

На правах рукописи



ВАЛЬЦЕВА АЛЕКСАНДРА ИГОРЕВНА

**ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ
МЕТОДОМ ГИДРО- И ЭЛЕКТРОХЛОРИНАЦИИ**

Специальность 2.8.9 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат диссертации на соискание
Ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре обогащения полезных ископаемых федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный горный университет»

Научный руководитель – **Морозов Юрий Петрович**
Доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Морозов Валерий Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Общей и неорганической химии ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет» (НИТУ «МИСИС»)

Клюшников Антон Михайлович

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидromеталлургии АО «Уралмеханобр»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И Носова»

Защита диссертации состоится 24 апреля 2024 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета 24.2.423.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, д.30, 2-й учебный корпус, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» <https://www.ursmu.ru/valceva-aleksandra-igorevna>

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук, доцент



Пелевин А.Е.

Актуальность работы. В настоящее время при добыче золота все большую роль играют технологии извлечения благородных металлов из труднообогатимых упорных руд. Прямое цианирование упорного золотосульфидного сырья не позволяет получить высокие показатели извлечения золота. Является необходимым изыскание более эффективных методов, которыми являются методы хлоринации, отличающиеся более высокой скоростью растворения золота и высокими показателями вскрытия золота в упорных рудах.

Хлоринация золотосодержащего сырья широко применялась в XIX веке. Начиная с 80-ых годов XX века методы хлоринации стали активно развиваться в процессах извлечения золота подземным выщелачиванием. Методы хлоринации нашли свое применение на Гагарском и Маминском золоторудных месторождениях. Исследования хлоринационного извлечения золота проводились на Верхотурском, Богомоловском, Шульгинском месторождениях. Процессы хлоринации активно развиваются за рубежом. Хлоринационные технологии применяют на руднике «Карлин» (США), золотоизвлекательной фабрике «Джеррит Кэньон» (США), рудниках «Дип Лидс» (США), «Монбан», «Ребекка» (Австралия).

Большой вклад в развитие хлоринационных технологий внесли: Плаксин И. Н., Каковский И. А., Лодейчиков В. В., Оспанов Х. К., Оспанов А. Х., Воробьев Е. А., Чекушина Т. В., Фазлуллин М. И. и другие ученые.

Перспективным методом хлоринации является электрохлоринация золотосодержащего сырья, позволяющая наиболее полно раскрывать сульфидные минералы. Исследования электрохимических процессов в обогащении золотосодержащего сырья отражены в работах Чантурии В. А., Шафеева Р. Ш., Максимова В. И., Космухамбетова А. Р., Морозова В. В., Морозова Ю.П., Двойченковой Г. П. и других ученых. Методы гидро- и электрохлоринации являются эффективными в процессе извлечения золота из упорных золотосодержащих руд. В настоящее время задачей является дальнейшее изучение процессов гидро- и электрохлоринации и развитие на их основе технологии обогащения золотосодержащего сырья.

В процессе электрохлоринации образуются на аноде газообразные хлор и кислород, на катоде – газообразный водород и щелочной католит. Избыточный хлор, кислород, водород и католит практически не используются. Комплексное использование всех получаемых в процессе электрохлоринации продуктов является важным направлением для создания экономически

выгодной и экологически безопасной технологии. Работа, направленная на научное обоснование и разработку технологии комплексного использования всех продуктов, образующихся при электрохлоринации золотосодержащего сырья, является в настоящее время актуальной.

Объектом исследования является технология гидро- и электрохлоринации золотосодержащего сырья.

Предмет исследования – закономерности процессов гидро- и электрохлоринации.

Цель работы – повышение экономической эффективности и экологической безопасности переработки золотосодержащего сырья на основе комплексного использования продуктов гидро- и электрохимической хлоринации.

Идея исследования заключается в применении хлоринации для извлечения золота из упорных руд и хвостов обогащения, что позволяет повысить экономическую эффективность и экологическую безопасность процесса извлечения золота.

Задачи исследования:

1. Изучение и обобщение опыта переработки золотосодержащего сырья хлоринационными методами.
2. Изучение и исследование закономерностей гидрохлоринации и электрохлоринации золотосодержащего сырья.
3. Разработка способов и аппаратов для реализации процессов.
4. Экспериментальные исследования и испытания разработанных технологий.

Методология и методы исследований

Методологической основой являлись работы современных отечественных и зарубежных ученых в области обогащения и хлоринационной технологии переработки золотосодержащего сырья. Ведущим методологическим основанием данного исследования является структурный подход, обусловленный необходимостью разработки комплексной технологии с учетом многообразия свойств золотосодержащего сырья. Работа выполнена с применением методов прикладной математики, механики, математического и экспериментального моделирования, методов химического, пробирного и минералогических анализов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Контактная анодная поляризация электропроводных частиц за счет возбуждения реакций образования хлора непосредственно на частицах приводит к увеличению скорости растворения, повышению технологических и экономических показателей электрохимической хлоринации золотосодержащего сырья.

2. Совмещение процессов гидрохлоринации и электрохлоринации обеспечивает повышение извлечения золота в золотосодержащий сплав на 2,7 %.

3. Применение образующегося в процессе гидро- и электрохлоринации католита для последовательного осаждения ионов тяжелых металлов обеспечивает увеличение экономической эффективности. Использование газов водорода и кислорода для получения электрической энергии повышает экологическую безопасность.

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается сходимостью теоретических выводов с экспериментальными данными, положительными результатами испытаний процесса гидро- и электрохлоринации на различных золотосодержащих продуктах.

Научная новизна работы заключается в разработке новых технико-технологических решений гидрохимической и электрохимической хлоринации труднообогатимого золотосодержащего сырья.

Практическая значимость работы заключается в разработке экономически эффективной и экологически безопасной технологии переработки золотосодержащего сырья с комплексным использованием получаемых побочных продуктов.

