



На правах рукописи

АФАНАСОВА АНАСТАСИЯ ВАЛЕРЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ
РУД С УЧЕТОМ ИХ КРИТЕРИЕВ УПОРНОСТИ**

Специальность 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Александрова Татьяна Николаевна

Официальные оппоненты:

Орехова Наталья Николаевна

доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, профессор

Поперечникова Ольга Юрьевна

кандидат технических наук, СП ЗАО «ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ВНЕДРЕНИЕ, СЕРВИС» департамент технологических исследований, заместитель директора


Ведущая организация - ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 7 ноября 2019 г. в 12 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.03 адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д.2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте: www.spmi.ru

Автореферат разослан 6 сентября 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БОДУЭН
Анна Ярославовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Запасы богатых и легкообогатимых золотосодержащих руд истощаются, в связи с этим в переработку вовлекаются руды, относящиеся к категории упорных. Упорность руд может быть обусловлена тонкой вкрапленностью золота в минералы-носители, химической депрессией золота на стадии металлургической переработки или присутствием сорбционно-активных по отношению к растворенному золоту органических соединений. Руды, относящиеся к категории дважды упорных, могут сочетать в себе несколько критериев упорности.

Наличие в руде углеродистого вещества, в особенности в виде сорбционно-активных органических соединений, содержание которых может достигать 2-3 %, существенно усложняет выбор эффективной технологии переработки. Углеродистое вещество при измельчении ошламовывается и в дальнейшем негативно влияет на эксплуатационные и технологические показатели работы флотационного передела, повышая расходы реагентов и снижая селективность процесса в целом. Концентрат загрязняется углеродистыми включениями, доля которых может превышать 10 %. На стадии металлургического передела, ввиду повышенной сорбционной активности углеродистого вещества по отношению к растворенному золоту, извлечение благородных металлов в концентрат имеет низкие значения. Одной из главных проблем при переработке упорных золотосодержащих руд является извлечение ультрадисперсного золота, которое закапсулировано в сульфидных минералах и плохо извлекается традиционными методами. До 35 % потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки связано с тонкими частицами (менее 10 мкм).

Вопросам переработки упорных золотосодержащих руд посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых, таких как Чантурия В.А., Плаксин И.Н., Абрамов А.А., Afenya P.M., Годэн А.М., Лодейщиков В.В., Меретуков М.А., O'Connor C., Седельникова Г.В., Simmons G.L. и др.

Несмотря на существенный прогресс, достигнутый в разработке технологий переработки упорных благороднометалльных руд, эксплуатация месторождений данного типа руд характеризуется высокими потерями благородного металла не только на стадии обогатительного передела, но также и на стадии металлургической

переработки. Ввиду уникального строения углеродистого вещества остается малоизученным вопрос, какая именно его составляющая обладает повышенной сорбционной активностью по отношению к растворенному золоту.

Возникает необходимость проведения предварительной обработки руд и продуктов обогащения, используя различные физико-энергетические методы воздействия, такие как: СВЧ-, электроимпульсная, магнито-импульсная, электрохимическая обработки, электродинамическое и ударно-волновое воздействия, исследованию которых посвящены труды Чантурии В.А., Бунина И.Ж., Ростовцева В.И., Наге К.Е. и др. Поэтому необходимо проведение углубленных исследований в области изучения органической составляющей упорных руд и разработке методов по минимизации ее негативного влияния.

Таким образом, разработка эффективных технологических решений по переработке упорных золотосодержащих руд на основе данных, полученных после изучения их органической составляющей, является актуальной и имеет научную и практическую значимость в современных экономических условиях.

Цель работы: обоснование и разработка технологических решений, обеспечивающих повышение эффективности переработки упорных золотосодержащих руд за счет предварительной селекции концентратов обогащения по степени упорности в соответствии с обоснованными критериями.

Задачи исследования:

1. Анализ современных методов классификации золотосодержащих руд по упорности и особенностям обогащения данного типа руд.

2. Изучение особенностей вещественного состава исследуемой руды и определение сорбционной активности углеродистой составляющей.

3. Разработка методики определения дополнительных критериев упорности руд на основе исследования полученных продуктов обогащения с применением комплекса термических методов анализа.

4. Экспериментально-теоретические исследования влияния СВЧ-нагрева на извлечение золота из продуктов обогащения технологически упорных руд.

5. Разработка эффективной схемы переработки золотосодержащей руды и экономическая оценка ее реализации.

Объект и предмет исследования. Объектом изучения являлись упорные сульфидные золотосодержащие руды, предметом исследования являлись процессы переработки упорных золотосодержащих руд.

