

**Титов Дмитрий Викторович**

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД**

(на примере колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая)

Специальность 25.00.16 - Горнопромышленная и нефтегазопромысловая  
геология, геофизика, маркшейдерское дело и  
геометрия недр

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

**Томск – 2006**

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор  
Мазуров Алексей Карпович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук  
Карасев Анатолий Павлович  
- доктор геолого-минералогических наук  
Сальников Владимир Николаевич

Ведущая организация: Сибирский научно-исследовательский  
институт геологии, геофизики и  
минерального сырья

Защита диссертации состоится 05 октября 2006 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.01 в Томском политехническом университете по адресу: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30 (1-й корпус ТПУ, 210 ауд.)

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Томского политехнического университета

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук, доцент

А.А. Поцелуев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Экономическая эффективность работы горнодобывающих предприятий зависит от полноты извлечения запасов из недр, а также от совершенства технологических схем обогащения и переработки минерального сырья.

Геофизические методы исследования могут быть эффективно использованы на стадии разведки месторождений и при подготовке их к промышленному освоению. Анализ деятельности горно-обогатительных комплексов Рудного Алтая свидетельствует о том, что основные потери металлов имеют место при обогащении руд и переработке концентратов.

Изучение технологических свойств руд геофизическими методами в процессе разведки колчеданно-полиметаллических месторождений позволит создать оптимальные схемы обогащения руд и переработки концентратов и, соответственно, избежать значительных потерь основных и попутных компонентов.

**Целью работы** является обоснование рационального комплекса геофизических методов, обеспечивающих получение информации, необходимой для оценки на всех стадиях разведочных и эксплуатационных работ технологических свойств руд, определяющих выбор оптимальной схемы рудоподготовки, сепарации и флотации руд и гидрометаллургической переработки концентратов.

### **Основные задачи исследований:**

- систематизировать имеющуюся информацию о физико-химических свойствах руд и рудных минералов колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая;
- обобщить результаты проведенных экспериментальных исследований по выявлению влияния физико-химических свойств руд на эффективность процессов флотационного обогащения руд и гидрометаллургического передела концентратов;
- провести полевые и лабораторные эксперименты, направленные на исследование связи физико-химических свойств руд с показателями флотационного обогащения руд и гидрометаллургического передела концентратов;
- обобщить результаты исследований и проанализировать возможности скважинных и каротажных методов для регистрации ими физико-химических свойств руд и рудных минералов, влияющих на флотационное обогащение руд и гидрометаллургический передел концентратов;
- обосновать рекомендации по комплексированию геофизических методов при технологическом картировании руд для оценки эффективности рудоподготовки, сепарации, флотационного обогащения руд и гидрометаллургического передела концентратов.

**Фактический материал и методы исследований.** В основу диссертационной работы положен фактический материал, собранный автором при разведке Зыряновского, Греховского, Майского и Малевского колчеданно-полиметаллических месторождений в Зыряновском рудном районе в 1980-1991 гг., при разработке геофизических методов исследования, обеспечивающих решение задач оперативной оценки технологических свойств руд (технологического картирования), при анализе ре-

зультативности геолого-геофизических исследований и деятельности горно-обогатительных комбинатов Рудного Алтая в 1998-2005 гг. в ТУ «Востказнедра».

В диссертации использованы следующие оригинальные материалы.

1. Результаты изучения электрофизических и электрохимических свойств руд и их связи с показателями флотационного обогащения на стадии детальной разведки Малеевского месторождения и подготовке регламентов на обустройство Малеевского рудника и технологии обогащения руд Малеевского месторождения.

2. Результаты проведения каппаметрии и измерений термоЭДС по горным выработкам на горизонтах 11, 12, 13 и 14 Малеевского месторождения, данные измерений методами РСВП, каппаметрии, термоЭДС на отметках 257, 212, 182 м карьера Николаевского месторождения на стадиях промразведки и эксплоразведки.

3. Результаты изучения технологических свойств руд на стадии детальной разведки Майского и эксплуатационной разведки Греховского месторождений.

4. Результаты лабораторных исследований вещественного состава, электрофизических и электрохимических свойств руд Орловского, Тишинского и Ново - Березовского месторождений.

5. Результаты обобщения методов скважинной электроразведки и каротажа на Малеевском, Тишинском, Орловском и Николаевском месторождениях.

6. Результаты лабораторных работ по оценке контрастности и прогноза показателей покусковой сепарации руд месторождений Чекмарь, Николаевское, Орловское, Тишинское.

Исследования включали в себя изучение петрофизических основ различных способов обогащения колчеданно-полиметаллических руд и изучение электрофизических свойств основных рудных минералов месторождений Рудного Алтая, а также сбор, анализ и обобщение большого фактического материала по разведке и эксплуатации месторождений и обогащению руд. Особое внимание уделялось установлению связей флотационных характеристик руд с электрофизическими и электрохимическими свойствами сульфидных минералов колчеданно-полиметаллических месторождений.

**Практическая значимость работы.** Разработана методика геофизических исследований, позволяющая в процессе проведения геологоразведочных работ решать следующие задачи: оперативно оценивать вещественный состав и физико-химические свойства руд, определяющие их обогатимость, а также обеспечивать формирование и отбор представительных технологических проб.

Выявлена связь вещественного состава полиметаллических руд с их физико-химическими характеристиками, которые влияют на показатели обогащения. Установлено, что с помощью геофизических методов можно вести автоматизированный контроль и управление качеством руд при добыче и на обогатительном процессе.

В настоящее время на горно-обогатительных комбинатах Рудного Алтая внедряются фрагменты разработанной автором технологии.

Основные результаты исследований, выполненных по теме диссертации, включены в подготовленный к изданию курс лекций «Геолого-технологическое картирование» (Восточно-Казахстанский государственный технический университет), а также в отчет по теме «Совершенствование методов комплексной геолого-

технологической оценки эксплуатируемых и подготавливаемых к освоению участков труднообогатимых руд колчеданно-полиметаллических месторождений».

### **Научная новизна работы. Личный вклад автора**

1. Обобщены результаты изучения руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая с позиций понятия «геосистема», представляющей совокупность взаимосвязанных вещественных и физико-химических параметров.

2. Выявлена неоднородность распределения рудных минералов, в том числе и одноименных, с различными физико-химическими свойствами в рудных телах и рудных залежах. Установлено, что это явление связано с особенностями генезиса колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая.

