

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора технических наук, доцента
Шумиловой Лидии Владимировны 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

На отзыв представлена рукопись диссертации объемом 166 страниц текста, содержит 93 рисунка и 82 таблицы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 149 наименований, и 3 приложений. Автореферат диссертации изложен на 19 страницах.

1. Актуальность темы диссертации

Россия лидирует по производству благородных металлов, однако за последние 20 лет доля труднообогатимых руд возросла с 15% до 40% (данные академика РАН Чантурия В.А.). Золото относится к основным видам стратегического минерального сырья (Распоряжение Правительства РФ от 30 августа 2022 г. № 2473-р «Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья»). Золото – классический защитный актив и также критически важно в высокотехнологичных отраслях: электроника (микросхемы, контакты), авиакосмическая промышленность, медицина (стоматология, диагностическое оборудование), некоторые виды катализаторов. Если страна развивает эти сферы, ей нужно стабильное внутреннее сырьё, чтобы не зависеть от импорта.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена следующими причинами: 1) востребованность добычи и переработки сложных руд с углеродистым веществом; 2) неэффективность переработки упорных руд с тонко вкрапленным золотом по традиционным технологиям и осаждение золота на углеродистом веществе как проявление эффекта прег-роббинга; 3) необходимость разработки и научного обоснования новых, технологически и экономически эффективных решений, обеспечивающих направленное изменение физико-механических и технологических свойств исходного сырья за счет интеграции энергетических воздействий, в традиционные схемы рудоподготовки и обогащения, обеспечивающих повышение полноты извлечения благородных металлов при одновременном снижении удельных энергозатрат на рудоподготовительный передел.

Одним из наиболее перспективных направлений интенсификации процессов переработки углеродистых благороднометалльных руд, позволяющим одновременно решать задачи разупрочнения минерального сырья, укрупнения низкоразмерных частиц благородных металлов и подавления сорбционной активности углеродистой составляющей

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-259 от 29.06.26
АУ УС

является обработка упорного сырья в сверхвысокочастотном (СВЧ) электромагнитном поле. Вместе с тем многофакторность совокупного воздействия энергетических и физико-химических факторов на углеродистое благороднометалльное сырье значительно затрудняет количественное прогнозирование эффективности проектируемых решений, что обуславливает необходимость разработки научно обоснованных методических подходов к описанию и оптимизации интегрированных схем рудоподготовки и обогащения.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна работы заключается в установлении комплекса зависимостей, характеризующих влияние СВЧ-воздействия на физико-механические характеристики углеродистых благороднометалльных руд, в обосновании механизмов укрупнения низкоразмерных частиц золота и серебра в углеродсодержащих материалах за счет диэлектрического нагрева углеродисто-сульфидных компонентов в присутствии магнетита, а также в разработке интегрального критерия оптимизации флотационного процесса $K=E_S \cdot (1-\epsilon_{\text{сорт}})$, учитывающего взаимосвязанное изменение извлечения сульфидной и сорбционно-активной углеродистой составляющих в сульфидный концентрат.

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

Обоснованность и достоверность защищаемых научных положений подтверждается достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований, их представительностью и сходимостью, оценкой полученных данных методами математической статистики; применением современного оборудования и средств измерений. Особенности вещественного состава углеродистых благороднометалльных руд и продуктов обогащения изучены методами сканирующей электронной микроскопии с системой энергодисперсионного микроанализа, рентгенофлуоресцентного анализа, оптической микроскопии; технологические характеристики руд определены по стандартизированным методикам теста падающего груза и определения индекса чистой работы дробления Бонда; обработка результатов экспериментальных исследований проводилась методами многофакторного планирования эксперимента и регрессионного анализа; имитационное моделирование процессов рудоподготовки выполнено в специализированном программном пакете JKSImMet.

Работа прошла широкую апробацию на 9 научно-практических мероприятиях, в том числе на 7 международных, 6 из которых за последние 3 года.

4. Научные результаты, их ценность

К числу наиболее значимых научных результатов, полученных лично соискателем, следует отнести следующие.

Установлена количественная закономерность влияния СВЧ-воздействия на прочностные характеристики углеродистых благороднометаллических руд: экспоненциальная зависимость индекса чистой работы дробления Бонда от удельной энергии СВЧ обработки с коэффициентом детерминации более 0,99. При удельной энергии СВЧ обработки $E=0,013$ кВт·ч значение индекса чистой работы дробления Бонда снижается на 45–52 %. За счет СВЧ воздействия достигается изменение значения параметров $A \cdot b$ с 52,63 до 61,50, t_a – с 0,61 до 0,87, что соответствует переходу руды из категории умеренно мягкой в категорию мягкой.

Получено количественное подтверждение энергоэффективности схемы рудоподготовки с СВЧ-воздействием: по результатам имитационного компьютерного моделирования в программном пакете JKSimMet установлено снижение потребляемой мощности мельницы полусамойзмелчения на 157,62 кВт и удельного расхода электроэнергии на 7,9 % с учетом затрат на обработку.

Обоснован механизм укрупнения низкоразмерных частиц золота и серебра в углеродсодержащих материалах при добавлении магнетита для создания активных центров локального нагрева при СВЧ-воздействии. Показано, что избирательный диэлектрический нагрев углеродисто-сульфидных компонентов и магнетита обуславливает образование дефектов Френкеля и последующее укрупнение низкоразмерных частиц благородных металлов до размеров, при которых возможно их извлечение с применением гравитационного и флотационного обогащения. Установлено, что для руд с содержанием органического вещества более 1 % СВЧ-обработка углеродистых продуктов обогащения мощностью 0,8–1,0 кВт продолжительностью 3–5 минут при добавлении 10 % магнетита обеспечивает укрупнение низкоразмерных частиц золота и серебра до размеров 20–40 мкм. При этом суммарное извлечение благородных металлов в рамках разработанной технологической схемы достигает порядка 86 %.