Методы исследований. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной базе кафедры обогащения полезных ископаемых Горного университета и института минералогии Фрайбергской горной академии. Анализ исходных проб и продуктов обогащения проводился с использованием прибора совмещенного термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии TGA/DSC1 HT MX1 фирмы Mettler Toledo, Швейцария; системы SKIMMER с квадрупольным масс-спектрографом QMS403/5, совмещенной непосредственно с печью прибора STA 409CD фирмы Netzsch, Германия; рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-7000, фирмы Shimadzu, Япония; сканирующей электронной микроскопии MV 2300, CamScan, Великобритания; анализатора органического углерода TOC-L, фирмы Shimadzu, Япония; спектрометра Varian SpectrAA 220 фирмы Agilent technologies, США; микротомографа Skyscan 1272, фирмы Bruker, США. Флотационные исследования проводились на механических флотомашинах НПК «Механобр-техника», Россия, пневмомеханических флотационных машинах Laarmann, Нидерланды. Статистический анализ данных проведен с помощью программы STATISTICA 10.0.

Научная новизна:

1. Разработана методика определения дополнительных критериев упорности золотосодержащих руд на основе интерпретации данных комплекса термических методов анализа флотационных концентратов, реализация которой позволяет проводить селекцию руд и продуктов обогащения по упорности.

2. Установлены регрессионные зависимости извлечения органического углерода в углеродистый и сульфидный флотационные концентраты от параметров флотации, позволяющие прогнозировать основные технологические параметры процесса.

3. Разработаны и обоснованы эффективные технологические решения переработки упорных золотосодержащих руд с использованием СВЧ-обработки для увеличения извлечения золота за

счет термической деструкции наиболее сорбционно активной углеродистой составляющей.

4. Экспериментально обоснован способ извлечения ультрадисперсных частиц золота из упорных углеродистых руд, основанный на использовании СВЧ-обработки флотационных концентратов, с целью повышения извлечения благородных металлов за счет укрупнения ультрадисперсных индивидов.

Защищаемые положения:

1. Методика определения дополнительных критериев упорности для сульфидных золотосодержащих руд на основе интерпретации данных комплекса термических методов анализа продуктов флотационного обогащения, полученных с использованием экспериментально обоснованного реагентного режима, реализация которой позволяет осуществлять селекцию концентратов по упорности.

2. Использование СВЧ-обработки продуктов обогащения упорных сульфидных золотосодержащих руд позволяет повысить извлечение золота за счет термической деструкции битума и укрупнения ультрадисперсных частиц благородных металлов.

Практическая значимость работы:

— экспериментально подтверждена разработанная методика по определению дополнительных критериев упорности на основе интерпретации данных термического анализа продуктов обогащения;

— разработанная методика определения дополнительных критериев упорности золотосодержащих руд на основе интерпретации данных комплекса термических методов анализа флотационных концентратов, реализация которой позволит проводить селекцию руд и продуктов обогащения по упорности, рекомендована для разработки новых и модернизации существующих горно-обогатительных комбинатов по переработке упорных благороднометалльных руд;

— разработан способ извлечения ультрадисперсных частиц золота из упорных углеродистых руд (патент РФ № 2648400 от 26.03.2018);

— научные и практические результаты по повышению извлечения золота из упорных благороднометалльных руд с применением СВЧ-обработки рекомендованы для использования при переработке руд данного типа и техногенного углеродистого сырья;

— результаты исследований используются в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета при проведении занятий по дисциплинам «Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению», «Флотационные методы обогащения», «Технология переработки руд цветных металлов» и «Химия флотореагентов».

Связь темы диссертации с научно-техническими программами, отраслевыми планами министерств и т.д. Диссертационная работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России» на 2014-2020 годы, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации № 426 от 21 мая 2013 года, № 14.574.21.0168 от 26.09.2017, уникальный идентификатор RFMEFI57417X0168.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, их представительностью и сходимостью, оценкой полученных данных методами математической статистики; применением современного оборудования и средств измерения, а также апробацией полученных результатов на международных и всероссийских конференциях.

Апробация работы.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на научно-практических конференциях как российского, так и международного уровней: IMPC-2018 XXIX Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (Москва, 2018), Innovation Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects: Proceedings of the 11th Russian-German Raw Materials Conference (Потсдам, 2018), международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2017), международная научно-практическая конференция «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли» (Москва, 2017), международная конференция «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения – Санкт-Петербург, 2016), 11 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler (Фрайберг, 2016), всероссийская конференция с международным участием «Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов»

(I Научные чтения памяти профессора В.Г. Лазаренкова) (Санкт-Петербург, 2016).

Публикации.

Основные результаты исследований опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 3 входят в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки, 4 опубликованы в изданиях, включенных в международные базы данных (Scopus и WoS), получен 1 патент.