Реализация результатов работы: разработанные технологические решения включены в технологический регламент и техно-рабочий проект переработки хвостов обогащения медно-цинковых руд Карагайлинской обогатительной фабрики, в технологический регламент переработки золотосодержащей руды месторождения Ашалы.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены и доложены на Международных конференциях: «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья» Плаксинские чтения – 2021 (г. Владикавказ, 2021 г.); «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения» Плаксинские чтения – 2022 (г. Владивосток, 2022 г.);

«Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» Плаксинские чтения – 2023 (г. Москва, 2023 г); на Международных научно-технических конференциях: «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2022-2023 гг.).

Публикации

Основные положения диссертации опубликованы в 12 научных работах, в том числе в двух статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и в трех патентах РФ на изобретение.

Личный вклад автора состоит в определении цели и задач исследования, разработке методик исследований, в организации и непосредственном участии в выполнении лабораторных и стендовых испытаний, анализе и обобщении полученных результатов, формулировании выводов.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников информации из 129 наименований, 9 приложений, содержит 202 страницы машинописного текста, 44 рисунка, 32 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы.

Глава 1 содержит обзор достижений в области гидро- химических методов переработки сырья, в том числе методов гидро- и электрохимической хлоринации.

Рассмотрены химизм и методы получения хлора, хлорной воды, процессы растворения золота и сульфидных минералов, практика использования методов хлоринации при переработке золотосодержащих руд, сформулированы задачи исследования теории и практики гидро- и электрохлоринации.

В главе 2 предложена структурная схема гидро- и электрохимической хлоринации, приведенная на рисунке 1. Рассмотрены вопросы получения газообразного хлора и хлорной воды, закономерности протекания электрического тока и поляризации электропроводных частиц в процессе электрохлоринации, закономерности осаждения ионов тяжелых металлов и сорбции золота.

Получение газообразного хлора осуществляется при электролизе раствора NaCl в диафрагменном электролизере. На аноде в зависимости от потенциала образуются газы кислород и хлор. Согласно термодинамике процессов, в первую очередь должно происходить выделение кислорода.

Экспериментально для раствора NaCl концентрацией 4,53 моль/л при температуре 20 °С получены поляризационные кривые анодного выделения кислорода и хлора.

Подтверждено, что при потенциале анода до 1,5 В выделяется газ кислород за счет разложения воды. При потенциале анода 1,60 В одновременно с кислородом начинает выделяться газ хлор. При потенциале анода 1,65 В токи выделения кислорода и хлора сравниваются. Дальнейшее увеличение потенциала до 1,75 В приводит к интенсивному выделению газообразного хлора. При увеличении потенциала до 1,8 В и выше выделение газообразного хлора резко снижается и начинается интенсивное выделение газа кислорода.

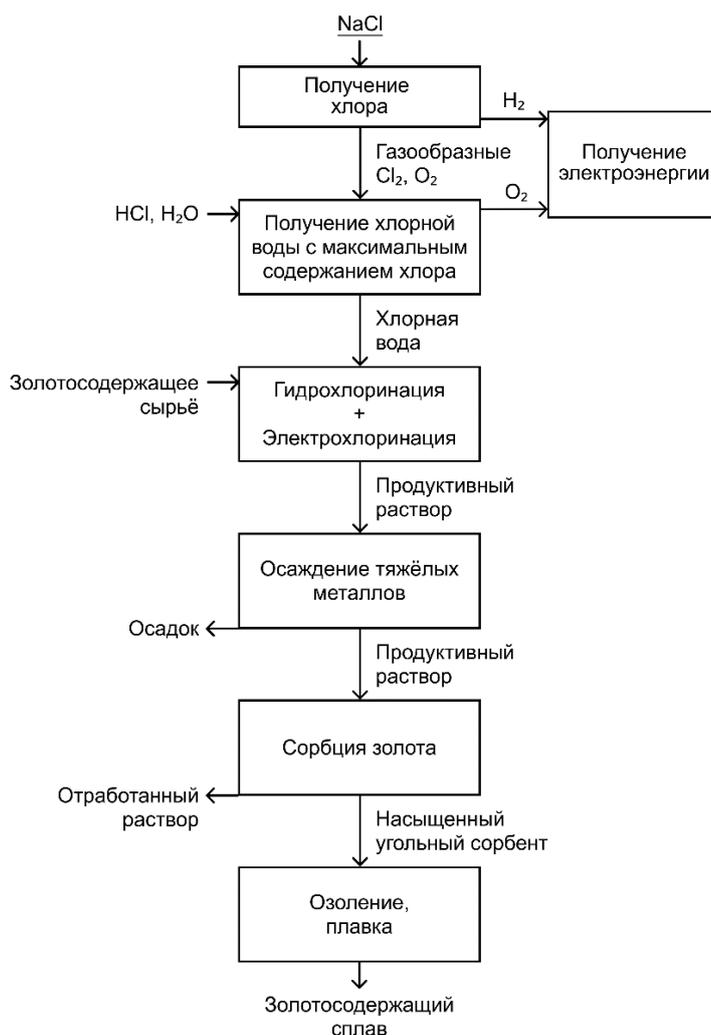


Рисунок 1 – Структурная схема процессов гидро- и электрохлоринации

Получение хлорной воды осуществляется путем растворения газообразного хлора в жидкой фазе. На рисунке 2 приведены зависимости растворимости хлора C_{Cl} от давления P при различных значениях температуры среды.

