

На правах рукописи

Абурова Валерия Александровна



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
УГЛЕРОДИСТЫХ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Александрова Татьяна Николаевна

Официальные оппоненты:

Шумилова Лидия Владимировна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет», кафедра обогащения полезных ископаемых и химических технологий в горном деле, профессор;

Гришин Игорь Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск.

Защита диссертации состоится **15 июля 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.5 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

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

Автореферат разослан 15 мая 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

НИКОЛАЕВА
Надежда Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Высокие темпы добычи и переработки благороднометалльного сырья обуславливают истощение запасов богатых легкообогатимых руд и вовлечение в переработку упорных руд. Незначительные изменения качества минерального сырья, поступающего на переработку, могут существенно снизить эффективность извлечения благородных металлов и привести не только к непостоянству технологических показателей, но и в ряде случаев к их нерентабельному извлечению. Сложность минерального состава и упорность руд обуславливают актуальность разработки эффективных технологических решений в связи с низкими показателями извлечения при их обогащении с применением традиционных методов.

Вовлечение в переработку руд, относящихся к категории упорных, подразумевает проведение предварительной обработки, направленной на снижение упорности. При наличии сорбционно-активного по отношению к растворенному золоту и серебру углеродистого органического вещества предварительная обработка может способствовать его пассивации перед выщелачиванием. Альтернативным подходом является депрессия углеродистой составляющей на стадии флотационного обогащения. Вместе с тем на ряде обогатительных фабрик углеродистые продукты отправляются на хвостохранилище и не перерабатываются, что приводит к потерям благородных металлов с хвостами обогащения.

Перспективным направлением интенсификации процессов обогащения упорных руд является применение энергетических методов воздействия, в частности обработки в сверхвысокочастотном (СВЧ) электромагнитном поле.

Таким образом, разработка научно обоснованных технологических решений переработки углеродистых благороднометалльных руд, включающая комплекс методов обогащения и энергетического воздействия, представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решение которой позволит повысить полноту использования минерально-сырьевой базы и экономическую эффективность обогатительных фабрик.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами переработки углеродистых благороднометалльных руд занимались такие отечественные и зарубежные ученые, как Плаксин И.Н., Чантурия В.А., Александрова Т.Н., Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Лодейщиков В.В., Меретуков М.А., Седельникова Г.В., Секисов А.Г., Шумилова Л.В., Afenya P.M., Gaudin A.M., O'Connor C., Simmons G.L. и др.

Несмотря на значительные достижения в области разработки технологий переработки углеродистых благороднометалльных руд, промышленное освоение месторождений данного типа по-прежнему сопряжено с существенными потерями целевых металлов на стадиях обогащения и металлургического передела, а также с высокими удельными энергозатратами на рудоподготовку.

Вопросам применения энергетического воздействия на минеральное сырье посвящены работы многих отечественных ученых, таких как Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Гришин И.А. и др., а также зарубежных исследователей Batchelor A.R., Farahat M., Haque K.E., Jones D.A., Kingman S.W., McGill S.L., Walkiewicz J.W., Waters K.E. и др. По причине сложности состава и упорности углеродистых благороднометалльных руд особую значимость приобретают исследования влияния энергетического (СВЧ) воздействия на минеральное сырье данного типа. Совершенствование существующих и создание новых технологических решений переработки углеродистых благороднометалльных руд на основе данных о влиянии энергетического воздействия на минеральное сырье является одним из актуальных направлений развития современного обогатительного производства.

Объект исследования – технологически значимые углеродистые благороднометалльные руды и модельные углеродсодержащие материалы, подвергаемые энергетическому воздействию и гравитационно-флотационному обогащению в составе принципиальных схем их переработки.

Предмет исследования – закономерности изменения физико-механических и технологических свойств углеродистых

благороднометалльных руд под действием энергетического воздействия и их влияние на эффективность обогащения.

Цель работы – установить закономерности воздействия энергетических факторов на процессы трансформации углеродистых благороднометалльных руд и развить научные основы построения принципиальных технологических схем их переработки.

Идея заключается в том, что целенаправленное изменение поведения углеродистых благороднометалльных руд под воздействием СВЧ энергии и гравитационно-флотационного обогащения позволяет повысить эффективность извлечения благородных металлов.

Задачи исследования

Поставленная цель достигалась путем решения следующих взаимосвязанных задач:

1. Проанализировать современное состояние и перспективы развития технологий переработки углеродистых благороднометалльных руд, а также определить возможности применения энергетического воздействия на различных стадиях трансформации сырья.

2. Разработать методический алгоритм и программу исследований по установлению закономерностей влияния СВЧ энергетического воздействия на упорные руды и продукты их переработки.

3. Установить закономерности влияния энергетического воздействия на физико-механические и технологические характеристики углеродистых благороднометалльных руд с последующей экспериментальной и модельной верификацией полученных данных.

4. Выполнить комплекс экспериментально-теоретических исследований по определению влияния энергетического воздействия на степень раскрытия полезных минералов и эффективность извлечения благородных металлов из руд и промежуточных продуктов обогащения.

5. Разработать и обосновать принципиальные технологические схемы переработки углеродистых благороднометалльных руд с использованием энергетического

воздействия, провести их технико-экономическую оценку и определить показатели эффективности (извлечение, индекс доходности, энергозатраты).

