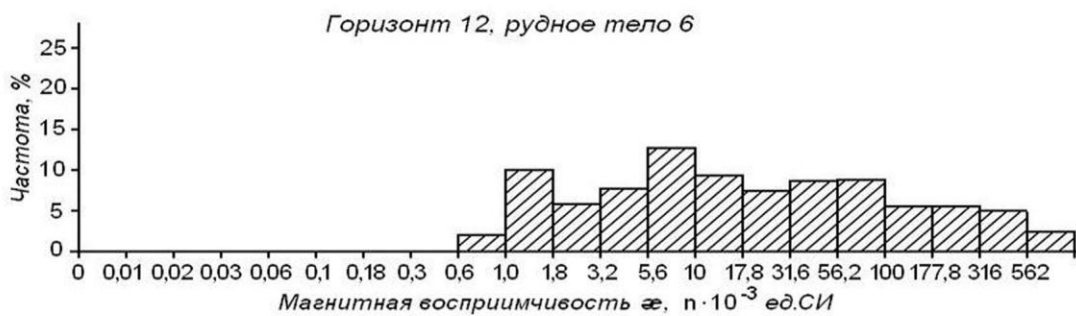
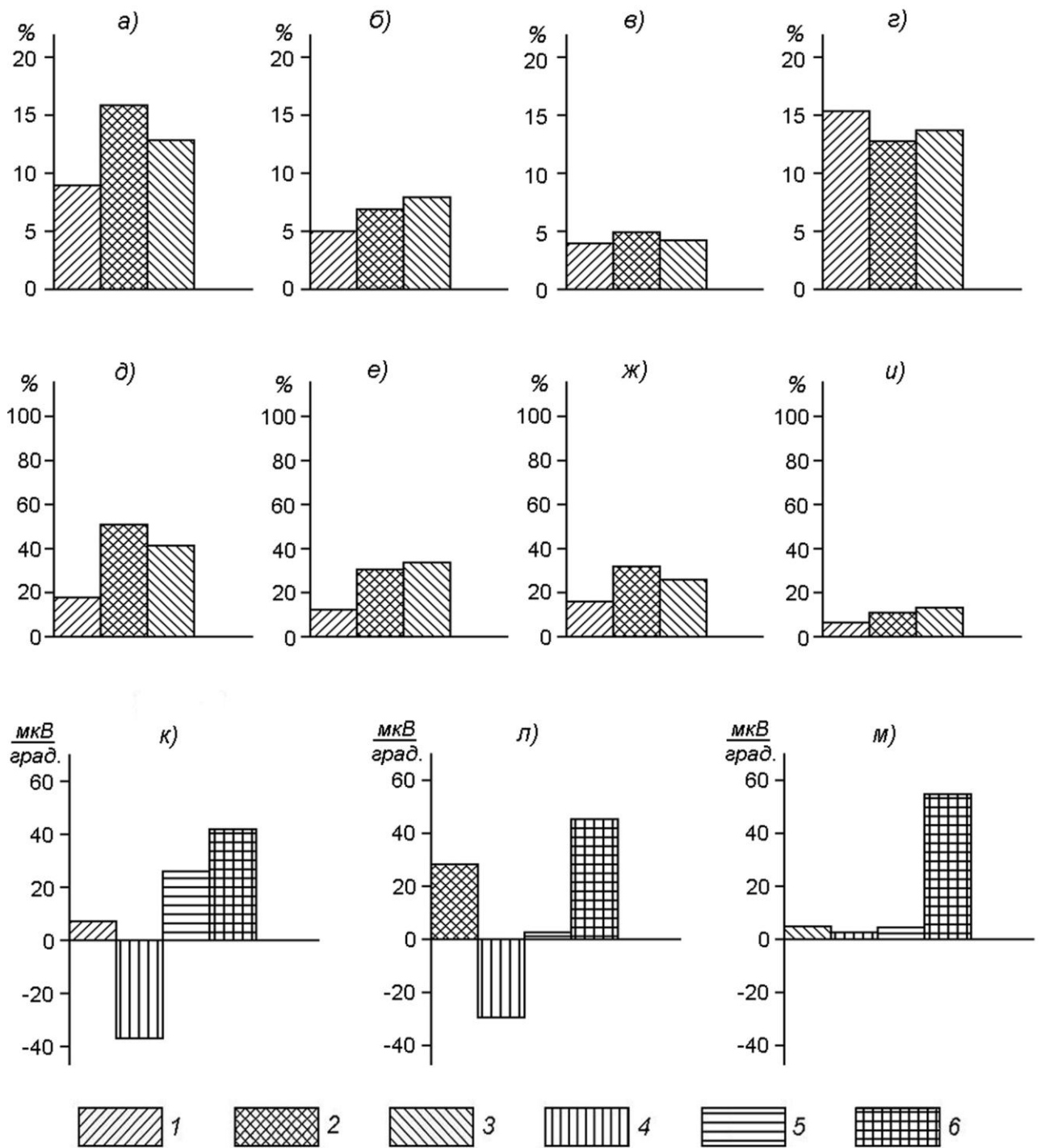


Рисунок 23 — Динамика изменения магнитных свойств руд по горизонтам и рудным телам Малеевского месторождения



a-г – содержания металлов в исходной шихте и продуктах флотации: цинка (*a*), меди (*б*), свинца (*в*), железа (*г*); *д-и* – извлечение металлов в концентраты: цинка (*д*), меди (*е*), свинца (*ж*), железа (*и*); *к-м* – термоэлектрические свойства (эффект Зеебека) продуктов флотации: исходный продукт (*к*), магнитная фракция (*л*), немагнитная фракция (*м*); *1-3* – продукты магнитной сепарации: исходная шихта (*1*), магнитная фракция (*2*), немагнитная фракция (*3*); *4-6* – продукты флотационного обогащения: цинковый концентрат (*4*), медный концентрат (*5*), хвосты флотации (*6*)

Рисунок 24 — Сопоставление результатов флотации переходных руд Николаевского месторождения с результатами магнитной сепарации

В таблице 9 приведены результаты флотации метаморфизованных руд Малеевского месторождения, содержащих магнитные разновидности халькопиритов. Эти халькопириты характеризуются флотационными свойствами, аналогичными сфалеритам, и при флотации выходят в цинковый концентрат. При содержании меди в цинковом концентрате более 2% переработка их на металлургических предприятиях пирометаллургическими способами невозможна. Такие концентраты получили название «неликвидных». С помощью магнитной сепарации представляется возможным выделить из этих концентратов магнитные халькопириты и переработать их гидрометаллургическим способом.

3.4.3 Радиорезонансная сепарация. Петрофизической основой радиорезонансной сепарации является дифференциация электрических и магнитных свойств руд и вмещающих их пород. Поскольку используемый признак является косвенным по отношению к содержанию полезных компонентов, применение радиорезонансной сепарации ограничено. Достоинством этого вида сепарации является относительная простота реализации используемого физического процесса.

Проводимость руд определяется, в основном, удельным сопротивлением основных рудных минералов, их соотношением и особенностями распределения в рудах (текстура, структура). В таблице 10 приведены данные по проводимости руд полиметаллических месторождений по результатам исследований на месторождениях.