3. Впервые на основании петрофизических исследований установлены вещественные и физико-химические факторы, обусловленные особенностями формирования колчеданно-полиметаллических месторождений и оказывающие значительное влияние на эффективность процессов флотационного обогащения руд.

4. Обоснована необходимость разработки технологии обогащения руд на информационной базе, содержащей сведения об их вещественном составе и физико-химических параметрах.

5. Определена принципиально новая сфера применения геофизических методов при подготовке колчеданно-полиметаллических месторождений к эксплуатации.

6. Доказана возможность применения геофизических методов для оценки технологических параметров руд, определяющих эффективность флотационного метода их обогащения.

7. Сформированы рациональные комплексы геофизических методов исследований на различных стадиях подготовки месторождений к промышленному освоению.

**Апробация работы и публикации.** По теме настоящей работы опубликовано 15 научных трудов, в том числе 1 монография и 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАКа.

Основные положения диссертации докладывались на:

- научно-практической конференции «Минерально-сырьевые ресурсы и устойчивое развитие Казахстана», Кокшетау, 1998 год;
- региональной научно-практической конференции «300 лет горно-геологической службе России», Барнаул, 2000 год;
- региональной научно-практической конференции «Экономика природопользования Алтайского региона», Барнаул, 2000 год;
- международной научно-технической конференции «Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науке и производству», Томск, 2001 год;
- второй международной научно-технической конференции «Современные проблемы геологии, минерации и комплексного освоения месторождений полезных ископаемых Большого Алтая», Усть-Каменогорск, 2003 год;
- международной конференции «Современные информационные технологии в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях», Усть-Каменогорск, 2006 год.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников из 172 наименований, содержит 119 страниц текста, 15 таблиц и 14 рисунков.

В первой главе диссертации в ретроспективном плане охарактеризовано использование геофизических методов для оценки технологических свойств колчеданно-полиметаллических руд Восточного Казахстана. Во второй главе рассмотрены петрофизические предпосылки флотационного обогащения руд, гидрометаллургической переработки концентратов и предварительного обогащения руд физическими методами на основе их сортировки и сепарации. Третья глава содержит сведения о геофизических методах, используемых в условиях Рудного Алтая для целей технологического картирования колчеданно-полиметаллических руд. В четвертой главе описан рациональный комплекс геофизических методов, обеспечивающих оценку технологических свойств руд на различных стадиях разведки месторождений.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность бывшим сотрудникам Зыряновской геологоразведочной экспедиции, коллективам ТОО «Геос» и территориального управления «Востказнедра», сотрудникам лаборатории рудничной геологии и управления качеством руд ВНИИцветмета Н.И. Дегтярю, А.А. Михееву и А.С. Филатову, оказавшим большую помощь в проведении полевых и лабораторных работ. В процессе работы автор неоднократно консультировался и обсуждал, изложенные в работе разнообразные проблемы, с геофизиком АО «Казцинк» Г.И. Бабенковым, главным геологом В.Т. Москаликком и главным обогатителем М.В. Косторовым, заведующей лабораторией благородных металлов и флотореагентов ВНИИцветмета Н.В. Сулаквелидзе и заведующей лабораторией технологических испытаний минерального сырья Л.Б. Кушаковой, главным геологом ТОО «Геос» Ю.А. Сергийко и многими другими геологами, геофизиками и обогатителями Восточного Казахстана. Выражаю глубокую благодарность профессору Российского государственного геологоразведочного университета В.В. Бродовому, доктору геолого-минералогических наук А.К. Мазурову, доктору геолого-минералогических наук Л.Е. Ерофееву за помощь, поддержку и советы. Особая моя благодарность профессору Восточно-Казахстанского государственного технического университета В.Д. Борцову за многолетнюю постоянную помощь и консультации.

## **ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**1. Оперативное технологическое картирование колчеданно-полиметаллических руд может быть осуществлено с использованием следующих методов скважинной геофизики и каротажа: способ поляризационных кривых (КСПК), метод ранних стадий вызванной поляризации (РСВП), способ измерения термоЭДС, каротаж сопротивлений (КС), метод электродных потенциалов (МЭП), каротаж магнитной восприимчивости (КМВ), гамма-гамма плотностной каротаж (ГГК-П), рентгенорадиометрический каротаж (РРК), телефотометрия (ТФМ).**

В процессе обогащения и переработки руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая происходят значительные потери полезных компонентов, что обусловлено, в первую очередь, недостаточной изученностью технологических свойств используемого минерального сырья. Так, например, на Николаев-

ской обогатительной фабрике с хвостами обогащения теряется до 43% цинка и до 19% меди (рис.1).

Это побудило автора диссертации разработать рациональные комплексны геофизических методов для оперативной оценки основных технологических свойств руд: их флотуируемости, эффективности гидрометаллургического способа переработки богатых руд и концентратов, возможности использования физических методов сортировки и сепарации руд.

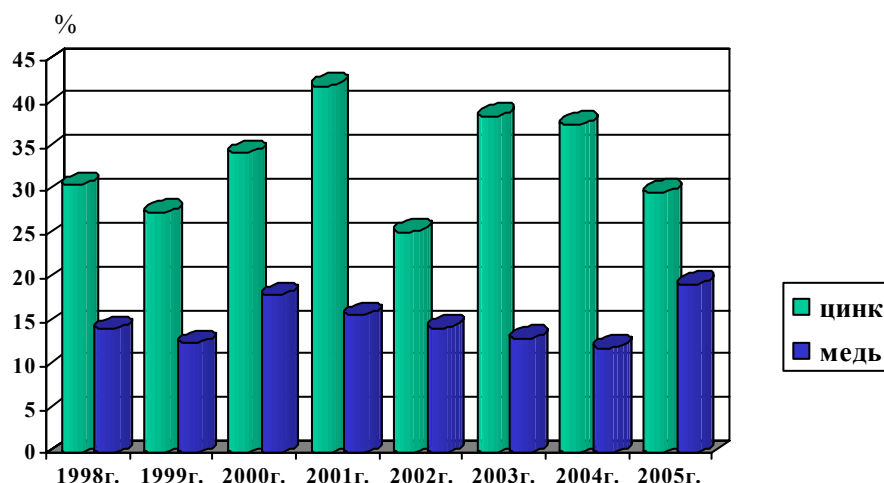


Рис. 1. Потери Zn и Cu с хвостами обогащения на Николаевской обогатительной фабрике

### *1. Рациональный комплекс геофизических методов для оценки флотационных свойств руд.*

*Контактный способ поляризационных кривых (КСПК).* Этот метод основан на изучении последовательно возбуждаемых электрохимических реакций на поверхности рудных минералов от источника электрического тока (Ю.С. Рысс ). Исследованиями установлено, что потенциалы анодных и катодных реакций на минералах связаны с их термоэлектрическими (термоЭДС) и электрохимическими (электродный потенциал) свойствами. Благодаря этому, методом КСПК представляется возможным определять не только минеральный состав руд, но и электрохимические свойства минералов.