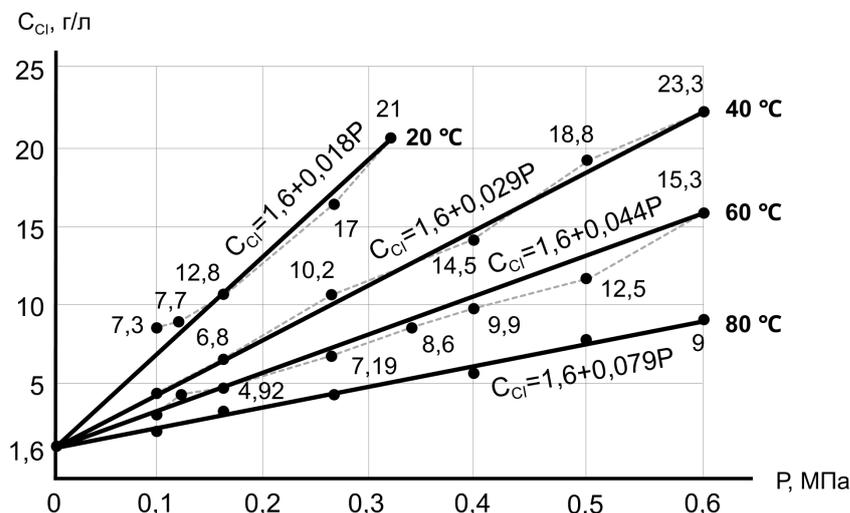


Рисунок 2 – Зависимости концентрации растворенного в воде хлора (C_{Cl}) от давления P при значениях температуры среды 20 °С, 40 °С, 60 °С, 80 °С

Зависимости концентрации хлора C_T от давления P при различных значениях температуры среды адекватно описываются линейным уравнением:

$$C_T = 1,6 + A \cdot P, \quad (1)$$

где A – коэффициент зависимости от температуры по уравнению:

$$A = 1000T, \quad (2)$$

где T – температура среды, °С.

При достижении максимальной концентрации хлора в жидкой фазе растворение прекращается и газ хлор выходит из жидкой фазы.

Экспериментально исследована кинетика растворения хлора при давлении газообразного хлора 0,1 и 0,15 МПа при температуре 20 °С на установке с площадью контакт газовой и жидкой фаз 1 дм².

Установлено, что максимальная концентрация растворенного хлора в воде при давлении 0,1 МПа достигается при продолжительности растворения 180 с, при давлении 0,15 МПа – 160 с, в барботажном режиме при давлении 0,15 МПа – 120 с.

Условием получения хлорной воды максимально возможного содержания растворенного хлора без выброса хлора из жидкой фазы является

подача строго заданного количества хлора в процесс растворения, соответствующего растворимости хлора в жидкой фазе, и обеспечение необходимого для полного растворения хлора времени.

Экспериментально кинетика растворения пузырьков хлора диаметром 2 мм, 5 мм и 10 мм исследована при атмосферном давлении 0,1 МПа при помещении пузырьков хлора с нижней стороны установленной в жидкую фазу подложки. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов по растворению единичных пузырьков хлора в воде

Диаметр пузырьков, мм	Объем пузырьков, л	Масса хлора в пузырьках, г	Время полного растворения, с	Средняя скорость растворения, г/с
2	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$16,75 \cdot 10^{-6}$	45	$0,37 \cdot 10^{-6}$
5	$65,4 \cdot 10^{-6}$	$260,6 \cdot 10^{-6}$	340	$0,76 \cdot 10^{-6}$
10	$523,3 \cdot 10^{-6}$	$2095 \cdot 10^{-6}$	933	$2,24 \cdot 10^{-6}$

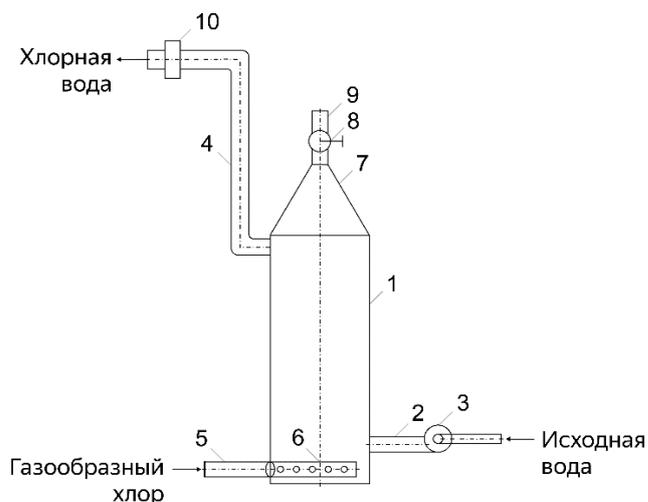


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки контроля полного растворения хлора: 1 – растворная емкость; 2 – патрубок подачи воды;

3 – насос; 4 – патрубок для выпуска хлорной воды; 5 – патрубок для подачи газообразного хлора; 6 – диспергатор газообразного хлора; 7 – коническая часть корпуса 1; 8 – кран; 9 – выпускной патрубок; 10 – клапан регулирования давления

Время полного растворения пузырьков хлора диаметром 2 мм составляет 45 с, пузырьков хлора диаметром 5 мм – 340 с, пузырьков хлора диаметром 10 мм – 933 с.

Условия полного растворения и исключения выброса хлора в атмосферу при растворении пузырьков диаметром 5 и 10 мм исследованы экспериментально на опытной установке, приведенной на рисунке 3.

Установлено, что полное растворение хлора наблюдается при подаче хлора в процесс растворения в количестве до 85–90 % от растворимости хлора.

Для выполнения условий получения хлорной воды с максимально возможной концентрацией

растворенного хлора и исключения выброса хлора из растворной системы предложена технология ступенчатого растворения хлора в растворных емкостях со встречным движением жидкой фазы. Схема движения газовой и жидкой фаз через растворные емкости приведена на рисунке 4.