Результаты оценки корреляционной связи содержаний полезных компонентов в кусках руд полиметаллических месторождений с радиорезонансным эффектом (R), характеризующим их проводимость, приведены в таблице 11. Наличие связи проводимости с содержанием в кусках металлов является основной предпосылкой использования кусковой радиорезонансной сепарации для их разделения и обогащения (А. М. Труфанов, А. В. Корончевский, 1986).

Таблица 10 — Характеристика проводимости руд полиметаллических месторождений Прииртышского рудного района Рудного Алтая

Типы руд	Электропроводимость, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
Серно-колчеданные медные руды массивной текстуры	0,3 – 4,8
Серно-колчеданные медные полосчатые прожилково-вкрапленные	$5 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^{-2}$
Серно-колчеданные медные вкрапленные	$5 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-4}$
Серно-колчеданные массивные	$4,5 - 4 \cdot 10^{-1}$
Серно-колчеданные вкрапленные	$8 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^5$
Медно-цинковые полосчатые	$8,2 - 2 \cdot 10^{-3}$
Медно-цинковые прожилково-вкрапленные	$3 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-3}$
Полиметаллические массивные	$5 - 1,2 \cdot 10^{-1}$
Полиметаллические вкрапленные	$2 \cdot 10^{-2} - 7,3 \cdot 10^{-4}$

Таблица 11 — Парные коэффициенты корреляции, характеризующие связь между содержаниями полезных компонентов и величинами радиорезонансного критерия разделения (R) для кусков класса –150+20 мм труднообогатимых руд месторождений Рудного Алтая (по К.В. Борцову, А.В. Корончевскому, А.М. Труфанову)

Месторождение, технологический тип руды, параметр	R	Свинец	Цинк	Медь	Железо	Медь, железо	Медь, цинк	Медь, железо, цинк
Орловское месторождение								
Смесь полиметаллических и медно-колчеданных руд, R	1	-0,014	-0,67	0,488	0,67	0,71	0,274	0,346
Рубцовское месторождение								
Полиметаллические руды, R	1	0,218	-0,578	0,836	0,714	0,91	0,137	0,306
Николаевское месторождение								
Метаколлоидные цинковые руды, R	1	–	-0,618	0,418	0,864	0,896	0,083	0,012
Метаколлоидные медно-цинковые руды, R	1	–	-0,427	0,817	0,332	0,327	0,117	0,232
Переходные медно-цинковые руды, R	1	–	-0,714	0,916	0,737	0,838	0,116	0,103

3.4.4 Рентгенорадиометрическое обогащение. Этот вид обогащения широко используется для организации управления качеством колчеданно-полиметаллических руд в процессах их добычи и переработки. В настоящее время благодаря исследованиям Е. И. Крапивского, М. И. Кроткова, Е. П. Лемана, В. И. Ревнивцева, Т. Г. Рыбаковой при эксплуатации полиметаллических месторождений в качестве основного разделительного критерия используется характеристическое излучение основных элементов.

Выбор одного из способов разделения (технологии измерений характеристического излучения):

- способ разделения исходной горнорудной массы на руду и отвальную фракцию по сумме концентраций всех полезных компонентов, входящих в состав полиметаллической руды, посредством регистрации суммарной интенсивности их аналитических линий в одном или нескольких интервалах вторичного спектра;

- способ разделения исходной горнорудной массы на технологические сорта по элементу, входящему в рудный комплекс, или по элементу, характеризующему вмещающие породы, путем регистрации интенсивности его характеристического рентгеновского излучения и аналитической линии главного элемента рудного комплекса;

- способ выделения концентрата с преобладающим содержанием одного из полезных компонентов и отвальным содержанием другого путем регистрации отношения интенсивностей их аналитических линий;

- способ разделения элементов с близкими атомными номерами или выделения аналитической линии одного элемента на фоне пика однократно рассеянных квантов путем регистрации спектрального отношения интенсивностей, измеренных в двух энергетических интервалах вторичного гамма спектра, общая граница которых делит пополам площадь амплитудного распределения мешающего излучения, зарегистрированного от модели, не содержащей главного определяемого элемента.

4 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУД

Анализ изложенной в предыдущих разделах информации по петрофизическим основам методов переработки добываемых руд свидетельствует о многообразии параметров, влияющих на их протекание. Полигенность и полихронность генезиса колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая и неоднократные преобразования руд под воздействием различных метаморфических процессов в течение онтогении обусловили неоднородное распределение этих параметров в пределах рудных залежей и рудных тел. Такое положение подтверждено исследованиями ВНИИцветмета при участии автора на основных месторождениях Рудного Алтая. Сравнение мест отбора технологических проб на геологоразведочных стадиях с закономерностями распределения в пределах рудных залежей этих месторождений электрофизических и электрохимических параметров, изученных в последние годы, свидетельствует, что они большей частью включают руды, содержащие одноименные минералы с различными флотационными свойствами. Кроме того, нет ни одного отчета по подсчету запасов разведанного на Рудном Алтае месторождения, в котором бы оценивались возможности использования технологий предобогащения, обеспечивающих вовлечение в переработку забалансовых руд, сокращение нерудной составляющей в бедных и рядовых пробах, а также разделение руд на технологические типы в рудопотоках с помощью систем управления качеством руд.

Все это явилось основной причиной недостатков в организации переработки добычных руд, приведенных ниже.

Во-первых, практически на всех рудниках Рудного Алтая идет постоянное сопровождение переработки руд, от первых лет эксплуатации месторождения до закрытия рудников, исследованиями по совершенствованию технологии обогащения в связи со значительными потерями металлов при флотации при освоении разведанных запасов.

Во-вторых, на действующих рудниках Рудного Алтая отсутствует автоматизированная система контроля и управления качеством руд. Причиной этого является отсутствие на уровне составления регламентов на обустройство рудника информацией, необходимой для проектирования таких систем. Основными документами для составления регламента является отчет по оценке запасов руд на месторождении, в котором и должна содержаться эта информация. Организация систем управления качеством руд на действующих рудниках весьма затруднительна, так как информацию о технологических свойствах руд определяющих эффективность физических методов, возможно, получить лишь на отработываемых горизонтах, кроме того, требуется проходка горных выработок для размещения аппаратуры и т. п. Не всегда технологические схемы, разрабатываемые для одного горизонта, будут пригодны для отработки новых горизонтов. Так что подготовка месторождения к эксплуатации требует грамотного отбора представительных технологических проб, отображающих распределение технологических свойств руд в пределах всех рудных залежей входящих в его состав. Вполне очевидно, что решать эту проблему рационального размещения мест отбора технологических проб, на которых будет разрабатываться технология переработки руд, возможно, лишь с привлечением объемной модели месторождения, содержащей кроме характеристик вещественного состава информацию о закономерностях распределения энергетических (электрофизических, электрохимических, плотностных, магнитных) и вещественных свойств руд.

Используемая в настоящее время технология опробования позволяет составить объемную модель, отображающую лишь закономерности вещественных характеристик. Организация исследований физико-химических свойств руд традиционными лабораторными методами, во-первых, потребует больших затрат времени, во-вторых, не обеспечит в полной мере оценку тех характеристик, которые определяют протекание физико-химических процессов обогащения. А для представительного отбора проб для технологических испытаний, как это следует из приведенных выше петрофизических основ процессов

обогащения, требуется знание конкретных закономерностей распределения руд с различными физико-химическими свойствами.