Характер поляризационных кривых свидетельствует, что наличие в рудах минералов с эмульсионной структурой оказывает негативное влияние на их флотуируемость (рис. 2).

*Метод ранней стадии вызванной поляризации (РСВП).* Исследованиями А.П. Карасева, О.В. Бумагина, Р.С. Сейфуллина доказано, что временные характеристики РСВП 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». Ими же была установлена связь характеристик спада РСВП с типом проводимости сульфидных минералов.

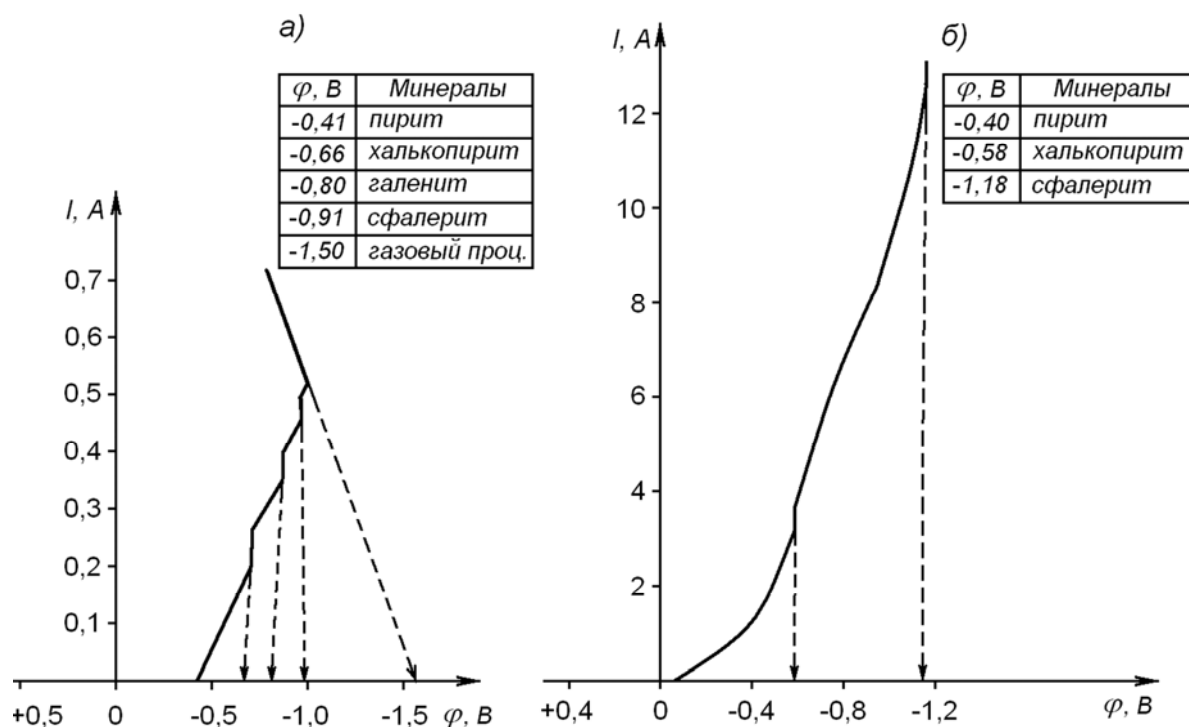


Рис. 2. Поляризационные кривые медно-цинковых руд Рубцовского месторождения:  
а – минералы с эмульсионной структурой отсутствуют,  
б – минералы с эмульсионной структурой составляют 25-30% объема руд

Эти положения подтвердились при использовании метода РСВП в Николаевском карьере, а также при лабораторных измерениях РСВП рудного керна и образцов из горных выработок Орловского, Малеевского и Тишинского месторождений.

На рисунке 3 приведено сопоставление термоЭДС пиритов пиритной матрицы, составляющей 60-80 % объема руд, и временных характеристик РСВП руд Николаевского месторождения (горизонты 197, 212). Как видно на этом рисунке, устанавливается четкая связь между типом проводимости пиритной матрицы и временными характеристиками ранней стадии вызванной поляризации.

Картирование руд с различными электрофизическими характеристиками пиритной матрицы возможно с помощью профилирования методом РСВП по стволу скважин с вычислением приведенной скорости изменения потенциала ВП на малых временах или с помощью каротажа с аппаратурой ЦСП ВПР-48.

**Метод электродных потенциалов (МЭП).** При использовании этого метода измеряется электродная разность потенциалов  $\Delta U_{\text{ЭП}}$ , возникающая на поверхности раздела электронно- или дырочнопроводящих сульфидов с промывочной жидкостью в скважинах. Величина электродного потенциала зависит от минерального состава руд, размеров выделений минералов и их распределения в рудах, pH промывочной жидкости и ее температуры. Возможность применения МЭП для расчленения рудных подсечений по электрофизическим свойствам основывается на следующих свойствах сульфидов:

- различие сульфидных минералов, в том числе и одноименных (например, дисульфидов железа), по величине стационарных электродных потенциалов;