Личный вклад автора в получении научных результатов заключается в постановке и реализации задач исследования, обосновании научных положений; разработке методики определения дополнительных критериев упорности золотосодержащих руд для селекции флотационных концентратов по упорности; обработке и интерпретации экспериментальных данных, полученных с использованием комплекса термических методов анализа продуктов обогащения; получении адекватных математических моделей для прогнозирования основных технологических параметров процесса углеродистой и сульфидной флотаций; разработке и обосновании эффективных технологических решений переработки упорных золотосодержащих руд с использованием СВЧ-воздействия для повышения извлечения золота.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложения. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 54 таблицы и 76 рисунков. Библиография включает 147 наименований.

Благодарности. Автор глубоко признателен доктору технических наук, профессору Татьяне Николаевне Александровой и коллективу кафедры обогащения полезных ископаемых Горного университета за оказанную поддержку и научное консультирование на протяжении всей работы. Автор выражает особую благодарность директору института минералогии ТУ «Фрайбергская горная академия» доктору, профессору Герхарду Хайдэ и коллективу института за содействие в выполнении диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена проблематика и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

В первой главе проведен анализ современной научно-технической, нормативной и методической литературы в области переработки упорных золотосодержащих руд и их классификации, методов оценки сорбционной активности углеродистого вещества и способов извлечения ультрадисперсного золота для обоснования методов повышения извлечения золота из упорных руд.

Во второй главе отражены результаты изучения объекта исследования, его минералогических и геологических особенностей. Описан комплекс методов по исследованию обогатимости сульфидных золотосодержащих руд, включающий сульфидную и углеродистую флотации, выщелачивание и СВЧ-обработку полученных концентратов, и определение сорбционной активности углеродистого вещества. Разработан алгоритм исследования по определению дополнительных критериев упорности, включающий флотационное обогащение и комплексное термическое исследование флотационных концентратов.

В третьей главе разработана методика определения дополнительных критериев упорности руд на основе исследования полученных продуктов обогащения с применением комплекса термических методов анализа. Уточнена классификация упорных золотосодержащих руд типа «Г» с определением дополнительных критериев упорности.

В четвертой главе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований влияния СВЧ-нагрева на извлечение золота из технологически упорных руд и их продуктов обогащения.

В пятой главе разработана схема переработки упорных золотосодержащих руд на основе селекции флотационных концентратов с учетом их критериев упорности и их последующей СВЧ-обработкой для увеличения извлечения золота. Проведена оценка экономической реализации работы.

В заключении даны обобщенные выводы по результатам диссертационного исследования.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Методика определения дополнительных критериев упорности для золотосодержащих руд на основе интерпретации данных комплекса термических методов анализа продуктов флотационного обогащения, полученных с использованием экспериментально обоснованного реагентного режима, реализация которой позволяет проводить селекцию руд и продуктов обогащения по упорности.

Объектом исследования являлись золотосодержащие сульфидные руды, относящиеся к дважды упорным сульфидным золотосодержащим рудам вследствие тонкой вкрапленности золота в сульфидные минералы и присутствия сорбционно активного углеродистого вещества. Основными рудными минералами в руде являются пирит и арсенопирит. Главным ценным компонентом является золото. Превалируют микроскопические и субмикроскопические (размером менее 10 мкм) включения золота в пирите и арсенопирите. Среднее содержание золота в исследуемых образцах руды составляет $4,50 \pm 0,20$ г/т, среднее содержание органического углерода равно $1,40 \pm 0,05$ %.

На основании изучения кинетики измельчения исследуемых образцов руды, получено уравнение, позволяющее прогнозировать зависимость прироста требуемого класса крупности -71 мкм от времени измельчения:

$$y_{-71\text{мкм}} = 100 - 93,70 \cdot e^{-0,1331 \cdot t^{0,953}} \quad (1),$$

где $y_{-71\text{мкм}}$ – выход класса -71 мкм, %; t – время измельчения, мин.

На рисунке 1 визуализирована зависимость выхода класса -71 мкм от времени измельчения. Эксперименты по измельчению проводились в лабораторной шаровой мельнице при крупности питания $-2+0$ мм, степени заполнения мельницы измельчающими телами 45 %, частоте вращения барабана мельницы 110 об/мин.

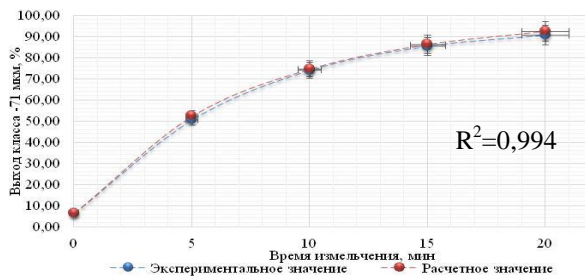


Рисунок 1 – График кинетики измельчения

Проведенные исследования по распределению органического углерода по классам крупности после измельчения до $P_{60}=71$ мкм показали, что 60 ± 2 % от общего содержания органического углерода сосредоточено в классе $-0,071+0$ мм, что подтверждает склонность углеродистого вещества к ошламованию.