4.1 Методы определения электрофизических, электрохимических свойств руд в полевых исследованиях

Как указывалось выше, электрофизические и электрохимические свойства находятся в тесной корреляционной связи. Выполненные автором исследования свидетельствуют о возможности решения задачи изучения электрофизических (электрохимических) свойств руд и рудных минералов с помощью сочетания полевых (каротажных, скважинных) и лабораторных исследований.

В полевых условиях с помощью геофизических методов представляется возможным решать задачи по изучению электрофизических свойств, оценки закономерностей распределения руд в рудных полях и рудных залежах по характеристикам эффекта Зеебека (суммарной величине термо-ЭДС).

Задача оценки закономерностей распределения руд в рудных полях и рудных залежах по характеристикам эффекта Зеебека (суммарной величине термо-ЭДС) решается с помощью методов, описанных ниже.

4.1.1 Метод электродных потенциалов (МЭП). В этом методе измеряется электродная разность потенциалов $\Delta U_{\text{эл}}$, возникающая на поверхности раздела металла измерительных электродов и на контакте электронно- или дырочно-проводящих рудных минералов с промывочной жидкостью в скважинах. В традиционно применяемом каротаже методом МЭП используются цинковые электроды, характеризующиеся быстрым формированием электронного потенциала, величина которого мало зависит от ионного состава электролитов и стабильна во времени при перемещении электродов по скважине.

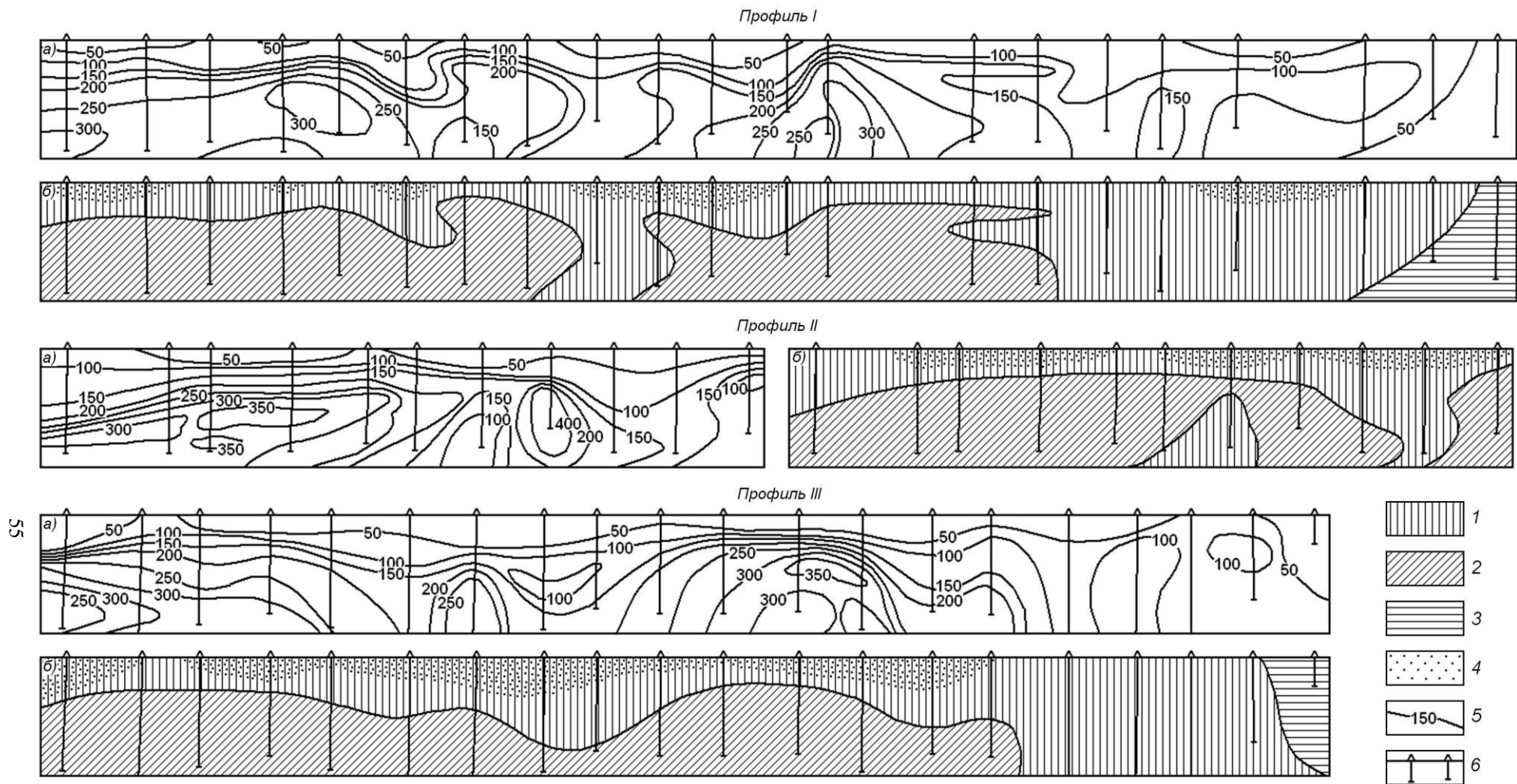
Величина электродного потенциала зависит от минерального состава руд, их размеров и распределения среди вмещающих пород, химического состава промывочной жидкости и ее температуры.

4.1.2 Метод ранней стадии вызванной поляризации (РСВП). Исследованиями А.П. Красникова, О.В. Бумагина, Р.С. Сейфуллина доказано, что временные характеристики ранних стадий вызванной поляризации рудных минералов «представляют интерес не только с точки зрения интерпретации данных, полученных в полевых условиях. Они позволяют получить принципиально новую и объективную информацию об электрохимической активности минералов, диапазоне и характере ее изменения, косвенно отражающих условия формирования сульфидных месторождений». Этими же исследованиями была установлена связь характеристик спада ранних стадий вызванной поляризации с типом проводимости сульфидных минералов. Эти положения полностью подтвердились при проведении метода РСВП в Николаевском карьере, вскрывшим Крещенскую рудную залежь Николаевского месторождения, а также в лабораторных измерениях ранних стадий вызванной поляризации рудного керна и образцов, отобранных из вскрытых горными выработками руд Орловского, Малеевского и Тишинского месторождений.

На рисунке 26 приведено сопоставление термо-ЭДС пиритов пиритной матрицы, составляющей 60-80% объема руд, и временных характеристик ранней стадии вызванной поляризации руд Николаевского месторождения (горизонты 197, 212). Содержание в рудах других минералов (халькопирита, сфалерита) одного порядка. Как видно из приведенной на рисунке 26 информации, устанавливается четкая связь между типом проводимости пиритной матрицы и временными характеристиками ранней стадии вызванной поляризации.