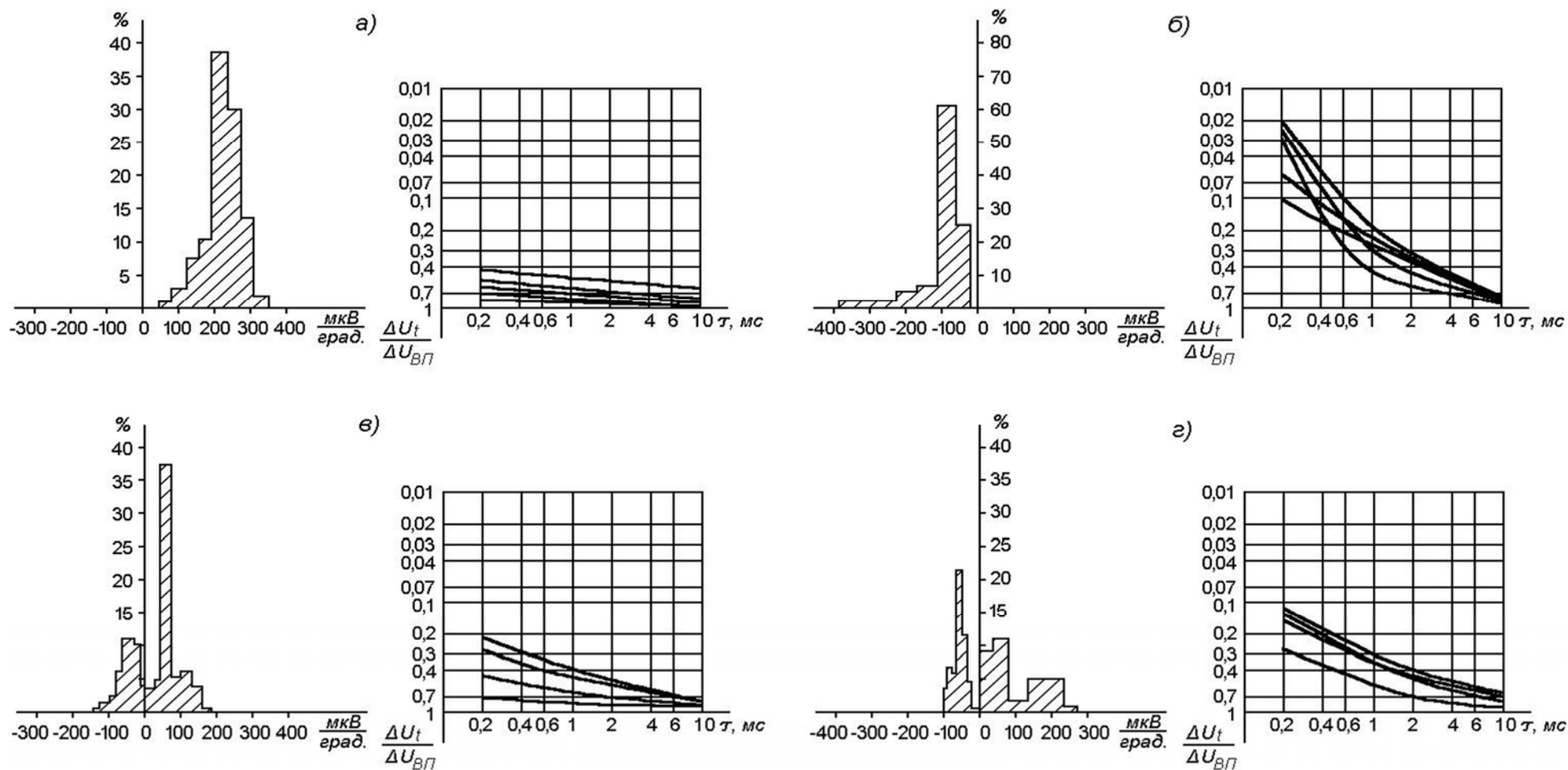


Рис. 3. Гистограммы термоЭДС пиритов и временные характеристики ранней стадии ВП руд Николаевского месторождения (горизонты 197, 212):  
 $\alpha$ - $\varepsilon$  – типы руд: метакolloидные ( $\alpha$ ), переходные ( $\beta$ ), кристаллические ( $\delta$ ), метаморфизованные метакolloидные ( $\varepsilon$ )

- тесная связь коэффициентов термоЭДС сульфидов-полупроводников и их электродных потенциалов;
- изменчивость коэффициента термоЭДС сульфидов-полупроводников с электронной и дырочной проводимостью в средах с различной величиной pH.

*Метод измерения суммарной термоЭДС.* При флотации руд одним из основных факторов, влияющих на взаимодействие минералов с реагентами, является термоЭДС минералов, определяющая знак реагента.

Метод базируется на том, что при одновременном измерении величины термоЭДС зерен кристаллов, имеющих разные знаки, регистрирующаяся термоЭДС будет пропорциональна доле участия и величине ЭДС кристаллов преобладающего знака. В колчеданно-полиметаллических месторождениях Рудного Алтая преобладающими минералами являются дисульфиды железа, составляющие от 30 до 90 % объема руды. На рисунке 3 видно, что природные типы руд Николаевского месторождения различаются по параметру суммарной термоЭДС.

*2. Рациональный комплекс геофизических методов для оценки эффективности гидрометаллургической переработки богатых руд и концентратов.*

Характер гидрометаллургического процесса определяется особенностями окисления первичных минералов, которое зависит от следующих факторов:

- химического окисления на поверхности сульфидов-полупроводников. Протекание этого процесса связано с химической активностью минералов, которая определяется положением уровня Ферми;
- работы естественных микрогальванических элементов, образованных сростками минералов и контактирующими минеральными зёрнами с резко различными электрохимическими свойствами.

Оценка факторов, оказывающих основное влияние на характер гидрометаллургического процесса, осуществляется с помощью комплексирования петрофизических лабораторных и геофизических полевых методов.

На первом этапе путем измерения термоЭДС и проведения рентгенорадиометрического каротажа оценивается присутствие в рудах минералов, формирующих макрогальванические элементы.

Характер распределения в рудных телах минералов может быть значительно уточнен с помощью телефотометрии (ТФМ).

С помощью этих методов можно сделать заключение о наличии в рудах макрогальванических элементов, сформированных минеральными обособлениями пирита с дырочной проводимостью и халькопирита с электронной, а также сфалерита и халькопирита. Распределение халькопирита и пирита может быть установлено с помощью каротажа методами МСК и РРК.

На втором этапе в лабораторных условиях по методике разработанной Л.Б. Кушаковой оценивается наличие в рудах микрогальванических элементов, образованных сростками минералов с резко различными электрофизическими (электрохимическими) свойствами. Присутствие в рудах таких элементов свидетельствует о благоприятных предпосылках использования гидрометаллургического способа переработки богатых руд и концентратов. С другой стороны, это говорит о низкой эффективности применения флотационного способа при

обогащения таких руд.