Для снижения количества органического углерода в сульфидном концентрате были проведены исследования процесса флотационного обогащения образцов исследуемых руд. На основании проведенного литературного обзора в качестве депрессора углеродистого вещества были выбраны: КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза), КМК (карбоксиметилкрахмал), водорастворимый нигрозин, кукурузный и картофельный декстрин. Реагентный режим также включал: медный купорос, аэрофлот, БКК (бутиловый ксантогенат калия) и вспениватель. Анализ полученных данных проводился с использованием дисперсионного анализа. В качестве наиболее эффективного депрессора органического углерода выбран кукурузный декстрин.

Для углубленного исследования сульфидной флотации с целью минимизации извлечения в концентрат органического углерода была составлена матрица планирования эксперимента. В качестве выходных параметров были выбраны содержание и извлечение органического углерода в пенный продукт. Выбранные для исследования факторы, а также диапазоны их варьирования приведены в таблице 1. На рисунке 2 изображена поверхность отклика для содержания и извлечения органического углерода в концентрат в зависимости от влияния выхода класса -71 мкм и расхода депрессора.

Таблица 1 – Факторы и диапазоны их варьирования

Выбранный фактор	Обозначение	Уровни факторов		
		-1	0	1
Выход класса -71 мкм в питании	X_1	60	75	90
Расход депрессора (декстрин), г/т	X_2	100	300	500

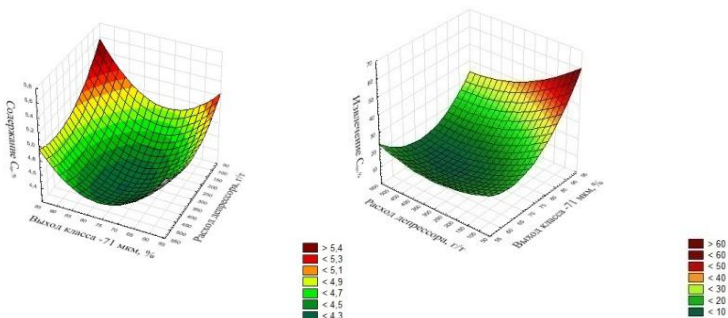


Рисунок 2 – Поверхность отклика для содержания (слева) и извлечения (справа) органического углерода в концентрат в зависимости от влияния выхода класса -71 мкм и расхода депрессора

После компьютерной обработки экспериментальных данных были получены прогностические математические модели, адекватно описывающие зависимость содержания и извлечения органического углерода в концентрат от выхода класса -71 мкм и расхода депрессора:

$$\beta_{\text{Сорг}} = 4,18 + 0,05 \cdot X_1 - 0,16 \cdot X_2 - 0,07 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,41 \cdot X_1^2 + 0,29 \cdot X_2^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{Сорг}} = 12,76 + 9,39 \cdot X_1 - 5,38 \cdot X_2 - 5,24 \cdot X_1 \cdot X_2 + 8,66 \cdot X_1^2 + 3,00 \cdot X_2^2 \quad (3),$$

где $\beta_{\text{Сорг}}$ и $\varepsilon_{\text{Сорг}}$ – содержание и извлечение органического углерода в концентрат, соответственно; X_1 – уровень фактора – выход класса -71 мкм в питании флотации; X_2 – уровень фактора – расхода депрессора (кукурузный декстрин).

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных показали, что погрешность не превышает 5 %, что позволяет использовать данную модель для прогноза показателей флотации в исследуемом диапазоне.

Коэффициент корреляции для полученной модели составляет $R^2=0,926$. Минимальное извлечение органического углерода в сульфидный концентрат достигается при выходе класса -71 мкм, равном 75 %, расходе депрессора 380 г/т.

На основании анализа результатов проведенного тестового выщелачивания были отобраны две серии сульфидных флотационных концентратов: с низким извлечением золота (46 % для серии ФК-1) и высоким извлечением золота (88 % для серии ФК-2). Содержание золота для серии ФК-1 составляет 68 г/т, для серии ФК-2 – 74 г/т.