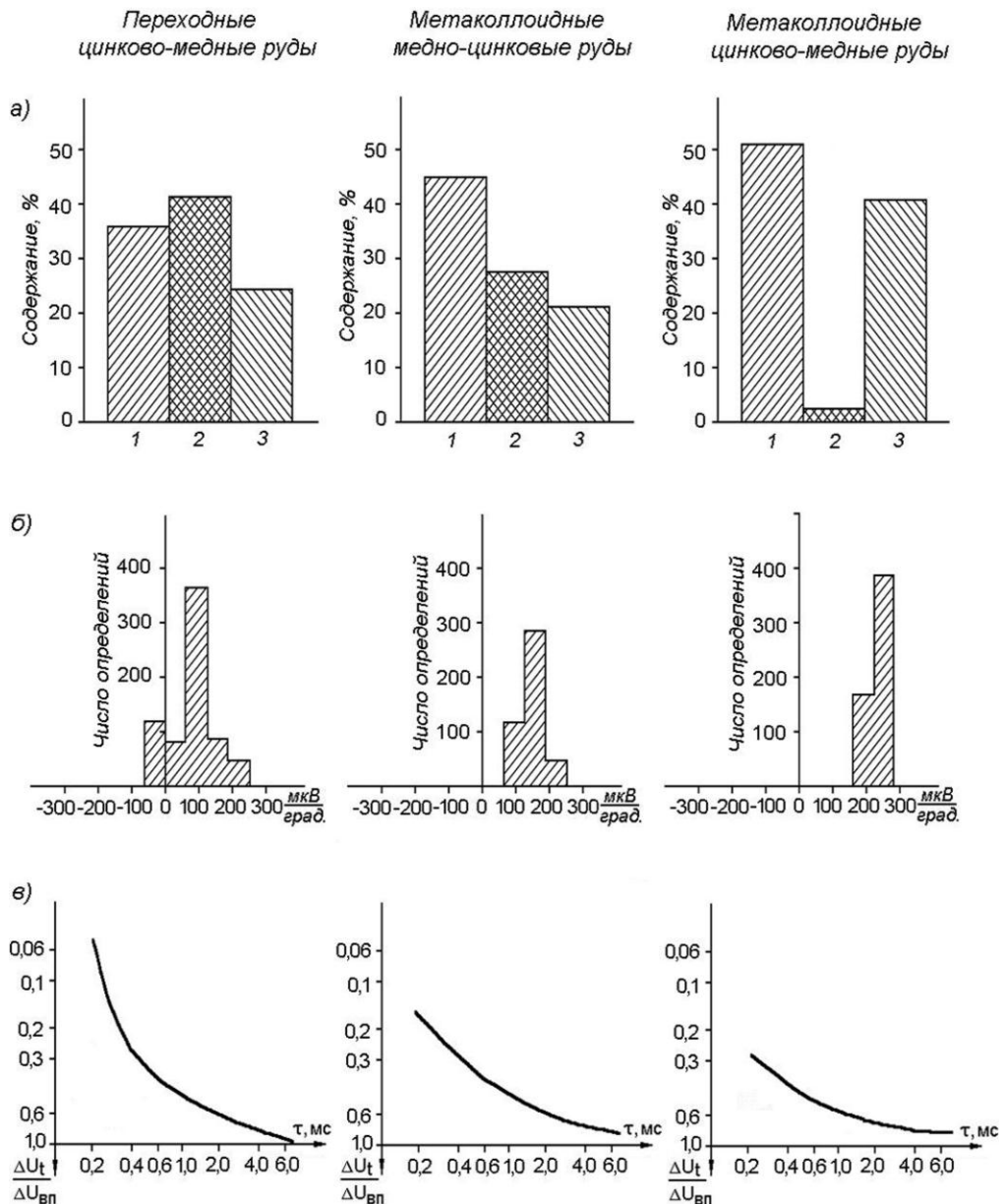
На рисунке 27 показаны графики изменения приведенной скорости спада ранних стадий вызванной поляризации (S'), измеренной на уступах Николаевского карьера, вскрывающих кристаллические, переходные и метакolloидные руды. Измерения проводились по схеме дипольного профилирования.

Организация измерения РСВП по стволу скважин по схемам профилирования позволяет также уверенно фиксировать руды с различной электрохимической активностью



1 — метакolloидные цинковые руды; 2 — переходные медно-цинковые руды; 3 — вмещающие минерализованные породы; 4 — область дезинтеграции руд; 5 — изолинии $E\alpha$; 6 — взрывные скважины

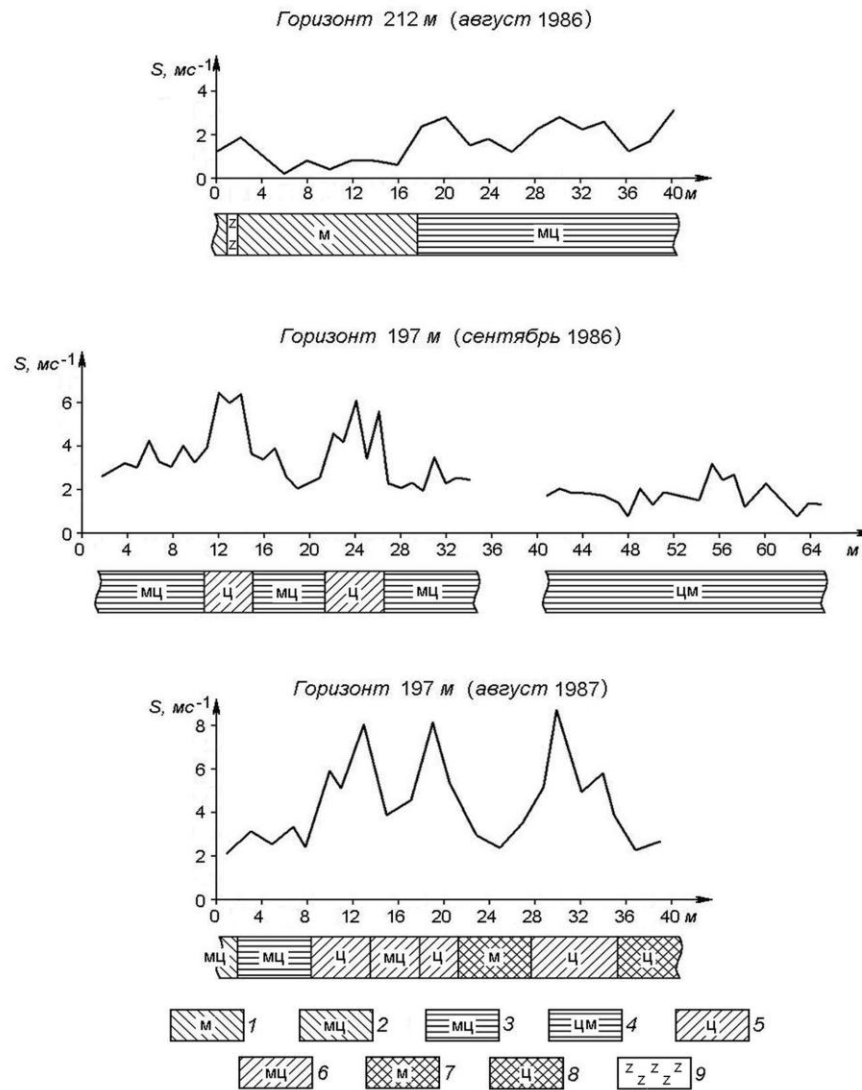
Рисунок 25 — Результаты индукционного каротажа взрывных скважин (горизонт 182, блок 7р)



a — зависимость временных характеристик РСВП от содержания в рудах пирита (1), халькопирита (2) и сфалерита (3); *б* — гистограммы распределения пиритов с различными технологическими свойствами; *в* — типичные временные характеристики РСВП в пунктах отбора проб

Рисунок 26 — Временные характеристики РСВП различных природных типов руд Николаевского месторождения

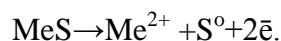
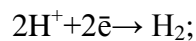
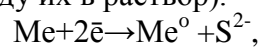
4.1.3 Контактный способ поляризационных кривых (КСПК). Этот метод основан на изучении последовательно возбужденных электрохимических реакций на поверхности рудных минералов от источника электрического тока (Ю.С. Рысс, 1965). Находящееся в равновесном состоянии в контакте с ионопроводящей вмещающей породой рудное тело, как единая полиминеральная электрохимическая система, характеризуется определенным равновесным потенциалом.