### *3. Рациональный комплекс геофизических методов для определения возможности сортировки и сепарации руд физическими методами.*

Основными факторами, определяющими возможность сортировки и сепарации руд физическими методами, являются: контрастность распределения металлов, корреляционная связь физических разделительных критериев с содержанием полезных компонентов.

При оценке контрастности распределения полезных компонентов по керну скважин и по результатам опробования горных выработок используются линейные эквиваленты, предложенные Л.Ч. Пухальским.

Для оценки петрофизических свойств, определяющих протекание процессов предварительного обогащения, используются методы РРК, скользящих контактов (МСК) и МЭП. Методами МСК и МЭП выделяются интервалы сосливной и с вкрапленной минерализацией. Методом РРК определяется содержание меди, свинца и цинка в рудных интервалах.

В случае применения в качестве разделительного критерия плотности руд используют методы плотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-П), РРК и МСК. Изучение характера распределения полезных компонентов в пределах выделенных разновидностей руд по их плотности выполняется с помощью РРК.

При использовании в качестве разделительного критерия электрического сопротивления (радиорезонансный способ сепарации) применяют методы электрокаротажа: МСК, каротажа сопротивлений (КС), индукционного каротажа.

Оценка в каждой из выделенных зон содержаний металлов с помощью метода РРК позволяет определить коэффициент их контрастности с учетом дифференциации рудных зон по проводимости.

При выделении интервалов руд с магнитными минералами (пирротин, мельниковит, железосодержащей сфалерит и др.), негативно влияющими на флотуруемость руд, целесообразно использовать каротаж магнитной восприимчивости (КМВ) и каппаметрию в горных выработках. На Николаевском месторождении установлено, что железосодержащие сфалериты метакolloидных руд характеризуются повышенной магнитной восприимчивостью (до  $500 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ). При обогащении руд такие сфалериты легко отделяются с помощью магнитной сепарации.

## **2. Предложен комплекс геофизических методов для оперативного технологического картирования руд, оптимизации процесса рудоподготовки и физических методов сепарации руд.**

Комплекс ГИС рассматривается как единая система геофизических исследований скважин, поверхности и горных выработок, включающая в себя:

- набор скважинных и каротажных методов, необходимых для изучения природных и технологических типов руд;
- методики проведения полевых работ и интерпретации ГИС.

Комплекс методов ГИС при поисках, оценке и разведке месторождений, а также на стадии их эксплуатационной разведки, по характеру решаемых задач отчетливо подразделяется на четыре группы.

Первая из них включает метод заряженного тела, измерение в скважинах

ЕП, КС, РРК. Масштаб исследований методом заряженного тела составляет 1:5 000 – 1:10 000, а способом КС и РРК – 1:500. Основная задача этих методов состоит в выделении и уточнении местоположения рудных интервалов, а также в картировании рудовмещающих структур. На основании полученных этими методами данных строится частная петрофизическая модель месторождения первого приближения, которая используется затем для количественной интерпретации результатов исследований методом заряда.

Вторая группа представлена методами, обеспечивающими увязку рудных интервалов, определение зон выклинивания рудных тел, опосредованное околоскважинного и межскважинного пространства (МЭК, РВП). Масштаб исследований 1:1000. По данным этих методов уточняется петрофизическая модель месторождения первого приближения, которая затем используется для создания следующих ее вариантов при интерпретации результатов исследований по методу заряда. Корректировка петрофизической модели месторождения производится в динамическом режиме по мере пополнения базы данных.

Третья группа методов ГИС обеспечивает оценку вещественного состава и текстурно – структурных особенностей руд, а также содержаний основных и попутных полезных компонентов (РРК, МСК, МЭП, ТФМ). Измерения проводятся в масштабах 1:50 – 1:500. Рекомендуется использование метода КСПК, который позволяет получать информацию по минеральному составу руд, электрофизическим свойствам слагающих их рудных минералов и выполнять оценку ресурсов полезных компонентов. По этим данным составляется модель распределения природных типов руд.

Четвертая группа методов ГИС позволяет изучить физико-химические свойства руд, на основе которых можно оценить флотационную способность руд, эффективность применения гидрометаллургического способа переработки богатых руд и концентратов, а также возможность использования физических методов сортировки и сепарации руд. Эти параметры исследуются в пределах выделенных природных типов руд. Для изучения электрофизических (электрохимических) свойств руд выполняются поточечные измерения методом РСВП и регистрация термоЭДС. При благоприятных условиях (рН бурового раствора, дифференциация рудных минералов по величине термоЭДС) эти методы заменяются каротажем МЭП. Масштаб записи кривых составляет 1:50 – 1:100.

Выбор геофизических методов для оценки физических параметров, предопределяющих возможность предварительного обогащения руд на основе их сортировки и сепарации, осуществляется по относительной величине этих параметров, являющейся разделительным критерием компонентов руд.

Применение современных компьютерных технологий обработки и объемного изображения геофизических параметров позволят формировать и модифицировать физико-геологическую модель месторождения в динамическом режиме по мере накопления информации. Это обеспечивает объемное картирование руд в пределах рудных тел и залежей по природным их типам и технологическим свойствам.

**3. Установлено, что на процессы флотационного обогащения и гидрометаллургической переработки колчеданно-полиметаллических руд Рудного Алтая оказывают влияние следующие их физико-химические**

**свойства: термоЭДС, удельное электрическое сопротивление, электродные потенциалы, поляризуемость, магнитная восприимчивость.**

Изучены петрофизические основы флотационного обогащения руд, гидрометаллургического передела богатых руд и концентратов и обогащения руд физическими методами путем их сортировки и сепарации. При этом были проанализированы следующие данные:

- *вещественный состав руд* Орловского, Николаевского, Малевского, Тишинского, Ново-Березовского месторождений (химический и минералогический состав руд, формы нахождения металлов в рудах и т.д.);
- *физико-химические свойства* основных рудных минералов и руд (термоЭДС, удельное электрическое сопротивление, электродные потенциалы, поляризуемость, магнитная восприимчивость, плотность, рентгенорадиометрическая флуоресценция).

Установлено, что на **флотационное обогащение руд** колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая основное влияние оказывают следующие петрофизические параметры:

- *минералогические формы нахождения основных металлов в рудах;*
- *гранулометрический состав руд;*
- *структурно-текстурные особенности руд;*
- *некоторые физико-химические их свойства.*

В процессе изучения последних было выявлено, что сульфидные минералы относятся к полупроводникам, особенности которых определяются типом проводимости и величиной электродного потенциала.