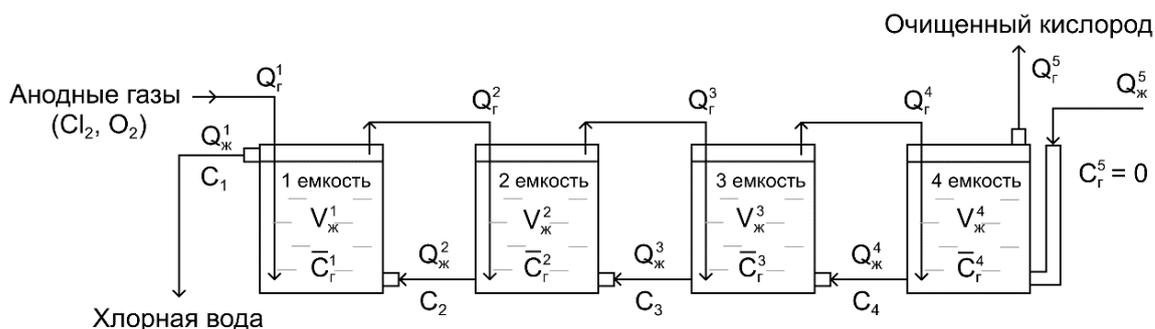


Рисунок 4 – Схема движения газовой и жидкой фаз через растворные емкости при ступенчатом растворении хлора со встречным движением жидкой фазы

Технология четырехступенчатого растворения газообразного хлора испытана при растворении газообразного хлора и воздуха, содержащего 10 % хлора. Установлено, что при давлении 0,15 МПа полное растворение чистого хлора достигается при получении хлорной воды с концентрацией растворенного хлора 8 г/л. При растворении хлора из смеси воздуха с хлором получается хлорная вода с концентрацией растворенного хлора 4,8 г/л, содержание хлора в очищенном воздухе составило 0,008 мг/м³, что значительно ниже ПДК (0,03 мг/м³).

Закономерности протекания электрического тока в процессах электрохимической хлоринации отличаются тем, что электрический ток через твердую фазу (электроды, электропроводные частицы) протекает в виде электронов, а через жидкую фазу – в виде ионов. Считается, что процессы электролиза подчиняются законам электротехники и могут быть представлены эквивалентными электрическими схемами, по которым можно рассчитать электрические параметры элементов схемы.

На рисунке 5 представлены электрические схемы, эквивалентные электрохимической ячейке с двумя токоподводящими электродами в жидкой фазе, участку бесконтактной поляризации частиц и участку контактной анодной поляризации частиц.

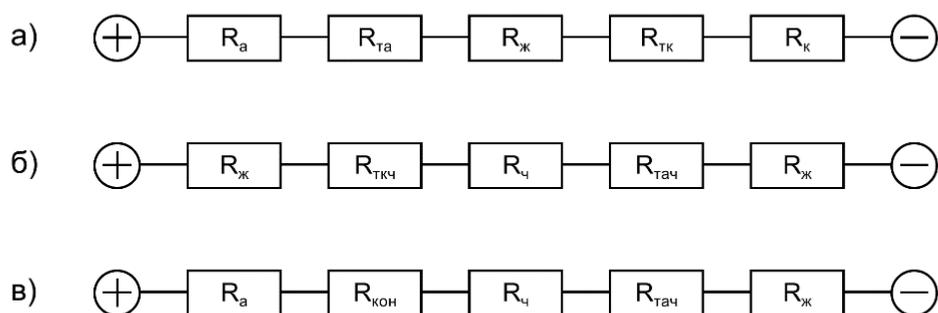


Рисунок 5 – Электрические схемы, эквивалентные двум токоподводящим электродам в жидкой фазе (а); бесконтактной анодной поляризации частицы (б); анодной контактной поляризации частиц (в): R_a и R_k – соответственно сопротивление анода и катода; $R_{та}$ и $R_{тк}$ – соответственно сопротивление торможения разряду ионов на аноде и катоде; $R_{ж}$ – сопротивление жидкой фазы; $R_{тач}$ и $R_{ткч}$ – сопротивления торможения разряду ионов соответственно на анодной и катодной сторонах поляризованной бесконтактно частицы; $R_{кон}$ – сопротивление контакта между анодом и частицей

Для электрической схемы, приведенной на рисунке ба, на границе раздела «анод-жидкая фаза» возникает сопротивление торможения разряду ионов $R_{та}$, а на границе раздела «катод-жидкая фаза» - сопротивление торможения разряду ионов $R_{тк}$. Раздельно определить эти величины невозможно, поэтому рассчитывают суммарное сопротивление торможения разряду ионов на аноде и катоде:

$$(R_{та} + R_{тк}) = R_{общ} - R_a - R_k - R_{ж}. \quad (3)$$

Поляризация частиц и возбуждение на их поверхности электрохимических реакций возможны при отсутствии контакта и при контакте частиц с токоподводящими электродами.

При *бесконтактной поляризации* (рисунок бб) *частицы* выступают в роли биполярных электродов. Протекание тока через биполярную частицу и возбуждение на ней электрохимических реакций будет происходить при создании на ней разности потенциалов, обеспечивающей преодоление сопротивлений торможения разряду ионов на анодной $R_{тач}$ и катодной $R_{ткч}$ сторонах частицы.

При *контактной поляризации* (рисунок бв) появляется контактное сопротивление между частицей и токоподводящим электродом $R_{кон}$.

Наиболее плотный контакт частиц с анодом и между собой может быть обеспечен в случае создания плотной упаковки твердой фазы в перколяционном режиме электрохлоринации. Такая система может быть

представлена в виде объемной матрицы, в которой реализуется смешанный механизм передачи заряда частицам. Эквивалентная схема типовой ячейки контактной поляризации, представлена на рисунке 6.