Результаты анализа сульфидных концентратов представлены таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследования образцов руды на обогатимость

Серия	Наименование продукта	$\gamma, \%$	$\beta_{\text{Au}}, \text{ г/т}$	$\beta_{\text{Сорг}}, \%$	$\varepsilon_{\text{Au}}, \%$	$\varepsilon_{\text{Сорг}}, \%$
ФК-1	Сульфидный концентрат	5,56	67,90	3,97	83,89	15,77
ФК-2	Сульфидный концентрат	5,36	74,10	4,15	88,26	15,89

Для определения сорбционной активности углеродистого вещества в исследуемых сериях были подготовлены навески углеродистого флотационного концентрата с содержанием органического углерода $80 \pm 1 \%$. Установлено, что углеродистое вещество, выделенное из руд, обладает повышенной сорбционной активностью по отношению к растворенному золоту, которая для серии ФК-1 составляет $0,83 \pm 0,03$ г/кг, для серии ФК-2 составляет $0,40 \pm 0,02$ г/кг.

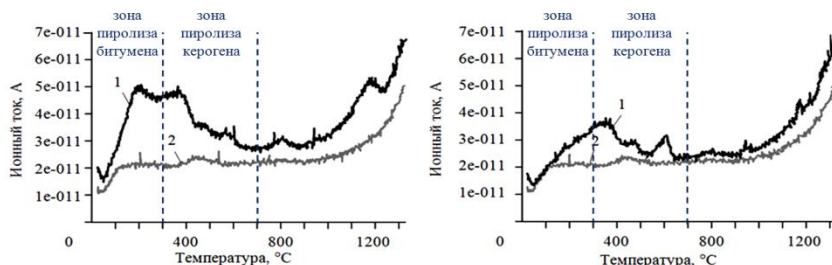


Рисунок 3 – регистрация $C_2H_5^+$ фрагментов образцов серии ФК-1 (слева) и ФК-2 (справа); 1 – образец; 2 – пустое измерение

Для исследования углеродистой составляющей образцов был использован комплекс термических методов анализа, включающий термогравиметрическое исследование и масс-спектрометрический анализ исходящих газов. Для образцов серии ФК-1 были зарегистрированы пики для фрагментов CH_3^+ , $C_2H_5^+$ и $C_3H_7^+$ в интервале температур 100-300 °С, что типично для пиролиза битума, и в интервале температур между 300 и 700 °С, где имеет место пиролиз керогена. В то время, как у образцов серии ФК-2 были зарегистрированы пики только в интервале температур между 300 °С и 700 °С. Установлено, что наличие в руде битума является дополнительным критерием упорности (рисунок 3).

На основании систематизации результатов, полученных после интерпретации данных комплекса термических методов анализа

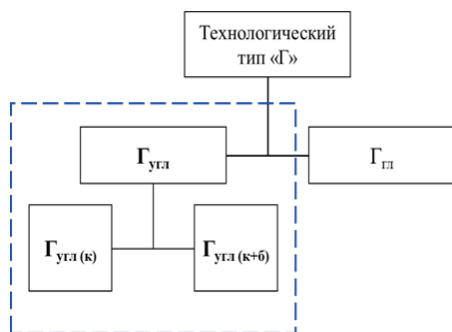


Рисунок 4 – Уточнение дополнительных критериев упорности для упорных руд технологического типа «Г»

флотационных концентратов с разной степенью извлекаемости золота, разработана методика, позволяющая проводить селекцию флотационных концентратов и исходных руд на продукты с высокой и низкой сорбционной активностью углеродистого вещества. На рисунке 4 приведено уточнение схемы классификации благороднометаллических руд по

упорности для технологического типа «Г». Углеродистые руды типа Г ($\Gamma_{\text{угл}}$) дополнительно подразделяются на руды, содержащие кероген ($\Gamma_{\text{угл(к)}}$) и содержащие кероген и битум ($\Gamma_{\text{угл(к+б)}}$). Дополнительным критерием упорности является присутствие битума.

Основываясь на температурных данных зоны устойчивости битума, обоснованы направления термодеструкции наиболее сорбционно активной составляющей концентратов.

2. Использование СВЧ-обработки продуктов обогащения упорных сульфидных золотосодержащих руд позволяет повысить извлечение золота за счет термической деструкции битума и дополнительного укрупнения ультрадисперсных частиц благородных металлов.

Для дополнительного снижения извлечения органического углерода в сульфидный концентрат проведено изменение топологии схемы - добавлена предварительная углеродистая флотация. Для проведения исследования углеродистой флотации с целью максимизации извлечения в концентрат органического углерода была составлена матрица планирования эксперимента. В качестве выходных параметров были выбраны содержание и извлечение органического углерода в пенный продукт. Выбранные для исследования факторы, а также диапазоны их варьирования приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Факторы и диапазоны их варьирования

Выбранный фактор	Обозначение	Уровни факторов		
		-1	0	1
Расход воздуха, м ³ /ч	X ₃	0,5	1	1,5
Расход вспенивателя VS, г/т	X ₄	50	100	150

На рисунке 5 изображена поверхность отклика для содержания и извлечения органического углерода в концентрат в зависимости от расхода воздуха и вспенивателя.

