

О Т З Ы В

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента Гришина Игоря Анатольевича на диссертацию Абуровой Валерии Александровны на тему: «Разработка технологии переработки углеродистых благороднометалльных руд с использованием энергетического воздействия», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

1. Актуальность темы диссертации

Современное состояние минерально-сырьевой базы золотодобывающей промышленности характеризуется вовлечением в переработку все более сложных по вещественному составу руд, для которых характерны тонкодисперсная вкрапленность золота и серебра в сульфидные минералы-концентраты и наличие сорбционно-активного органического углеродистого вещества. Для данного типа сырья традиционные схемы рудоподготовки и обогащения зачастую не обеспечивают требуемых показателей извлечения благородных металлов и сопровождаются значительными потерями с хвостами, что обосновывает актуальность совершенствования технологии переработки углеродистых золотосодержащих руд.

Одним из направлений совершенствования технологий переработки труднообогатимого минерального сырья является применение высокоэнергетических методов воздействия, позволяющих целенаправленно изменять прочностные и технологические свойства сырья на стадиях рудоподготовки и обогащения. К числу таких перспективных методов относится сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное воздействие, обеспечивающее селективный диэлектрический нагрев углеродисто-сульфидных компонентов. Однако недостаточная изученность СВЧ обработки применительно к упорным благороднометалльным рудам, не позволяет достаточно эффективно применять этот метод с целью разупрочнения компонентов рудной массы и повышения извлечения благородных металлов. Направленность диссертации Абуровой В.А. на установление механизмов и степени влияния СВЧ энергии на углеродистые благороднометалльные руды и на разработку принципиальных схем их переработки с учетом полученных зависимостей определяет высокую научную и практическую актуальность выполненного исследования.

2. Научная новизна диссертации

К элементам научной новизны диссертационной работы относятся:

- установленные количественные зависимости влияния удельной энергии СВЧ воздействия на физико-механические характеристики углеродистых благороднометалльных руд, включая экспоненциальную модель снижения индекса чистой работы дробления Бонда с $R_2 > 0,99$;
- выявленные механизмы укрупнения тонкодисперсных частиц золота и серебра в углеродсодержащих материалах в результате избирательного диэлектрического нагрева

углеродисто-сульфидных компонентов в присутствии магнетита, обуславливающего образование активных центров локального нагрева в процессе СВЧ обработки, формирование дефектов Френкеля с последующим укрупнением частиц благородных металлов;

– разработанный интегральный критерий флотационного процесса $K=E_S \cdot (1-\varepsilon_{\text{Сорг}})$, учитывающий совокупное влияние извлечения серы, выхода и качества концентрата по содержанию органического углерода и применимый в качестве целевой функции при параметрической оптимизации реагентного режима сульфидной флотации для изучаемого типа руд.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность защищаемых научных положений обеспечена применением представительного объема экспериментальных исследований, использованием современного аналитического оборудования и поверенных средств измерений, а также корректной статистической обработкой полученных данных. Минералогические и технологические свойства исходных руд и продуктов обогащения изучены с применением методов сканирующей электронной микроскопии с системой энергодисперсионного микроанализа, рентгенофлуоресцентного и оптического микроскопического анализа; прочностные характеристики определены по стандартизированным методикам проведения теста падающего груза и индекса чистой работы дробления Бонда. Обработка экспериментальных данных выполнена методами многофакторного планирования эксперимента и регрессионного анализа. Имитационное моделирование схем рудоподготовки реализовано в специализированном программном пакете JKSImMet.

В целом доказываемые научные положения аргументированы, достоверны, подтверждены результатами собственных исследований и не противоречат известным закономерностям обогащения упорных благороднометалльных руд.

Основные положения и результаты исследований были представлены на 9 научно-практических мероприятиях, в том числе на 7 международных конференциях.

4. Научные результаты, их ценность

К наиболее значимым научным результатам, полученным соискателем лично, относятся:

- установлены количественные зависимости снижения индекса чистой работы дробления Бонда от удельной энергии СВЧ воздействия при предварительной обработке для углеродистых благороднометалльных руд, адекватно описываемые экспоненциальной моделью $CWI(E)=a \cdot e^{-b \cdot E}+c$ с коэффициентом детерминации $R_2>0,99$. Показано, что при оптимальном режиме обработки значение CWI снижается на 45–52 % в зависимости от класса крупности, достигается переход руды из категории умеренно мягкой в мягкую при изменении значений параметров $A \cdot b$ с 52,63 до 61,50 и t_a с 0,61 до 0,87.

- по результатам имитационного компьютерного моделирования получено существенное повышение энергоэффективности схемы рудоподготовки углеродистой благороднометалльной

руды с предварительной СВЧ обработкой. Моделированием спрогнозировано снижение энергозатрат на измельчение на 7,9%.

- предложен интегральный критерий оптимизации флотационного процесса $K=E_S \cdot (1-\varepsilon_{\text{Сорг}})$, который позволяет учитывать взаимосвязанное изменение эффективности извлечения серы в сульфидный концентрат и депрессию органического углерода. На основе расчета данного критерия по экспериментально полученным результатам оптимизированы технологические параметры флотационного обогащения, при которых достигается максимальное значение $K=0,738$ и повышение извлечения Au на 3,31 % при снижении содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в сульфидном концентрате до 0,77 %.

Также значимым научным результатом является установление механизма укрупнения низкоразмерных частиц золота и серебра в углеродсодержащих продуктах обогащения при СВЧ воздействии с добавлением частиц магнетита до 10% по массе, который выступает в качестве активных центров локального нагрева полученной шихты. Образование дефектов Френкеля способствует перемещению атомов благородных металлов из узла кристаллической решетки в междоузлия с последующим укрупнением тонкодисперсных частиц до размеров 20–40 мкм, что подтверждено данными сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа. Практическая ценность данного результата состоит в достаточно эффективном переводе весьма тонких частиц благородных металлов до крупности, доступной для их извлечения гравитационно-флотационными методами, что позволит повысить сквозное извлечение Au и Ag до 86%.