Тип проводимости характеризуется знаком и величиной коэффициента термоЭДС. Термоэлектрические свойства руд обусловлены присутствием в минералах элементов-примесей. Согласно исследованиям В.И. Вернадского, В.М. Гольдшмита, А.Е. Ферсмана и др., наличие элементов-примесей связано с процессами изоморфизма.

Состав и количество элементов-примесей в кристаллических структурах минералов зависят в основном от двух факторов:

- *термобарогеохимических условий формирования месторождений, контролирующих вхождение ионов в кристаллические структуры минералов.* Колчеданно-полиметаллические месторождения полигенны, то есть формировались разными путями и в несколько этапов. Каждый из этих этапов характеризуется присущей только ему термобарогеохимической обстановкой. Это определяет различия в составе и концентрации элементов-примесей в одноименных минералах, отлагавшихся на разных этапах формирования месторождений. Различия в составе и содержании элементов-примесей в одноименных минералах, в свою очередь, определяют дифференциацию их термоэлектрических свойств в широких пределах;
- *влияния метаморфических процессов, обуславливающих перераспределение элементов – примесей и, следовательно, изменение полупроводниковых свойств минералов.*

В совокупности эти факторы обусловили большую неоднородность электрохимических свойств одноименных минералов в рудных залежах. В таблице 1 приведены характеристики типов проводимости минералов руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая.

На процессы флотации руд негативно влияют следующие факторы:

- широкий диапазон изменения термоЭДС одноименных минералов (от дырочной проводимости до электронной);
- одинаковые значения термоЭДС у различных минералов.

Электродный потенциал, по Г.Б. Свешникову, скачок потенциала на границе электронного (дырочного) проводника с ионной средой.

Г.Б. Свешников на основании изучения электродных потенциалов минералов руд из месторождений Рудного Алтая пришел к выводу о том, что полиминеральная сульфидная руда представляет собой сложный электрод, состоящий из отдельных минеральных электродов, имеющих относительно положительные и отрицательные значения электродного потенциала. При этом минералы электрохимически взаимодействуют между собой и образуют сложный гальванический элемент. Исследованиями Л.Б. Кушаковой установлено, что электродные потенциалы минералов и их термоЭДС находятся в тесной корреляционной связи.

Таким образом, для определения флотационной способности руд геофизическими методами должны быть оценены две группы параметров:

- содержание полезных компонентов, минералогический состав и текстурно-структурные особенности руд;
- термоЭДС рудных минералов, их электродные потенциалы и удельное электрическое сопротивление, магнитные свойства руд.

**Гидрометаллургический метод переработки** богатых руд и концентратов включает в себя следующие технологические операции:

- подготовка концентратов к выщелачиванию с целью перевода извлекаемых металлов в растворимое состояние (различные виды обжига, спекание или сплавление с реагентами);
- выщелачивание металлов химическими реагентами;
- извлечение металлов из раствора.

В таблице 2 приведены данные, характеризующие влияние микрогальванических элементов минералов на гидрометаллургический процесс.

Эти данные свидетельствуют о значительном влиянии естественных гальванических элементов на переход в раствор металлов из первичных сульфидных минералов.

Таким образом, основными факторами, определяющими характер гидрометаллургического процесса, являются:

- наличие в рудах естественных микрогальванических элементов, образованных сростками минералов с различными электрохимическими свойствами;
- присутствие в рудах контактирующих минеральных обособлений, отличающихся друг от друга по знаку и величине суммарной термоЭДС.

Таблица 1

Характеристика электрофизических свойств рудных минералов колчеданно-полиметаллических  
месторождений Рудного Алтая

| Минералы                          | ТермоЭДС, мВ/град. |       |        |                |       |        | Удельное электрическое сопротивление, Ом |                     |                     |                     |                     |                      |
|-----------------------------------|--------------------|-------|--------|----------------|-------|--------|------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|                                   | п-проводимость     |       |        | р-проводимость |       |        | п-проводимость                           |                     |                     | р-проводимость      |                     |                      |
|                                   | мин.               | макс. | средн. | мин.           | макс. | средн. | мин.                                     | макс.               | средн.              | мин.                | макс.               | средн.               |
| <i>Николаевское месторождение</i> |                    |       |        |                |       |        |                                          |                     |                     |                     |                     |                      |
| 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   | -      | -                                        | -                   | -                   | $2,8 \cdot 10^{-6}$ | $7,0 \cdot 10^3$    | $4,2 \cdot 10^{-5}$  |
| Мельниковит, мельниковит-пирит    | -                  | -     | -      | 11,8           | 27,1  | 16,0   | -                                        | -                   | -                   | $6,7 \cdot 10^{-2}$ | 1,42                | $3,5 \cdot 10^{-1}$  |
| Переходные руды                   |                    |       |        |                |       |        |                                          |                     |                     |                     |                     |                      |
| Пирит                             | -13,3              | -1,2  | -3,4   | 5,2            | 23,6  | 8,4    | $1,2 \cdot 10^{-4}$                      | 0,7                 | $8,0 \cdot 10^{-3}$ | $5,4 \cdot 10^{-3}$ | 1,4                 | 0,6                  |
| Халькопирит                       | -2,6               | -2,4  | -2,5   | -              | -     | -      | $6,3 \cdot 10^{-6}$                      | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | $3,8 \cdot 10^{-4}$ | -                   | -                   | -                    |
| Кристаллические руды              |                    |       |        |                |       |        |                                          |                     |                     |                     |                     |                      |
| Пирит                             | -12,3              | -2,5  | -6,1   | -              | -     | -      | $15 \cdot 10^{-6}$                       | 1,1                 | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | -                   | -                   | -                    |
| Халькопирит                       | -58,4              | -20,8 | -28,4  | -              | -     | -      | $1,8 \cdot 10^{-6}$                      | $9,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$ | -                   | -                   | -                    |
| <i>Малеевское месторождение</i>   |                    |       |        |                |       |        |                                          |                     |                     |                     |                     |                      |
| 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              | -10,0 | -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    | -                                        | -                   | -                   | $1,8 \cdot 10^3$    | $9,3 \cdot 10^3$    | -                    |
| Пирротин                          | -                  | -     | -      | 0,8            | 4,6   | 2,1    | -                                        | -                   | -                   | $6,5 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | $12,4 \cdot 10^{-5}$ |
| Галенит                           | -38,0              | -16,4 | -29,2  | -              | -     | -      | $3,0 \cdot 10^{-6}$                      | $2,7 \cdot 10^2$    | $4,3 \cdot 10^{-3}$ | -                   | -                   | -                    |