Обоснован оптимизированный реагентный режим сульфидной флотации углеродистой благороднометаллической руды с содержанием $C_{орг}$ менее 1 % с применением разработанного интегрального критерия флотационного процесса $K=E_S \cdot (1-\varepsilon_{Cорг})$, учитывающего совокупное влияние депрессии углеродистой составляющей и флотируемости сульфидных минералов. Методами многофакторного планирования и регрессионного анализа определены параметры режима, обеспечивающие максимальное значение критерия $K=0,738$, при котором достигается прирост извлечения золота на 3,31 % и снижение содержания органического углерода в концентрате до 0,77 %.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора 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 работы заключается в развитии научных представлений о закономерностях избирательного диэлектрического нагрева углеродисто-сульфидных компонентов в составе упорных благороднометалльных руд и обоснованном расширении представлений о механизмах укрупнения низкоразмерных частиц благородных металлов за счет СВЧ-воздействия при добавлении магнетита для создания активных центров локального нагрева.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается:

- разработкой и обоснованием двух принципиальных технологических схем переработки углеродистых благороднометалльных руд, дифференцированных по содержанию органического углерода в исходном сырье, индекс доходности которых составляет 2,72 и 8,75 соответственно, что подтверждает экономическую эффективность обеих технологий;
- получением патента на изобретение № 2799219 РФ «Способ извлечения низкоразмерных структур благородных металлов из углеродистого сырья» от 04.07.2023;
- результаты исследований использованы в деятельности ООО «Р-Центр» (акт от 25 апреля 2025 года) и АО «Полиметалл Инжиниринг» (акт об использовании результатов диссертационных исследований от 27 марта 2025 года) при проведении научно-исследовательских работ.

Закрепление исключительных прав посредством патента на изобретение свидетельствует о значительном личном вкладе соискателя в развитие данной области. Достижение представляет собой результат фундаментальных исследований и детальной аналитической работы, направленной на решение актуальной научной и практической задачи. Автор не только разработал инновационное технологическое решение, но и довёл решение до стадии, когда его можно юридически защитить и применять на практике.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Основные научные и практические результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в следующих направлениях:

- в проектных и научно-исследовательских организациях горно-обогатительного профиля при разработке предпроектных и проектных решений по интеграции СВЧ-воздействия на стадии рудоподготовки в существующие технологические схемы золотоизвлекательных фабрик, перерабатывающих углеродистые благороднометалльные

руды;

– в научно-исследовательской и образовательной деятельности высших учебных заведений при подготовке специалистов, аспирантов.

7. Замечания и вопросы по работе

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В работе (главы 3 и 4) представлены данные сканирующей электронной микроскопии, наглядно демонстрирующие изменение размера укрупненных частиц благородных металлов после СВЧ обработки с добавлением магнетита. Однако в работе недостаточно полно отражены прямые экспериментальные данные о температурном поле в зоне СВЧ воздействия. Какими методами проводился контроль температуры в локальных областях контакта магнетита с минеральной матрицей и каковы предельные температуры, достигаемые в зоне локального нагрева?

2. Введение добавки магнетита в количестве 10 % в углеродистый флотационный концентрат является ключевым условием достижения эффекта укрупнения низкоразмерных частиц Au и Ag. Как в технологической схеме организован процесс отделения магнетита и его последующего использования? Какие риски – с точки зрения потерь полезного компонента или загрязнения конечного концентрата – несёт каждый из этапов этого процесса, и какие меры применяются для их минимизации?

3. В диссертационной работе предложены две технологические схемы, разграниченные пороговым содержанием органического углерода (Corg): более 1% и менее 1%. Обоснуйте выбор именно этого значения. Укажите, какие экспериментальные данные, физико-химические закономерности или нормативные требования легли в основу установления данного критерия?

4. Диссертационная работа выполнена на основе исследования двух типов углеродистых руд, содержащих благородные металлы. С учётом существенной variability природы сорбционно-активного углеродистого вещества расширение спектра исследуемых объектов могло бы повысить универсальность предлагаемых технологических решений.

5. В диссертации на основе данных лабораторных экспериментов обоснован режим СВЧ-обработки. Однако при переходе к промышленным объёмам обеспечение равномерности нагрева существенно усложняется из-за изменения условий процесса. Было бы полезно представить более детально обоснование масштабируемости полученных параметров с указанием граничных условий их применимости, а также факторов, потенциально ограничивающих масштабирование.

В целом, несмотря на отдельные замечания и вопросы, высказанные в ходе ознакомления с диссертацией Абуровой В.А., качество проведенных исследований остаётся на высоком уровне, а основные научные положения и выводы не вызывают сомнений. Диссертационная работа отличается целостностью структуры и логичностью изложения материала.

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,

профессор кафедры обогащения полезных
ископаемых и химических технологий в горном деле
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Забайкальский государственный университет»,
доктор технических наук, доцент

Шумилова Лидия Владимировна
20.06.2026 г.

Согласна на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшей обработкой.

Шумилова Лидия Владимировна

Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет»

Почтовый адрес: 672039, Забайкальский край, г. Чита, ул. Александрово-Заводская, д. 30

Официальный сайт в сети Интернет: <https://www.zabgu.ru/php/index.php>

E-mail: shumilovalv@mail.ru; телефон: +7 (3022) 41-64-44