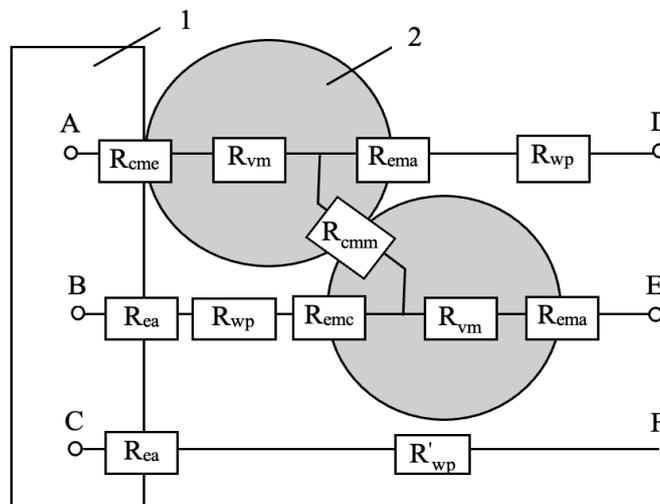


Рисунок 6 – Эквивалентная схема типовой ячейки: 1 – электрод, 2 – электропроводные частицы в процессе контактной электрохлоринации. Цепи: AD, AE – прямая передача заряда; BE, BD – объемная поляризация; CF – химическая поляризация продуктами анодной реакции на рабочем электроде. Элементы ячейки: R_{cme} – сопротивление контакта частица–электрод; R_{cmm} – сопротивление контакта частица – частица; R_{vm} - сопротивление в объеме частицы; R_{wp} – сопротивление в объеме водной фазы; R_{ea} –сопротивление анодной реакции на электроде; R_{ema} - сопротивление анодной реакции на частице; R_{emc} - сопротивление катодной реакции на частице

Выполнены расчеты сопротивления эквивалентной схемы электрохимической хлоринации, в которой в качестве электропроводных частиц использовали частицы пирита. Полученные данные измерений и расчетов при использовании принципа суперпозиций показали, что при поляризации 0,6 В наименьшим сопротивлением обладают цепи AD, AE, соответствующие контактному механизму поляризации.

При перенапряжении на рабочем электроде 1,2 В, протекают интенсивные процессы окисления хлорид-иона с образованием молекулярного хлора, с которыми связана основная доля общего электродного процесса (75,11 %). Потенциодинамические кривые на суспензионном пиритном электроде показали, что при контактной поляризации кинетика процесса определяется образованием газообразных продуктов электролиза. При подкислении рабочей среды до pH = 2,5 ток через электролизер возрастает в 1,7 раза. Наиболее эффективной является электрохлоринация пирита в режиме контактной поляризации с обеспечением непрерывного контакта

частиц пирита с поверхностью электрода. Скорость растворения пирита в данном случае увеличивается в 2,1 – 2,5 раза.

Рассмотрена теоретическая возможность использования получаемых при хлоринации электролизных газов водорода и кислорода в энергетических установках.

Процесс горения водорода осуществляется при наличии окислителя – кислорода или воздуха и носит цепной характер. В результате реакции образуется водяной пар, который пригоден для использования в паросиловых установках. Для полного сгорания 1 м³ водорода требуется 2,38 м³ воздуха. В результате процесса горения образуется 1 м³ воды в виде пара.

Расчеты процессов воспламенения и горения газовых смесей водорода и кислорода по модели Зельдовича с непрерывным детонационным зажиганием с использованием системы уравнений Навье-Стокса показали, что реакция взаимодействия кислорода и водорода является реакцией автоокисления, в которой кислород является бирадикалом.

Взрывобезопасным режимом реакции водорода с воздухом является режим горения при температуре 450-490 °С и при давлении в диапазоне 13–26 кПа. Для обеспечения этих условий безопасного горения камера сгорания должна иметь внешнее охлаждение водой, регулятором по давлению должен быть компрессор, способный создавать и поддерживать диапазон безопасного давления.

Для выработки электроэнергии водородно-кислородный парогенератор подключается к паровой турбине, в качестве которой могут быть использованы без существенных изменений классические конденсаторные турбины типа К-100-240 и типа К-200-130.

Получаемая энергия на такой станции может быть использована для собственных нужд процесса электрохлоринации, а также может отпускаться внешним потребителям.

Современные энергетические установки на базе водородно-кислородных парогенераторов характеризуются высокой удельной мощностью, экологичностью и маневренностью, поэтому могут быть эффективно использованы для выработки электроэнергии на основе получаемого при электрохлоринации водорода.

В главе 3 рассмотрены разработанные новые технические решения по совершенствованию технологии электрохимической хлоринации. Разработана

новая конструкция электрохлоринатора, принципиальная схема которого показана на рисунке 7.