1-8 —типы руд: 1, 2 — кристаллические медные (1) и медно-цинковые (2); 3, 4 — переходные медно-цинковые (3) и цинково-медные (4); 5, 6 — метакolloидные цинковые (5) и медно-цинковые (6); 7, 8 — метаморфизованные медные (7) и цинковые (8); 9 — дайки основного состава

Рисунок 27 — Результаты измерений методом РСВП, проводимых на Николаевском месторождении

При этом возрастание тока в цепи будет сопровождаться повышением потенциала, равного потенциалу электрохимической реакции на одном из минералов. Все достигающие поверхности рудного тела электроны или ионы будут использоваться на поддержание этой реакции. При этом по данным Ю. С. Рысса, О. Ф. Путикова, В. П. Коростина и др. при катодных и анодных процессах для большинства сульфидных минералов характерно по две электрохимических реакции, описываемые при катодном процессе формулами 35 и 36. При анодном процессе одна реакция, описываемая формулой 37, соответствует анодному разложению минералов (переводу их в раствор).



На описанной стадии поляризации возрастание тока в электрической цепи происходит при постоянном потенциале рудного тела. Когда та часть поверхности рудного тела, которая сложена со вступившим в реакцию минералом, будет полностью вовлечена в электрохимическое воздействие, наступит предельное состояние электрохимической реакции. В связи с этим, в дальнейшем поверхность рудного тела не обеспечивает пропускание нарастающего количества электричества во вмещающую среду, и избыток зарядов накапливается в рудном теле, повышая его энергетический уровень вплоть до предела, достаточного для вовлечения в электрохимический процесс следующего минерала.

Эти процессы находят отражение в поляризационных кривых, описывающих зависимость потенциала рудного тела относительно электрода сравнения от пропускаемого через него постоянного электрического тока с постепенным увеличением его силы.

Сопоставление потенциалов катодных и анодных реакций, приведенных в таблице 12 с особенностями электрофизических свойств основных минералов позволяет сделать следующие выводы.

Устанавливаются четкие различия протекания электрохимических реакций у пиритов метакolloидных, переходных и кристаллических руд. Пириты в этих рудах различаются по электрофизическим свойствам: в метакolloидных рудах они характеризуются дырочной проводимостью, кристаллических – электронной, в переходных – смешанного типа.

Халькопириты метакolloидных, переходных и кристаллических руд также различаются по величине потенциала электрохимических реакций. Причем, в переходных рудах отмечаются две разновидности халькопиритов: с $\varphi = -0,58$ и $\varphi = -1,45$ В.

Потенциал реакций на сфалерите повышается от метакolloидных к кристаллическим рудам. Геохимические исследования, выполненные Н. Г. Шилиной, показывают, что в этом направлении в сфалеритах понижается концентрация железа.

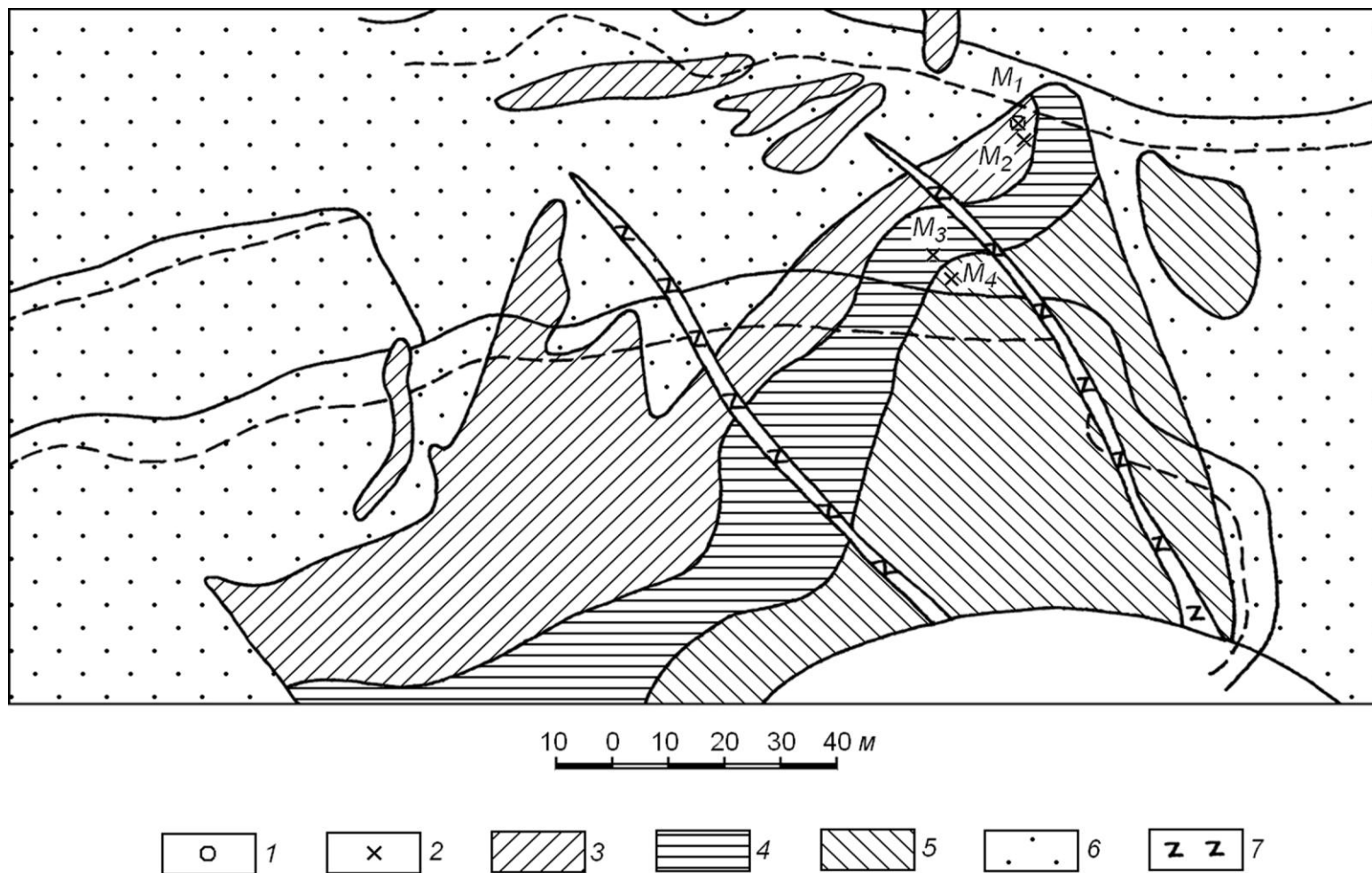
Железосодержащие сфалериты метакolloидных руд характеризуются повышенной магнитной восприимчивостью (до $500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Сфалериты переходных и кристаллических руд различаются также по величине потенциала катодных реакций.