После компьютерной обработки экспериментальных данных в электронных таблицах Microsoft Excel были получены прогностические математические модели адекватно описывающие зависимость содержания и извлечения органического углерода в концентрат от расхода воздуха и вспенивателя:

$$\beta_{\text{Сорг}} = 23,14 + 1,28 \cdot X_3 - 0,44 \cdot X_4 + 0,17 \cdot X_3 \cdot X_4 - 5,58 \cdot X_3^2 - 3,75 \cdot X_4^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{Сорг}} = 39,83 + 5,61 \cdot X_3 + 2,63 \cdot X_4 + 1,38 \cdot X_3 \cdot X_4 - 7,99 \cdot X_3^2 - 8,87 \cdot X_4^2 \quad (5),$$

где $\beta_{\text{Сорг}}$ и $\varepsilon_{\text{Сорг}}$ – содержание и извлечение органического углерода в концентрат, соответственно; X_3 – уровень фактора – расход воздуха; X_4 – уровень фактора – расход вспенивателя.

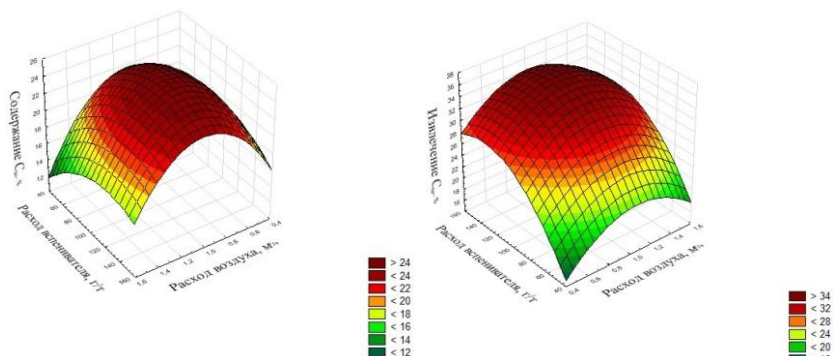


Рисунок 5 – Поверхность отклика для содержания (слева) и извлечения (справа) органического углерода в концентрат в зависимости от влияния расхода воздуха и вспенивателя

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных показали, что погрешность не превышает 5 %, что позволяет использовать данную модель для прогноза показателей флотации в исследуемом диапазоне. Коэффициент корреляции для полученной модели составляет $R^2=0,933$. Максимальное извлечение органического углерода в углеродистый концентрат было получено при расходе воздуха $1,10 \text{ м}^3/\text{ч}$, расходе вспенивателя 100 г/т .

Исследование кинетики процесса флотации углерода позволило получить систему уравнений, позволяющую прогнозировать извлечение органического углерода в пенный продукт:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = 62,50 \cdot t \cdot (t+205,19)^{-1} \text{ при } t \leq 240 \text{ с,} \\ \varepsilon_2(t) = 38,46 \cdot t \cdot (t+33,92)^{-1} \text{ при } 240 \leq t \leq 720 \text{ с.} \end{cases} \quad (6)$$

На разработанном реагентном режиме с предварительной флотацией углеродистого вещества наработаны флотационные концентраты серии ФК-3 с содержанием золота $85,4 \text{ г/т}$ (извлечение золота в концентрат после выщелачивания составляет $56,2 \%$) содержащие кероген и битум (тип $\Gamma_{\text{угл(к+б)}}$). Содержание органического углерода в концентрате составляет $2,55 \%$.

Исследование влияния СВЧ-обработки проводилось с целью термической деструкции битума на сульфидных флотационных

конcentратах и с целью укрупнения ультрадисперсного золота на углеродистых флотационных концентратах.

Флотационные концентраты серии ФК-1 (извлекаемость золота в концентрат после выщелачивания составляет 46,4 %) и ФК-3 (извлекаемость золота в концентрат после выщелачивания составляет 56,2 %) подвергались СВЧ-обработке с целью термической деструкции наиболее сорбционно активной составляющей флотационных концентратов – битума. Наилучшие показатели по извлекаемости золота были получены при мощности СВЧ-печи 240 Вт, времени воздействия 10-12 минут. Температура нагрева составляла порядка 300-350 °С. Получено, что СВЧ-обработка сульфидных флотационных концентратов перед выщелачиванием позволяет повысить извлечение золота из упорных золотосодержащих руд до 85,4 %.

С использованием СВЧ-обработки были проведены исследования по укрупнению ультрадисперсных частиц золота из углеродистых флотационных концентратов. Укрупнение частиц благородных металлов наблюдалось при увеличении мощности СВЧ-печи до 600 Вт и времени обработки 10-15 минут. Температура при этом составляла порядка 700-800 °С. С применением СВЧ-обработки происходит нагрев образцов до температуры в несколько сотен градусов. При нагревании расширение руды и пустой породы проходит неодинаково, и на границе этих материалов возникают нормальные и тангенциальные механические напряжения. В результате СВЧ-воздействия появляются трещины, и горная порода расслаивается. Следовательно, происходит укрупнение ультрадисперсных частиц золота за счет возникновения дефектов в минерале и перемещения частиц благородных в периферические части зерен и межзерновое пространство, где формируются укрупненные индивиды.