Результаты диссертационного исследования в полной мере освещены в 8 печатных работах, в том числе 3 статьи – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных представлений о закономерностях избирательного диэлектрического нагрева углеродисто-сульфидных компонентов в составе упорных благороднометалльных руд и расширении представлений о механизмах укрупнения весьма тонких частиц благородных металлов за счет СВЧ воздействия при добавлении частиц магнетита, служащего активными центрами локального нагрева. Разработанный интегральный критерий оптимизации флотационного процесса $K=E_S \cdot (1-\varepsilon_{\text{Сорг}})$, нормированный в диапазоне от нуля до единицы, позволяет количественно учитывать взаимное влияние депрессии углеродистой составляющей и флотируемости сульфидных минералов при параметрической оптимизации реагентного режима.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается:

– разработкой и положительной технико-экономической оценкой технологических схем переработки углеродистых благороднометалльных руд с содержаниями сорбционно-активного

органического углерода в исходном сырье более и менее 1%, индекс доходности которых составляет 2,72 и 8,75 соответственно, что подтверждает экономическую эффективность предлагаемых технологий;

– внедрением результатов исследований в деятельности ООО «Р-Центр» (акт от 25 апреля 2025 года) и АО «Полиметалл Инжиниринг» (акт от 27 марта 2025 года) при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуется использовать:

- на предприятиях, ведущих переработку упорных углеродистых благороднометаллических руд, при выборе режимов СВЧ обработки на стадии рудоподготовки;
- в проектных и научно-исследовательских организациях при разработке и оптимизации технологических схем переработки углеродистых благороднометаллических руд;
- в учебном процессе высших и средних специальных учебных заведений при подготовке специалистов в области обогащения полезных ископаемых и металлургии благородных металлов.

7. Замечания и вопросы по работе

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Для детализации научных положений можно было вставить в них конкретные показатели по повышению эффективности уменьшения крупности и извлечению ценных компонентов в продукты.

2. В работе не приведено обоснование выбора метода интенсификации процесса рудоподготовки – СВЧ обработки и его сравнение по энергоэффективности с альтернативными энергетическими методами разупрочнения минеральных комплексов.

3. В принципиальных схемах переработки углеродсодержащих благороднометаллических руд с СВЧ обработкой приведена операция добавления магнетита перед ней и его извлечения после нее. В работе не рассмотрено влияние крупности магнетита на процесс СВЧ обработки. Также возникает вопрос о накоплении циркулирующего магнетита в процессе приготовления шихты.

4. В работе не рассмотрено влияние ряда факторов на процесс СВЧ обработки – влажность исходного питания, его крупность и однородность.

5. Каков механизм влияния СВЧ обработки на процесс флотации, на повышение технологических показателей влияет только увеличение количества флотационного класса крупности и степени раскрытия сростков?

6. В исследовании недостаточно обоснована необходимость введения нового комплексного критерия оптимизации процесса флотации. Насколько применим данный критерий к другим типам углеродсодержащих благороднометаллических руд?

7. В работе приведена, несколько излишне расширенная, для научно-квалификационной работы, детальная оценка и технико-экономическое обоснование предлагаемых технологий обогащения с предварительной СВЧ обработкой исходного сырья.

8. В диссертации автор рассматривает две технологические схемы для руд типа 1 ($C_{\text{орг}} < 1\%$) и типа 2 ($C_{\text{орг}} > 1\%$) отдельно. Вместе с тем в реальных условиях на обогатительных фабриках, как правило, руда представляет собой шихту обоих типов с фиксированным соотношением. В диссертации не рассмотрен вопрос совместной переработки смешанного сырья с точки зрения получения реальных технологических показателей.

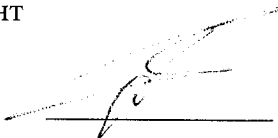
В целом, вопросы и замечания, возникшие при знакомстве с диссертационной работой Абуровой В.А., не снижают качества проведенных исследований и не затрагивают сути научных положений и основных выводов. Диссертационная работа представляет собой законченную, научно грамотную, обладающую научной новизной и практической значимостью работу.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Разработка технологии переработки углеродистых благороднометаллических руд с использованием энергетического воздействия», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. – Обогащение полезных ископаемых, полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм., а ее автор Абурова Валерия Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
кандидат технических наук, доцент

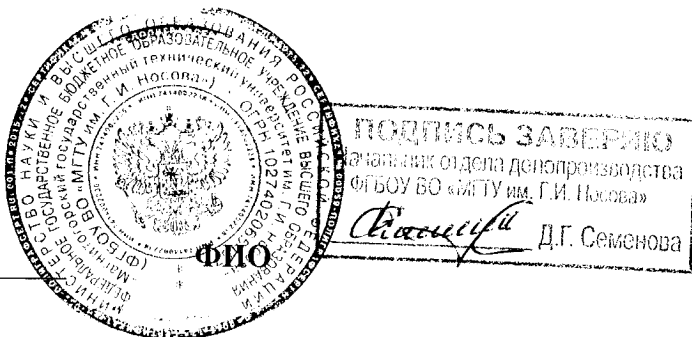


Гришин Игорь Анатольевич

Дата: «4» июня 2026 г.

Подпись Гришина Игоря Анатольевича заверяю:

Должность



Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Почтовый адрес: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д.38

Официальный сайт в сети Интернет: magtu.ru

эл. почта: i.grishin@magtu.ru

телефон: +7 (3519) 29-85-42, 29-85-40