Таблица 2

Влияние микрогальванических элементов сфалерит+халькопирит на переход в раствор цинка и меди из руд Николаевского месторождения

| Минералы              | Содержание в растворе, мг/дм <sup>3</sup> |          |         |          |
|-----------------------|-------------------------------------------|----------|---------|----------|
|                       | меди                                      |          | цинка   |          |
|                       | 24 часа                                   | 48 часов | 24 часа | 48 часов |
| Без продувки воздуха  |                                           |          |         |          |
| Халькопирит, сфалерит | 0,31                                      | 0,49     | 1,57    | 1,77     |
| Халькопирит, сфалерит | 0,18                                      | 0,23     | 0,64    | 0,77     |
| Халькопирит           | 0,17                                      | 0,19     | —       | —        |
| Сфалерит              | —                                         | —        | 0,21    | 0,28     |
| С продувкой воздуха   |                                           |          |         |          |
| Халькопирит, сфалерит | 0,35                                      | 0,54     | 1,70    | 1,85     |
| Халькопирит, сфалерит | 0,20                                      | 0,25     | 0,75    | 0,88     |
| Халькопирит           | 0,18                                      | 0,19     | —       | —        |
| Сфалерит              | —                                         | —        | 0,25    | 0,33     |

Следовательно, для оценки способности руд к гидрометаллургическому переделу геофизическими методами необходимо определить:

- дифференциацию руд по знаку и величине термоЭДС;
- наличие в рудах естественных микрогальванических элементов.

В таблице 3 приведены характеристики суммарной величины термоЭДС руд основных колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая.

**Петрофизические основы обогащения руд с помощью физических методов на основе их сортировки и сепарации.** На Риддерском и Зырянском горно-обогатительных комбинатах эффективно применяются гравитационные методы обогащения руд: обогащение в тяжелых средах и метод отсадки.

В лабораторных условиях нами разрабатывались методы обогащения бедных и забалансовых руд с помощью физических методов их сортировки и сепарации.

В качестве разделительных критериев использовались:

- рентгенорадиометрическая флуоресценция, обусловленная основными металлами (Pb, Zn, Cu) или их суммой;
- электрическая проводимость и магнитная проницаемость руд и минералов;
- удельная масса руд, рудных и нерудных минералов.

Геолого-геофизическими предпосылками эффективности применения сортировки и сепарации руд физическими методами являются:

- контрастность руд по распределению в них полезных компонентов;
- наличие корреляционной связи между содержанием полезных компонентов и величинами используемых для сортировки и сепарации руд физических разделительных критериев.

Таблица 3

Суммарная величина термоЭДС руд колчеданно-полиметаллических  
месторождений Рудного Алтая

| Природные типы руд         | Тип проводимости, мкВ/град.                |       |       |                                       |       |       |
|----------------------------|--------------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------|-------|-------|
|                            | Преобладание электрон-<br>ной проводимости |       |       | Преобладание дырочной<br>проводимости |       |       |
|                            | мин.                                       | макс. | сред. | мин.                                  | макс. | сред. |
| Николаевское месторождение |                                            |       |       |                                       |       |       |
| Метаколлоидные руды        | -                                          | -     | -     | 98                                    | 510   | 275   |
| Переходные руды            | -258                                       | -0,63 | -125  | 18,7                                  | 420   | 110   |
| Кристаллические руды       | -520                                       | -110  | -315  | -                                     | -     | -     |
| Орловское месторождение    |                                            |       |       |                                       |       |       |
| Полиметаллические руды     | -480                                       | -18   | -276  | 5                                     | 520   | 206   |
| Медно-колчеданные руды     | -590                                       | -127  | -360  | -                                     | -     |       |
| Малеевское месторождение   |                                            |       |       |                                       |       |       |
| Полиметаллические руды     | -510                                       | -12,8 | -260  | 34                                    | 490   | 211   |
| Медно-цинковые руды        | -605                                       | -208  | -418  | -                                     | -     | -     |
| Рубцовское месторождение   |                                            |       |       |                                       |       |       |
| Полиметаллические руды     | -390                                       | -23   | -186  | 11,8                                  | 620   | 316   |

В таблице 4 приведены результаты экспериментальных работ по рентгено-радиометрической сортировке и сепарации рядовых и бедных руд Рудного Алтая.

Как следует из этой таблицы, методы рентгено-радиометрической сепарации пригодны для обогащения руд полиметаллических месторождений.

Получены положительные результаты по разделению отбитой рудной массы в рудопотоке на базе комплексирования рентгено-радиометрической и радиорезонансной сортировки на цинковые, свинцовые, медно-колчеданные и полиметаллические руды.

Таблица 4

Результаты экспериментальных работ по рентгено-радиометрической сортировке и сепарации руд месторождений Восточно-Казахстанской области

| Месторождение    | Выход обогащен. продукта, % | Повышение содержания металлов (в сумме) в обогащенном продукте, % | Повышение извлечения металлов (в сумме) при флотации обогащенного продукта, % | Выход (%) хвостов при сортировке и сепарации руд содержание(%) в них металлов (сумма) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Тишинское        | 80                          | 20                                                                | 5,6                                                                           | 20/0,63                                                                               |
| Малеевское       | 84                          | 17                                                                | 6,8                                                                           | 16/1,56                                                                               |
| Артемьевское     | 85                          | 16                                                                | 4,6                                                                           | 15/0,70                                                                               |
| Орловское        | 92                          | 10                                                                | 5,3                                                                           | 8/0,53                                                                                |
| Николаевское     | 73                          | 24                                                                | 9,4                                                                           | 27/0,49                                                                               |
| Риддер-Сокольное | 90                          | 9                                                                 | 4,6                                                                           | 20/0,14                                                                               |
| Чекмарь          | 60                          | 44                                                                | 17,6                                                                          | 40/0,80                                                                               |

Таким образом, для оценки геофизическими методами возможности применения сортировки и сепарации руд необходимо изучить следующие параметры:

- контрастность распределения металлов в рудах;
- характер распределения плотностных и электромагнитных свойств руд в пределах рудных тел;
- корреляционную связь между содержанием полезных компонентов в рудах с их рентгеновской флуоресценцией.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Выполнен анализ материалов технологического картирования руд при подготовке месторождений Рудного Алтая к промышленному освоению. Разработанные на основе этих данных технологические регламенты и проектные решения нередко приводили к значительным потерям металлов и поискам возможных направлений модернизации технологии обогащения руд и переработки концентратов.