На рисунке 6 приведены результаты исследования укрупнения ультрадисперсных частиц золота для флотационных концентратов, полученных после углеродистой флотации. Получено, что при СВЧ-обработке углеродистых концентратов происходит укрупнение частиц золота до размеров нескольких микрон, что делает возможным дальнейшее извлечение укрупненных частиц благородных металлов с применением флотационных либо гравитационных методов обогащения.

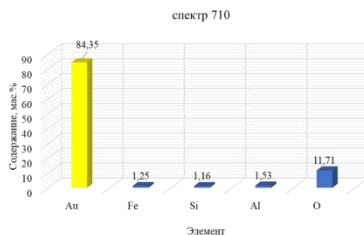
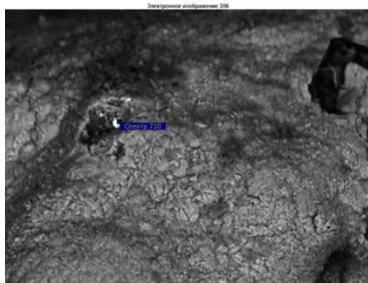


Рисунок 6 – Укрупнение ультрадисперсных частиц золота до нескольких микрон с применением СВЧ-обработки из углеродистых флотационных концентратов

На рисунке 7 представлена разработанная схема переработки упорных сульфидных золотосодержащих руд, включающая предварительную углеродистую флотацию с обоснованным реагентным режимом, концентрат которых поступает на СВЧ-обработку для укрупнения ультрадисперсных частиц золота с целью их дальнейшего извлечения; и селекцию сульфидных флотационных концентратов с применением комплекса термических методов анализа для учета дополнительных критериев упорности; для флотационных концентратов с критерием упорности $\Gamma_{\text{угл(к+б)}}$ обоснован режим СВЧ-обработки для термической деструкции наиболее сорбционно активной составляющей – битума.

В таблице 4 приведены усредненные результаты обогащения, полученные с использованием разработанной схемы, приведенной на рисунке 7.

Таблица 4 – Результаты обогащения, полученные с использованием разработанной схемы

Продукт	γ , %	$\beta_{\text{Сорг}}$, %	β_{Au} , Г/Т	$\epsilon_{\text{Сорг}}$, %	ϵ_{Au} , %
Углеродистый к-т	1,91	24,96	2,95	34,13	1,25
Сульфидный к-т	4,56	2,55	85,40	8,31	86,54
Хвосты	93,53	0,86	0,59	57,56	12,21
Питание	100,00	1,40	4,50	100,00	100,00

Проведена оценка экономической эффективности разработанной принципиальной схемы переработки упорных золотосодержащих руд по сравнению со стандартной схемой переработки данного типа руд. Получено, что увеличение себестоимости переработки возрастает за счет увеличения затрат на

электроэнергию, однако, при этом повышается ожидаемая прибыль от тонны перерабатываемой руды за счет вовлечения в переработку углеродистого и высокоуглеродистого сульфидного концентратов, которые ранее при стандартной схеме переработки данного типа руд уходят в отвальные хвосты и продаются сторонним покупателям, соответственно.

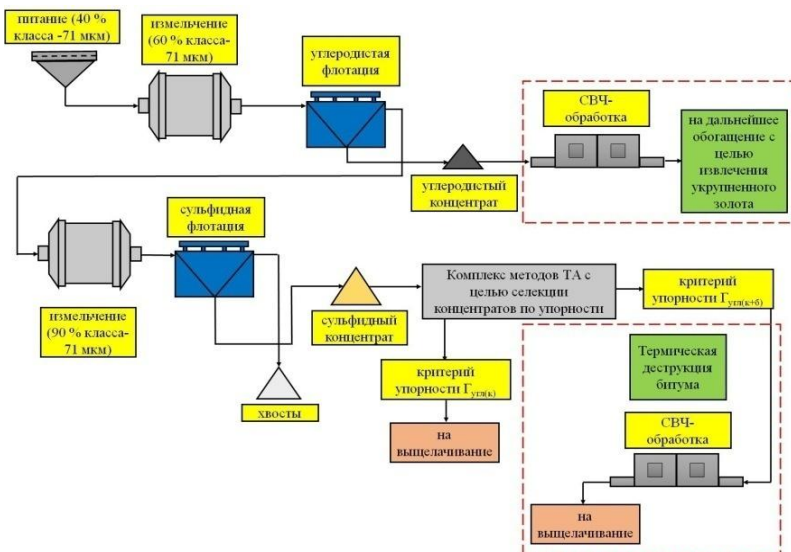


Рисунок 7 – Разработанная принципиальная схема переработки упорных сульфидных золотосодержащих руд