Галенит характеризуется во всех трех типах руд первой катодной реакцией при очень близких потенциалах $\varphi = -0,75 \div -0,8$ В. Это связано с тем, что свинцовая минерализация является наложенной на заключительном гидротермальном процессе.

Таким образом, с помощью КСПК представляется принципиальная возможность оценивать минеральный состав и электрохимические свойства минералов руд в естественном залегании.

Таблица 12 — Результаты проведения измерений методом КСПК (по Исаеву Л.Т., Борцову К.В., Титову Д.В.)

Минерал	Потенциал минералов в рудах различных технологических типов, В		
	в кристаллических рудах	в переходных рудах	в метакolloидных рудах
Пирит I	–	–	–0,4; –0,5
Пирит II	–	–1,45; –0,45	–
Пирит III	–0,26	–	–
Халькопирит I	–0,45	+0,15; –0,58	+0,2; –0,66
Халькопирит II	–	–1,45	–
Сфалерит I	–	+0,05; –1,2	–0,96
Сфалерит II	+2,25; –2,8	–	–
Галенит I	–0,75	+0,2; –0,76	–0,8
Галенит II	+1,3	–	–

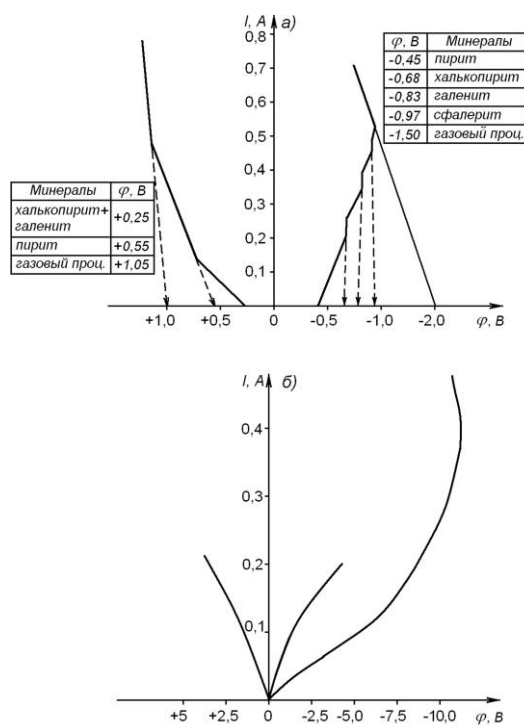


1 — токовый питающий электрод A ; 2 — измерительные электроды M_1, M_2, M_3, M_4 ; 3-5 — технологические типы руд: 3 — кристаллические, 4 — метакolloидные, 5 — метакolloидные; 6 — вмещающие породы

Рисунок 28 — Схема размещения электродов при наблюдениях методом КСПК на Николаевском карьере

На рисунке 29 показаны кривые КСПК снятые на образцах кристаллических и переходных руд. Текстура обоих типов руд массивная. Характер гальванодинамических поляризационных кривых кристаллических руд, сходный с кривыми руд с вкрапленной текстурой, вполне объясняется особенностью энергетической схемы полупроводников с электронной проводимостью (рисунок 29), которая обуславливает при поляризации активную сорбцию кислорода воздуха поверхностью минерала, приводящую к обеднению ее носителями тока и образованию запорного слоя, обладающего высоким омическим сопротивлением.

По части гальванодинамических поляризационных кривых К. В. Борцовым и Н. Г. Шилиной были проведены сопоставления минерального состава определенные по методике Ю. С. Рысса с данными минералогического анализа, выполненного под микроскопом. Результаты приведены в таблице 13.



a — метаколлоидные руды, *б* — кристаллические руды

Рисунок 29 — Поляризационные кривые, снятые для образцов руд Николаевского месторождения разных технологических типов

Таблица 13 — Сопоставление результатов определения в рудах содержаний основных рудных минералов по КСПК и минералогическому анализу (по К.В. Борцову и Н.Г. Шилиной)

Руды	По минералогическому анализу, %			По КСПК, %		
	пирит	халькопирит	сфалерит	пирит	халькопирит	сфалерит
Медно-колчеданные	26	74	—	21	79	—
Полиметаллические	6	26	68	8	31	61

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о вполне приемлемой сходимости результатов КСПК с минералогическим анализом. Следует отметить, что более значительные расхождения оценок содержаний металлов в полиметаллических рудах объясняется присутствием в них значительной доли халькопиритов в виде эмульсионной вкрапленности в сфалеритах, трудно учитываемой при минералогическом анализе. Исходя из этого, предпочтение следует отдать в таких случаях методу КСПК.

На рисунке 30 изображена гальванодинамическая поляризационная кривая, записанная при поляризации куска медно-цинковых руд Рубцовского месторождения, характерным для которой является весьма плавный, почти линейный затянутый переход от реакции на халькопирите к реакции на сфалерите. Изучение минерального состава исходной руды и вторичных продуктов показало, что такие переходы обуславливаются присутствием обильной эмульсионной вкрапленности халькопирита в сфалерите. Это свидетельствует о том, что по характеру перехода от одной электрохимической реакции к другой

представляется возможным оперативно оценивать наличие эмульсионной вкрапленности, оказывающей, как правило, негативное влияние на флотационные процессы и позитивное — на протекание гидрометаллургических процессов.

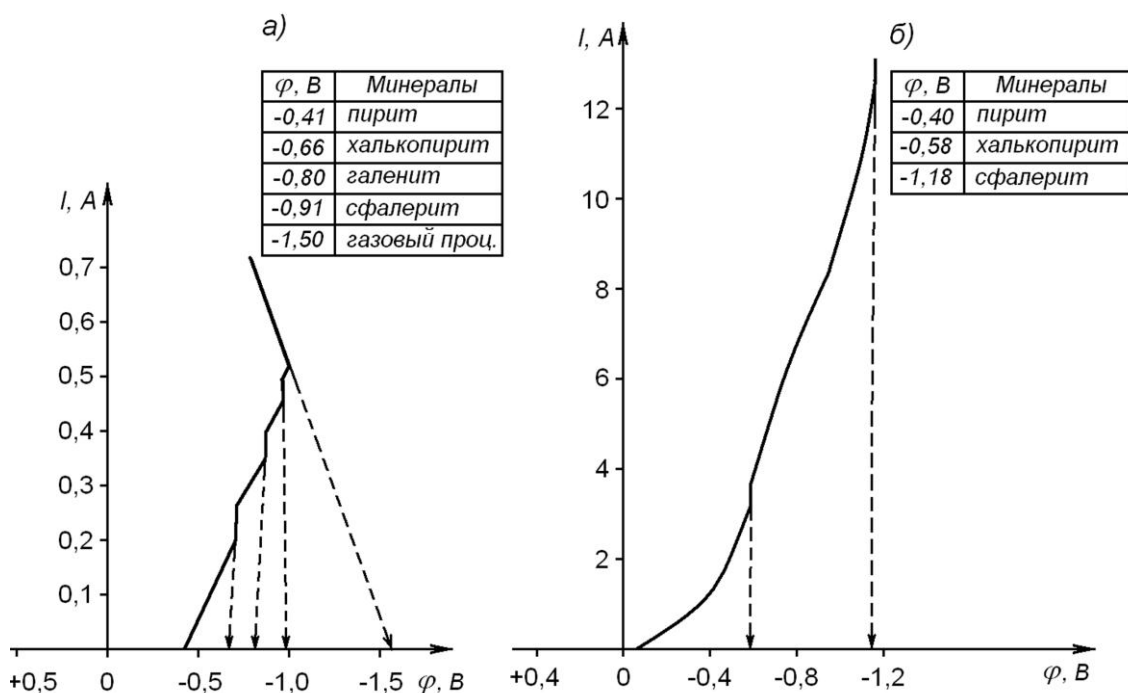
Таким образом, метод КСПК в лабораторном (покусковом) варианте является эффективным оперативным методом для оценки минерального состава, наличия в рудах минеральных сростаний, негативно влияющих на процессы флотации (структуры эмульсионные, графические, субграфические, петельчатые, тонковкрапленные одного рудного минерала в другой) и основных параметров технологических свойств руд.