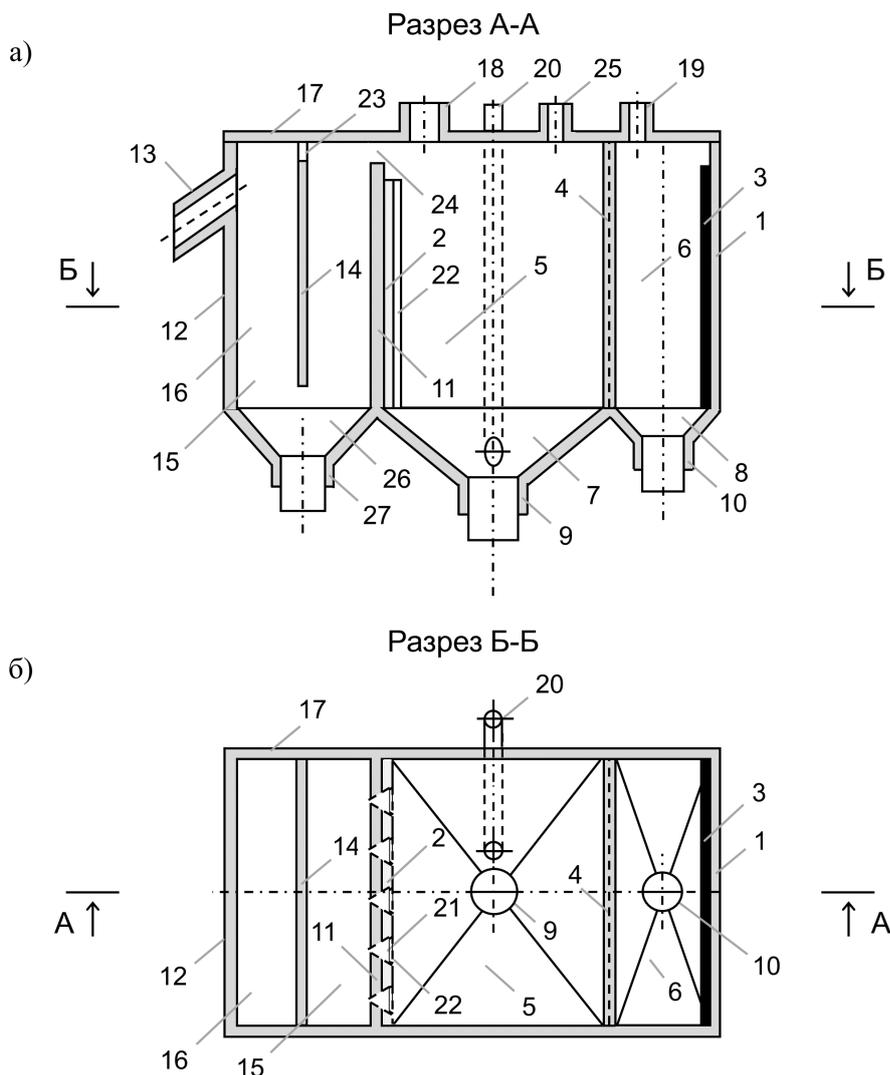


Рисунок 7 – Принципиальная схема электрохлоринатора по патенту №2775983: 1- корпус; 2 – анод; 3 – катод; 4 – диафрагма; 5 – анодный отсек; 6 – катодный отсек; 7,8 – пирамидальные части; 9,10 – сливные патрубки пирамидальных частей; 11 – стенка корпуса; 12 – сорбционная камера; 13 – сливной патрубок сорбционной камеры; 14 – перегородка; 15, 16 – отсеки сорбционной камеры; 17 – крышка сорбционной камеры; 18 – патрубок для выпуска анодных газов; 19 – патрубок для выпуска катодных газов; 20 – патрубок для подачи в анодный отсек продуктивного раствора; 21 – сужающиеся к сорбционной камере вертикальные прорезы; 22 – вертикальная диафрагма; 23, 24 – отверстия для пропускания анодных газов

Отличительной особенностью разработанного электрохлоринатора является то, что в аноде и примыкающей к нему стенке корпуса выполнены вертикальные сужающиеся к сорбционной камере прорезы с диафрагмами, разделяющими пространство прорезей и анодной камеры. Данная конструкция электролизера обеспечивает повышение извлечения золота в

конечный золотосодержащий продукт за счет эффективного удаления комплексных ионов AuCl_4^{-2} из анодного отсека в сорбционную камеру через сужающиеся вертикальные прорези с помощью ускоряющихся потоков продуктивного раствора.

Разработана технология извлечения золота из сырья в присутствии угольного сорбента. Увеличение извлечения золота в разработанной технологии достигается за счет того, что насыщенный золотом угольный сорбент выделяется из обработанного сырья флотацией, а на получение конечного золотосодержащего продукта направляется пенный продукт флотации после переработки одной порцией угольного сорбента одной или нескольких порций золотосодержащего сырья. Установлено, что извлечение золота в конечный золотосодержащий сплав повышается более, чем на 3%. Предложенное техническое решение защищено патентом РФ № 2799942.

Разработан способ комплексного использования образующихся при электро-хлоринации дополнительных продуктов: газов водорода и кислорода, щелочного католита. Предложенная комплексная технология использования получаемых продуктов приведена на рисунке 8. Реализация технологии позволяет существенно повысить экономическую эффективность и экологическую безопасность электрохлоринации. Техничко-экономическими расчетами эффективности использования водородной электростанции мощностью 5 МВт показано, что при капитальных затратах 356 млн. рублей чистая прибыль составит 158 млн. рублей в год. Данная технология защищена патентом РФ № 279460.



Рисунок 8 – Принципиальная схема комплексного использования получаемых продуктов при переработке золотосодержащего сырья

Глава 4 содержит результаты экспериментальных исследований электрохлоринации в обогащении золотосодержащего сырья. Для золотосодержащей руды месторождения Ашалы проведены исследования и разработана технология переработки, включающая рентгенофлуоресцентную сепарацию, сернокислотное растворение окисленных минералов, турбулизационную центробежную сепарацию и электрохлоринацию, обеспечивающая получение золотосодержащего шлиха с массовой долей золота 80 % при извлечении в него золота 20,2 % и золотосодержащего сплава с массовой долей золота 75 % при извлечении в него золота 68,15 %. В таблице 2 приведен баланс по конечным продуктам технологии переработки золотосодержащей руды месторождения Ашалы. Экономическими расчетами показано, что разработанная технология переработки руды месторождения Ашалы обеспечивает чистую прибыль в размере 292 400 707 млн. рублей в год при капитальных затратах 663 200 000 рублей.