2. В результате изучения петрофизических основ флотационного обогащения руд и гидрометаллургического метода переработки концентратов определен круг физико-химических параметров, подлежащих определению при оценке технологических свойств руд.

3. На основе изучения закономерностей распределения полезных компонентов в рудах полиметаллических месторождений Рудного Алтая и петрофизических основ физических методов предварительного обогащения руд определен комплекс геофизических методов, обеспечивающих организацию систем управления качеством руд в рудопотоках.

4. Изучены возможности геофизических методов для оценки физико-химических параметров, определяющих протекание процессов обогащения и переработки руд.

5. Разработаны комплексы геофизических методов, обеспечивающие на всех стадиях геологоразведочного процесса оценку распределения в пределах рудных тел и зон сортов руд и их петрофизических параметров, определяющих процессы флотационного обогащения руд, гидрометаллургической переработки концентратов и физических методов сортировки и сепарации руд.

6. Предложен рациональный комплекс геофизических методов для оценки технологических свойств руд, что обеспечивает отбор представительных технологических проб для разработки оптимальных технологических схем обогащения и руд переработки концентратов.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бродовой В.В. Геофизические методы разведки рудных месторождений / В.В. Бродовой, В.Д. Борцов, Л.Е. Подгорная, **Д.В. Титов**//М.: Недра, 1990. – 296 с.
2. **Титов Д.В.** Проблема освоения разведанных запасов колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая / **Д.В. Титов**, В.Д. Борцов, Ю.Б. Генкин, Ю.Л. Селезнев//Материалы научно-практической конференции «Минерально-сырьевые ресурсы и устойчивое развитие Казахстана».- Кокшетау, 1998. – С. 100-102.
3. Бродовой В.В. Моделирование тепловых полей колчеданно-полиметаллических месторождений при прогнозной оценке технологических свойств руд / К.В.Борцов, В.В. Бродовой, В.Д. Борцов, М.О. Услугин, В.П. Наумов, **Д.В. Титов**, А.С. Кузнецов, Г.А. Мамаев// Геофизика.- 2000. - №5. - С. 60-64.
4. **Титов Д.В.** Состояние минерально-сырьевой базы Восточного Казахстана и ее потенциал / **Д.В. Титов**, А.А. Малыгин// Материалы региональной научно-практической конференции «300 лет горно-геологической службе России». - Барнаул, 2000. – С. 260-267.
5. Торопчанин А.П. Значение геолого-экономической оценки месторождений в современных условиях / А.П. Торопчанин, В.Т. Москалик, **Д.В. Титов** // Материалы региональной научно-практической конференции «Экономика природопользования Алтайского региона». – Барнаул, 2000. - С. 229-231.
6. Услугин М.О. Экономические аспекты использования синергетических процессов в технологиях переработки труднообогатимых руд колчеданно-полиметаллических месторождений/ М.О. Услугин, В.Д. Борцов, В.В. Бродовой, **Д.В. Титов**, В.П.Наумов// Материалы региональной научно-практической конференции «Экономика природопользования Алтайского региона». – Барнаул, 2000. – С. 214-254.
7. В.Д. Борцов. Экономические перспективы оценки платиноносности месторождений Восточного Казахстана /В.Д.Борцов, М.О. Услугин, Г.С. Дурнев, А.С. Кузнецов, **Д.В. Титов**, В.П. Наумов, Г.А. Мамаев // Материалы региональной научно-практической конференции «Экономика природопользования Алтайского региона». – Барнаул, 2000. – С. 205-208.
8. Услугин М.О. Синергетическая модель колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая / М.О. Услугин , В.Д. Борцов, Н.В. Сулаквелидзе, **Д.В.Титов** // Материалы международной научно-технической конференции «Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науке и производству». - Томск, 2001. – С. 346-350.
9. Борцов В.Д. Особенности комплексирования геофизических методов при геолого-технологическом картировании / В.Д. Борцов, Ю.Б. Генкин, М.О. Услугин, **Д.В. Титов**, В.Д. Наумов, Г.А. Мамаев // Геология и охрана недр.- 2001.- №1. – С. 24-27.

10. Генкин Ю.Б. Геолого-технологическое картирование на различных стадиях разведки колчеданно-полиметаллических месторождений /Ю.Б. Генкин, В.Д. Наумов, В.Д. Борцов, М.О. Услугин, **Д.В. Титов** // Геология и охрана недр.- 2001.- №1. – С. 31-35.

11. Борцов В.Д. Новая модель Николаевского колчеданно-полиметаллического месторождения по геолого-геофизическим данным (Рудный Алтай) / В.Д.Борцов,М.О. Услугин, **Д.В. Титов**, А.С. Филатов, О.А. Гармаш // Всероссийская научно-техническая конференция «Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях».–Томск, 2004.–С.191-195.

12. Келеманов С.И. Минерально-сырьевая база Восточно-Казахстанской области, состояние и перспективы / С.И. Келеманов, **Д.В.Титов**, Т.К. Капезов, В.И. Белянин //Материалы конференции «Современные технологии добычи и производства цветных металлов». - Усть-Каменогорск, 2004. – С. 73-76.

13. Услугин М.О. Перспективы укрепления и улучшения качества минерально-сырьевой базы свинца, цинка, меди, золота по Восточному Казахстану/ М.О. Услугин, **Д.В. Титов**, В.Д. Борцов// Сборник докладов научно-практической конференции «Инновационные технологии при геологических исследованиях». – Алматы, 2005. – С. 42-54.

14. **Титов Д.В.** Физико-геологические модели как основа современных информационных технологий / **Д.В.Титов**, В.Д.Борцов, В.П.Наумов, А.С. Филатов// Материалы международной научной конференции «Современные информационные технологии в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях». - Усть-Каменогорск, 2006. – С. 74-76.

15. **Титов Д.В.** Использование геофизических методов для оценки технологических свойств руд колчеданно-полиметаллических месторождений /Д.В. Титов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309. -№4. - С. 40-47.