4.2 Измерение термоэлектрических свойств руд и рудных минералов в лабораторных условиях

К настоящему времени разработана и изготовлена аппаратура, обеспечивающая измерение эффекта Зеебека в горных выработках, скважинах и лабораторная аппаратура, позволяющая оценивать как суммарную термо-ЭДС (эффект Зеебека) руд, так и каждого из рудных минералов.

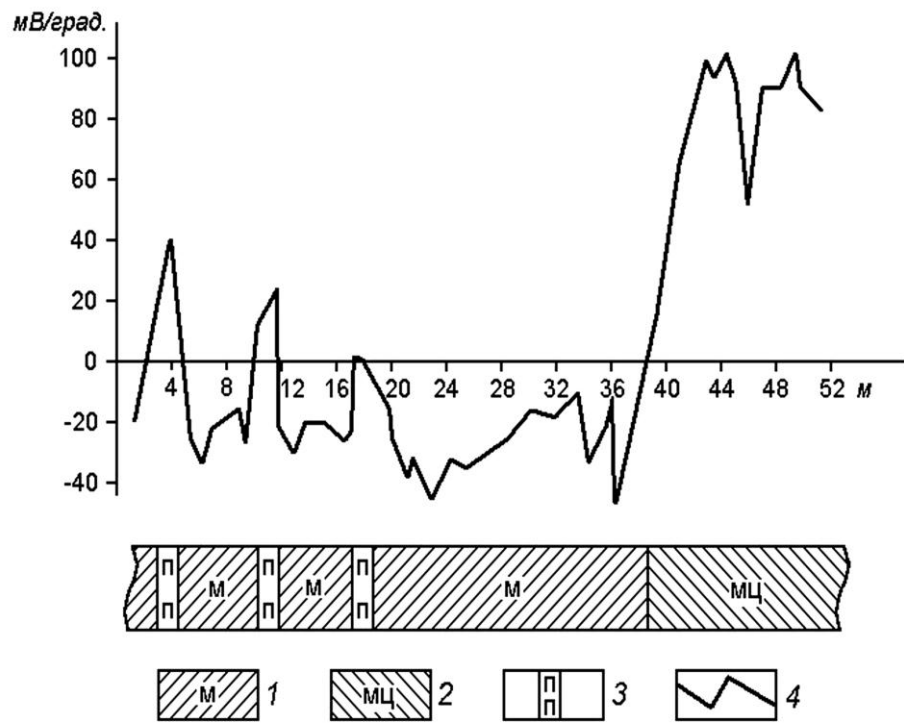
Аппаратура для измерения термо-ЭДС руд в горных выработках разработана П. С. Ревякиным в середине 70-х гг. прошлого столетия. Она была модифицирована в 1988 г. сотрудником ВНИИцветмета А. А. Михеевым.

На рисунке 31 изображены результаты измерения эффекта Зеебека по горизонту 182 в карьере Николаевского месторождения, демонстрирующие эффективность выделения метакolloидных и кристаллических руд этим методом. В приведенном примере измеряемые параметры определяются свойствами пиритных матриц руд. Пириты в них составляют 50-80%. В кристаллических рудах пириты имеют электронную проводимость, в метакolloидных — дырочную. На рисунке 32 показано сопоставление характера изменения графиков эффекта Зеебека с графиками содержаний цинка и меди и их соотношений, определяемых по данным рентгенорадиометрического опробования. По этим параметрам можно судить не только о типе проводимости, но и о минеральном составе.



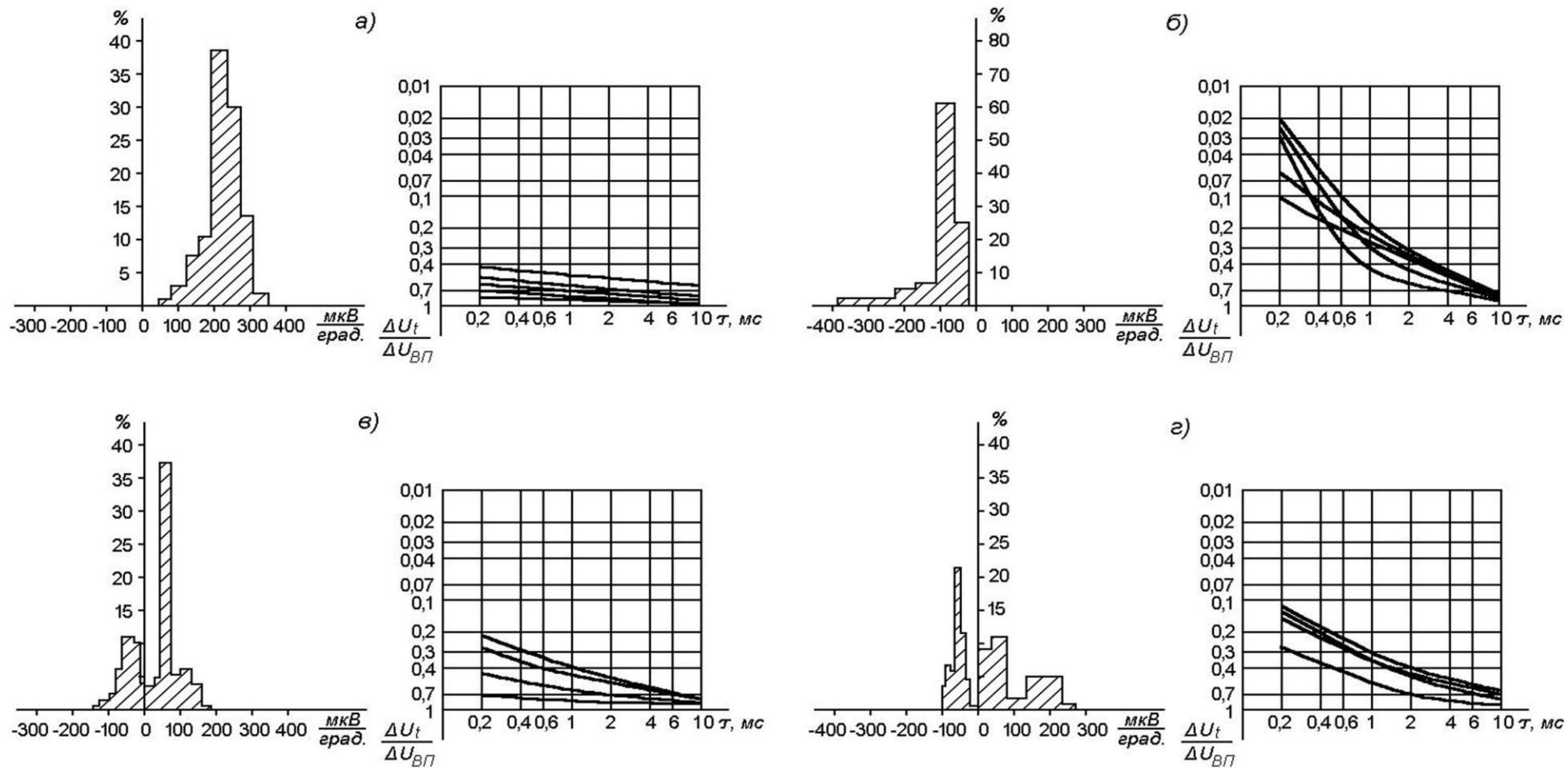
а — эмульсионные структуры отсутствуют; *б* — эмульсионные структуры составляют порядка 25-30%