Таблица 2 – Баланс по конечным продуктам технологии переработки золотосодержащей руды месторождения Ашалы

Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля золота, г/т	Извлечение золота, %
Аu-шлих	0,000036	800 000	20,2
Золотосодержащий сплав	0,00013	750 000	68,15
Итого Аu-содержащие продукты	0,0000166	769 985	88,35
Хвосты РРС	35,26	0,082	5,7
Раствор сернокислотного растворения	–	0,0016 г Аu	0,11
Хвосты центробежной сепарации	41,78	0,11	3,96
Хвосты электрохлоринации	0,82	2,80	1,60
Отработанный раствор после сорбции	–	0,012 г Аu	0,62
Исходная руда	100,0	1,45	100, 000
Убыль массы с раствором	22,14	–	–

Исследована технология переработки руды с применением комбинированной технологии гидро- и электрохлоринации. После сорбции золота, озоления угольного сорбента и плавки был получен золотосодержащий сплав с массовой долей золота 75 % при извлечении в него золота 70,85 % по отношению к исходной руде. Экономическими расчётами показано, что разработанная комбинированная технология обеспечивает чистую прибыль в размере 113 799 400 млн. рублей в год при дополнительных капитальных затратах 16 000 000 рублей.

На хвостах обогащения медно-цинковой руды Карагайлинской обогатительной фабрики проведены исследования и разработана комбинированная технология переработки хвостов с гидро- и электрохлоринацией. Технология включает предварительное серно-кислотное растворение окисленных минералов в агитационном режиме и совмещенную гидро- и электрохлоринацию. Принципиальная схема комбинированной совместной гидро- и электрохлоринации приведена на рисунке 9.

Перколяционная диафрагменная гидро- и электрохлоринация обеспечивает извлечение в раствор меди 84 %, цинка 82 %, золота 85 % по отношению к кеку сернокислотного растворения.

Исследования сорбции золота на уголь показали, что предварительное осаждение ионов металлов позволяет повысить извлечение золота при сорбции на уголь с 82 % без осаждения до 91 % с осаждением металлов.

В целом, разработанная технология позволяет извлекать в насыщенный угольный сорбент более 80 % золота при содержании в нем золота 2,5 г/кг угля, получать при последовательном осаждении ионов металлов осадки



Рисунок 9 – Принципиальная технологическая схема комбинированной совместной гидро- и электрохлоринации хвостов Карагайлинской обогатительной фабрики

гидроокислов меди при извлечении в него меди 86,9 % и гидроокислов цинка при извлечении в него цинка 80 %.

Разработанная технология использована при разработке технологического регламента и техно-рабочего проекта опытно-промышленной установки для извлечения ценных компонентов из хвостов Карагайлинской обогатительной фабрики.

Экономическими расчетами показано, что разработанная технология переработки хвостов Карагайлинской обогатительной фабрики обеспечивает при производительности 100 т/ч экономический эффект 121 197 340 млн. рублей в год.

В главе 5 на основе разработанных технических решений по гидро- и электрохимической хлоринации разработана опытно-промышленная гидро- и электрохлоринационная установка, предназначенная для испытаний и отработки схем и режимов электрохлоринации различного вида золотосодержащего сырья. Выполнена комплектация установки, позволяющая реализовать ряд технологических схем гидрохлоринации, электрохлоринации и комбинирования этих процессов. Базовая схема цепей аппаратов электрохлоринационной установки приведена на рисунке 10.

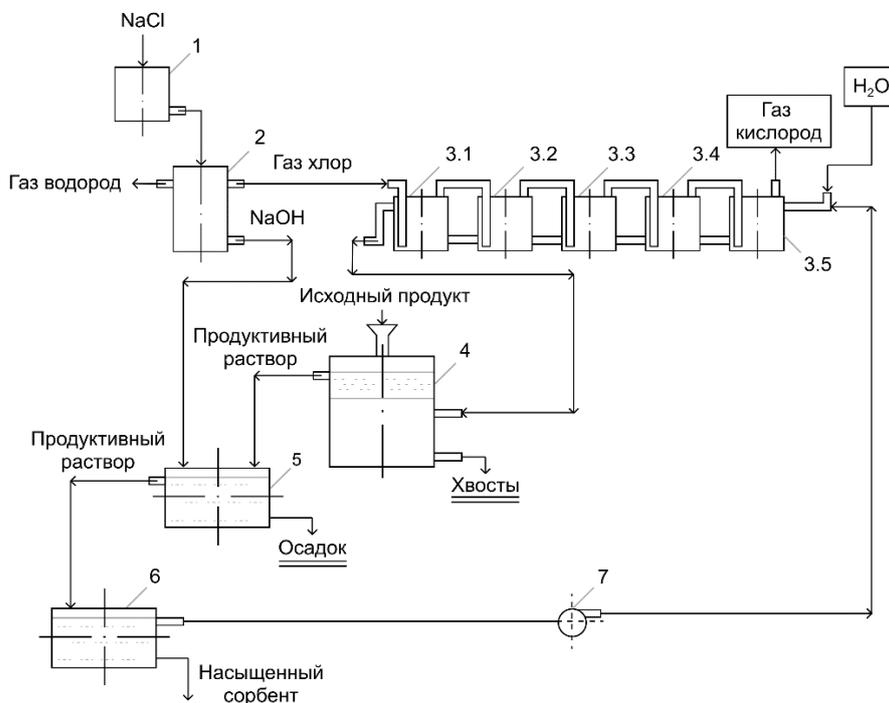


Рисунок 10– Базовая схема цепей аппаратов электрохлоринационной установки:

1 – растворный бак; 2 – электролизер; 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 – емкости для растворения хлора из анодных газов; 4 – электрохлоринатор; 5 – емкость для осаждения ионов тяжелых металлов; 6 – емкость с угольным сорбентом; 7 – насос