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научно-технические результаты заключаются в следующем:

1. На основании проведения минералого-технологических исследований упорных золотосодержащих руд установлено содержание и распределение органического углерода по классам крупности. Получено, что $60 \pm 2\%$ от общего содержания органического углерода в исходной руде сосредоточено в классе $-0,071+0$ мм. С использованием микротомографического исследования образцов руды показана прожилково-вкрапленная минерализация сульфидов и тонкая вкрапленность золота в сульфидные минералы.

2. Экспериментально подтверждено, что углеродистое вещество руд обладает повышенной сорбционной активностью по

отношению к растворенному золоту, и для серии ФК-1 составляет $0,83 \pm 0,03$ г/кг, для серии ФК-2 составляет $0,40 \pm 0,02$ г/кг.

3. На основании систематизации результатов, полученных после интерпретации данных термического анализа флотационных концентратов с разной степенью извлекаемости золота после выщелачивания, установлено, что с применением разработанной методики возможна селекция флотационных концентратов на продукты с высокой и низкой сорбционной активностью углеродистого вещества. Обоснованы направления термодеструкции наиболее сорбционно активной составляющей концентратов.

4. Уточнена классификация упорных золотосодержащих руд типа «Г» с определением дополнительных критериев упорности для подтипа $G_{\text{угл}}$ (углеродистые):

- $G_{\text{угл}(к+б)}$ – руды содержащие кероген и битум (наиболее сорбционно активную составляющую)
- $G_{\text{угл}(к)}$ – руды содержащие кероген.

5. Экспериментальные исследования доказывают, что использование СВЧ-обработки для термической деструкции наиболее сорбционно активной составляющей флотационных концентратов – битума, позволяет увеличить извлечение золота на стадии металлургического передела до 85,4 %. Показано, что с применением СВЧ-обработки также возможно укрупнение ультрадисперсных частиц благородных металлов.

6. Разработана принципиальная технологическая схема переработки упорных сульфидных золотосодержащих руд, включающая экспериментально обоснованные режимы флотации и СВЧ-обработки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ РАБОТАХ:

1. **Афанасова А.В.** Анализ термогравиметрических данных углеродсодержащих материалов для обоснования технологий переработки. /А.В. Александров, А.В. Афанасова, Д.И. Крижановская // Современные тенденции в обогащении природного и техногенного сырья различного минерального состава. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №12 (специальный выпуск 56). – 56с. – М.: Издательство «Горная книга». С. 35-43.

2. **Афанасова А.В.** Исследование прочностных свойств руды при проектировании циклов рудоподготовки / Н.В. Николаева, В.А. Таранов, А.В. Афанасова // Горный журнал, научно-технический журнал. – 2015. – № 12. – С. 9-13.

3. **Афанасова А.В.** Исследование процесса флотации алюмосиликатов при переработке техногенного сырья / А.В. Афанасова, А.А. Бобракова // Комбинированные процессы переработки минерального сырья: теория и практика. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – Специальный выпуск № 19. – 288с. – М.: Издательство «Горная книга». С. 44-49.

4. **Афанасова А.В.** Оценка упорности золотосодержащих руд на основе интерпретации данных термического анализа / Т.Н. Александрова, Г. Хайдэ, А.В. Афанасова // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. С. 30-37.

5. **Afanasova A.V.** Processing of carbonaceous ores containing ultra-dispersed metals with using high-frequency current / A.V. Afanasova, T.N. Aleksandrova, N.V. Nikolaeva // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management, 2018, Albena, Bulgaria. – Vol. 18. – P. 119-124.

6. **Afanasova A.V.** Investigation of the carbonaceous component of gold-bearing ores by means of thermal analysis / T.N. Aleksandrova, A.V. Afanasova, G. Heide, A. Knoblich // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects: Proceedings of the 11th Russian-German Raw Materials Conference, November 7–8, 2018, Potsdam, Germany. – P. 459-466.

7. **Afanasova A.V.** Fine-dispersed particles of noble metals in sulphide carbonaceous ores and its beneficiation prospects / T.N. Aleksandrova, A.V. Afanasova // IMPC 2018 - 29th International Mineral Processing Congress, September 15–21, 2018, Moscow, Russia. – P. 2368-2376.

8. Пат. 2648400 РФ. Способ извлечения ультрадисперсных частиц золота из упорных углеродистых руд. [Текст] / Александрова Т.Н., **Афанасова А.В.** - 2017109642; заявл. 22.03.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 9. – 9 с.