Рисунок 30 — Поляризационные кривые медно-цинковых руд Рубцовского месторождения



1 — кристаллические медно-колчеданные руды; 2 — метакolloидные медно-цинковые руды; 3 — прожилки барит-полиметаллических руд; 4 — графики величины термо-ЭДС

Рисунок 31 — Результаты измерений эффекта Зеебека на Николаевском руднике в карьере по горизонту 182 (по Ревякину П.С.)



а-б — типы руд: метакolloидные (а), переходные (б), кристаллические (в), метаморфизованные метакolloидные (г)

Рисунок 32 — Гистограммы термо-ЭДС пиритов и временные характеристики ранней стадии ВП руд Николаевского месторождения (горизонты 197, 212)

5 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

5.1 Особенности генезиса и онтогении колчеданно-полиметаллических месторождений (на примере Рудного Алтая)

Под геолого-технологическим картированием (ГТК) понимается комплекс работ по геометризации руд с различными технологическими свойствами и обогатимостью.

В результате многолетних исследований, выполненных на Рудном Алтае В. П. Нехорошевым, Г. Ф. Яковлевым, А. К. Каюповым, П. Ф. Иванкиным, В. С. Кузбным, Ю. Ю. Воробьевым, В. В. Поповым, Н. И. Стучевским, М. А. Кузменко и др. установлены следующие особенности генезиса и онтогении колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, которые в полной мере идентичны колчеданно-полиметаллическим месторождениям Урала, Забайкалья и др. рудных районов.

1. Колчеданно-полиметаллические месторождения полигенные. Они формировались в результате проявления нескольких стадий. Полигенность месторождений выражается в зональном расположении природных типов руд.

Под природным типом руд (ПТР) понимается локальная совокупность минеральных образований, пространственно обособленная в рудном теле и характеризующаяся устойчивым составом, ведущие параметры которого регламентированы заданными граничными значениями.

В обобщенном виде зональность проявляется следующим образом от лежачего борта к висячему наблюдаются следующие изменения ПТР: серно-колчеданные — медно-колчеданные — медно-цинковые — полиметаллические — барит-полиметаллические руды. При этом формирование каждого ПТР происходило в вполне определенных, отличающихся от остальных термо-баро-геохимических условиях, что зафиксировано в особенностях геохимических нагрузок основных рудных минералов и некоторых особенностях их внутреннего строения.

2. Полихронность формирования месторождений. Длительность формирования месторождений, в том числе перерывы между стадиями их становления, составляют несколько миллионов лет.

В процессе онтогении месторождений они неоднократно подвергались воздействию различных метаморфических процессов, связанных с проявлением регионального метаморфизма, внедрением интрузий в околорудное пространство, внедрением пострудных даек, занимающих различное положение по отношению к рудным телам (секущие, внутрирудные и т. д.). Особенности генезиса месторождений, метаморфические процессы на стадии онтогении обусловили достаточно сложный минеральный состав руд и особенно физико-химические свойства основных рудных минералов, определяющих технологические свойства руд. По особенностям технологических свойств руд выделяются промышленные технологические типы и сорта руд.

Под промышленным технологическим типом руд (ТТР) понимается руда, принципиально отличающаяся от других руд составом, технологическими свойствами и схемой обогащения (переработки), занимающая значительный объем рудного тела или месторождения, добычу и переработку которой возможно осуществлять селективно.

Технологический сорт руды (ТСР) — подразделение промышленного технологического типа, выделяющееся по какому-либо параметру качества и показателям обогащения. Технологические сорта одного типа добываются и перерабатываются совместно в определенных соотношениях.

Целью геолого-технологического картирования является:

1. Изучение особенностей вещественного состава руд, физико-химических свойств основных рудных минералов и руд, оценка степени влияния характеризующих их параметров на протекание процессов обогащения и формирование на этой основе комплекса

вещественных и энергетических характеристик, определяющих технологические свойства руд.

Под технологическими свойствами руды понимается совокупность свойств руды, обуславливающих выбор технологической схемы её обогащения.

2. Оценка обогатимости руд различных промышленных технологических типов различными методами предобогащения и обогащения.

3. Изучение закономерностей распределения руд с различными технологическими свойствами в пределах рудных тел и залежей.

4. Составление карт, разрезов, погоризонтных планов и объемных моделей, отображающих изменчивость качества и показателей обогащения руд по технологическим типам, сортам и участкам месторождения, удовлетворяющие требованиям планирования добычи и обогащения.

Под качеством руды понимается совокупность признаков вещественного и химического состава руды, её текстурно-структурных и физико-механических характеристик, определяющих её технологические свойства.

Обогатимость руды — способность руды к обогащению по определенной технологической схеме с конкретными показателями.

Общая принципиальная схема и последовательность работ по ГТК следующая.

1. На первом этапе в случае необходимости проводятся работы по уточнению контуров распространения ПТР. В качестве основы используются результаты геологических исследований, выполненных геологами, проводящими разведку месторождений. Обычно выделение ПТР и их разновидностей производится по количественным критериям, определенным соответствующими инструкциями ГКЗ или принятыми в организации, проводящих геологоразведочные работы. Принятые различными организациями количественные критерии для выделения ПТР не всегда совпадают друг с другом. В организациях, проводящих подобные исследования на Рудном Алтае, используется классификация ПТР полиметаллических месторождений, разработанная Ю.Б. Генкиным (таб. 14).

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов О.А. Радиометрическая обогатимость руд при их разведке—М.: Недра, 1984-144с.
2. Борцов В.Д., Тойбазаров М.А., Ревякин П.С. Термоэлектрические свойства пиритов Николаевского месторождения на Алтае /Вопросы геологии и металлогении Зайсанской складчатой области—Алма-Ата, 1973-178с
3. Глембоцкий В.А. Основы физико-химии флотационных процессов-М.: Недра, 1980-486с
4. Генкин Ю.Б., Дробышевский А.М. и др. Геолого-технологическое картирование колчеданно-полиметаллических месторождений-М.: Недра, 1986-218с
5. Свешников Г.Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях-Л.: Изд-во Ленинград.Универ, 1967-160с
6. Рысс Ю.С. Геоэлектрические методы разведки-Л.: Недра, 1983-254с