Разработанная опытно-промышленная электрохлоринационная установка позволяет реализовать широкий спектр технологий и технологических схем для реализации переработки различного вида золотосодержащего сырья. Наличие четырех электрохлоринаторов позволяет реализовать различные технологии и схемы гидрохлоринации, электрохлоринации и комбинирования процессов гидро- и электрохлоринации. Предусмотрена реализация диафрагменного и бездиафрагменного, агитационного и перколяционного режимов в кислой, нейтральной и щелочной средах с отдельным и совместным осаждением ионов тяжелых металлов. Компонировочное решение опытно-промышленной установки позволяет реализовывать широкий спектр технологий и разрабатывать технологические режимы переработки различного вида золотосодержащего сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технологические решения по совершенствованию технологии переработки золотосодержащего сырья методом гидро- и электрохлоринации, внедрение которых позволит повысить извлечение золота.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе анализа гидрохимических методов переработки золотосодержащего сырья определены преимущества методов хлоринации перед другими методами, включающие высокую скорость растворения золота, возможность применения к различным труднообогатимым рудам.
2. Предложена структурная схема хлоринации, включающая получение газообразного хлора, получение хлорной воды, гидрохлоринацию и электрохлоринацию, осаждение тяжелых металлов, сорбцию золота на уголь, озоление и плавку золы с получением золотосодержащего сплава.
3. На основе экспериментальных исследований предложена технология ступенчатого растворения хлора в растворных емкостях со

встречным движением жидкой фазы, обеспечивающая максимальное содержание растворенного хлора в хлорной воде и исключение выброса хлора в атмосферу.

4. Теоретическим анализом эквивалентных электрических схем, исследованием на основе суперпозиции бесконтактной и контактной поляризации электропроводных частиц, экспериментальными исследованиями показано, что контактная поляризация обеспечивает увеличение скорости растворения частиц пирита в 2,1 – 2,5 раза.
5. Определены режимы взрывобезопасного горения водорода и рекомендации по созданию электростанций для выработки электроэнергии на собственные нужды процессов хлоринации.
6. На уровне изобретений разработаны электролизер и способы извлечения золота из сырья, обеспечивающие повышение извлечения золота в конечный золотосодержащий продукт, повышение экономической эффективности и экологической безопасности процесса переработки золотосодержащего сырья.
7. Применение вместо электрохлоринации комбинированного процесса гидро- и электрохлоринации приводит за счет повышения извлечения золота на 2 % к получению прибыли в размере 113 млн рублей.
8. Технология гидро- и электрохлоринации хвостов Каргалинской обогатительной фабрики при получении золотосодержащего сорбента, медного и цинкового концентратов обеспечивает при производительности 100 т/ч получение прибыли в размере 121 млн рублей в год.
9. Разработана опытно-промышленная установка, выполнена ее комплектация, разработано компоновочное решение установки и предложены для испытания технологические схемы и режимы гидрохлоринации, электрохлоринации и комбинированной гидро- и электрохлоринации.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах
Статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК

1. Исследование кинетики окисления пирита в процессе электрохлоринации / Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева**, И. В. Пестряк, А. С. Шевченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-

технический журнал). Отдельный выпуск. Обогащение полезных ископаемых-1. – 2022. – № 11-1. – С. 169-189.

2. Морозов, Ю. П. Исследование электрических параметров контактной и бесконтактной поляризации частиц при электрохимической обработке минеральных суспензий / Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева** // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 9-20.

Патенты на изобретение

1. Патент РФ №2775983 Электролизер / Ю. П. Морозов, Р. А. Апакашев, А. И. Афанасьев, А. С. Шевченко, **А. И. Вальцева**, М. Ж. Битимбаев // Заявл. 03.12.2021. – № 2021135625 – Оpubл. 12.07.2022 – Бюл. №10.

2. Патент РФ №2794160 Способ извлечения золота из золотосодержащего сырья / Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева**, Р. А. Апакашев, А. С. Шевченко // Заявл. 09.08.2022. – № 2022121536 – Оpubл. 12.04.2023 – Бюл. №11.

3. Патент РФ №2799942 Способ извлечения золота из золотосодержащего сырья / Ю. П. Морозов, Р. А. Апакашев, Е. Л. Евграфова, И. В. Упова, **А. И. Вальцева** // Заявл. 06.12.2022. – №2022131795 – Оpubл. 14.07.2023 – Бюл. №20.

Публикации в других изданиях

1. Комбинированная технология переработки техногенного сырья / А. С. Шевченко, Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева**, М. Ж. Битимбаев // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения): материалы международной конференции 04-08 октября 2021 г., г. Владикавказ. – Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2021. – С. 478-482.

2. Комбинированная технология переработки хвостов обогащения / Ю. П. Морозов, А. С. Шевченко, **А. И. Вальцева** // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 07-08 апреля 2022 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: Изд-во «Типография ФортДиалог», 2022. – С. 261-266.

3. Электрохимическая хлоринация в технологиях комплексной переработки хвостов флотационного обогащения / А. С. Шевченко, Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева** // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения

(Плаксинские чтения): материалы международной конференции 04-07 октября 2022 г., г. Владивосток. – Владивосток: ДВФУ, 2022. – С. 335-339.

4. Морозов, Ю. П. Повышение экологической безопасности процесса хлоринации золотосодержащих руд / Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева** // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 06-07 апреля 2023 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: Изд-во «Типография ФортДиалог», 2023. –С. 14-20.

5. Морозов, Ю. П. Математическое моделирование процесса получения хлорной воды для хлоринации // Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева**, М. Ж. Битимбаев // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 06-07 апреля 2023 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: Изд-во «Типография ФортДиалог», 2023. –С. 56-61.

6. Вальцева А. И. Анализ гидрохимических методов переработки золотосодержащего сырья / **А. И. Вальцева** // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 06-07 апреля 2023 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: Изд-во «Типография ФортДиалог», 2023. –С. 61-66.

7. Морозов, Ю. П. Повышение экологической безопасности при комплексном использовании выделяющихся при электрохимической хлоринации газов / Ю. П. Морозов, **А. И. Вальцева** // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения): материалы международной конференции 02-05 октября 2023 г., г. Москва. – Москва: Изд-во «Спутник», 2023. – С. 519-522.

Подписано в печать 19.02.2024

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать на ризографе.

Печ. л. 1,3. Тираж 100. Заказ № 11

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

620144, г. Екатеринбург. Ул. Куйбышева, 30