Научная новизна

1. Установлен комплекс зависимостей, характеризующих влияние СВЧ воздействия на физико-механические характеристики благороднометаллических руд.

2. Установлены механизмы укрупнения низкоразмерного золота и серебра в углеродсодержащих материалах за счет селективного нагрева в процессе энергетического воздействия при добавлении магнетита для создания активных центров локального нагрева, обуславливающего образование дефектов Френкеля и последующую агрегацию наночастиц.

3. Разработан новый интегральный критерий оптимизации флотационного процесса $K = E_S \cdot (1 - \epsilon_{\text{Сорг}})$, учитывающий взаимосвязанное изменение извлечения углеродистого вещества и серы в сульфидный концентрат.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых (технические науки) по пунктам: п. 2 «Направленное изменение физических свойств минеральных компонентов», п. 3 «Физико-химические и энергетические методы интенсификации процессов обогащения и выщелачивания природного и техногенного сырья. Физические, физико-химические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов, руд, промежуточных продуктов переработки природного и техногенного минерального сырья».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлены закономерности избирательного диэлектрического нагрева углеродисто-сульфидных компонентов благороднометаллических руд под действием СВЧ энергии, раскрывающие физические механизмы разупрочнения рудной массы и изменения технологических свойств минерального сырья.

2. Разработан и теоретически обоснован интегральный критерий оптимизации флотационного процесса K , позволяющий

учитывать взаимосвязанное изменение извлечения углеродистого вещества и серы в сульфидный концентрат при варьировании параметров флотации.

3. Разработан способ извлечения низкоразмерных структур благородных металлов из углеродистого сырья (патент на изобретение № 2799219).

4. Результаты диссертационной работы внедрены в методики проведения научно-исследовательских работ компании ООО «Р-Центр» при проведении оценки влияния энергетического воздействия на минеральное сырье и продукты его обогащения (акт внедрения от 25.04.2025).

5. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в деятельности АО «Полиметалл Инжиниринг» при разработке рекомендаций по оценке влияния энергетического воздействия на прочностные параметры минерального сырья при выборе схем рудоподготовки (акт об использовании результатов диссертационных исследований от 27.03.2025).

6. Разработаны принципиальные технологические схемы переработки углеродистых благороднометалльных руд ($C_{орг} > 1\%$ и $C_{орг} < 1\%$), экономическая эффективность которых подтверждена положительными индексами доходности.

Методология и методы исследований

В ходе выполнения работы применялся комплексный метод исследования, включающий анализ и обобщение отечественной и зарубежной научно-технической и патентной информации в области переработки углеродистых благороднометалльных руд; проведение экспериментальных исследований на углеродсодержащих материалах с применением рентгенофлуоресцентного анализа, оптической и электронной микроскопии с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа, тестов падающего груза и определения индекса чистой работы дробления Бонда, флотационного, гравитационного и магнитного обогащения; а также использование методов планирования эксперимента, математической статистики и регрессионного анализа и имитационного компьютерного моделирования схем рудоподготовки в программном пакете JKSimMet.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ предварительной СВЧ обработки углеродистых благороднометаллических руд перед полусамоизмельчением обеспечивает разупрочнение рудной массы, что приводит к интенсификации процессов рудоподготовки, увеличению выхода флотационного класса, повышению извлечения целевых компонентов и снижению энергозатрат на измельчение, что подтверждено результатами экспериментов и имитационного моделирования.

2. Избирательный диэлектрический нагрев углеродисто-сульфидных компонентов благороднометаллических руд ($C_{орг} > 1\%$) под действием СВЧ энергии приводит к укрупнению тонкодисперсных частиц золота и серебра, что положено в основу разработки энергоэффективной технологии переработки углеродистых золотосодержащих руд и повышения комплексного извлечения ценных компонентов.

3. Обоснованные и разработанные принципиальные технологические основы переработки упорных благороднометаллических руд с содержанием сорбционно-активного углерода менее 1% подразумевают интеграцию стадии СВЧ обработки для интенсификации рудоподготовки и последующую депрессию углеродсодержащих компонентов при оптимизированном реагентном режиме сульфидной флотации.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена проведением достаточного объема экспериментальных исследований на сертифицированном и поверенном оборудовании; воспроизводимостью результатов при многократном повторении экспериментов; статистической оценкой полученных данных методами математического анализа; апробацией полученных результатов на международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов диссертации проведена на 9 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 7 международных; за последние 3 года принято участие в 8 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 6 международных: XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования»

(г. Санкт-Петербург, май 2023 г.); Международная конференция «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения - 2023)» (г. Москва, октябрь 2023 г.); 16-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, октябрь 2023 г.); Международная конференция «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов (Плаксинские чтения - 2024)» (г. Апатиты, сентябрь 2024 г.); Международная конференция «Инновационные процессы комплексной переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2025)» (г. Екатеринбург, сентябрь–октябрь 2025 г.); 17-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, октябрь 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе научной литературы в области переработки упорных руд и энергетического воздействия на минеральное сырье; выполнении экспериментальных исследований по СВЧ обработке, флотационному обогащению и определению прочностных параметров исследуемого сырья; разработке комплексного подхода к обоснованию технологических схем рудоподготовки; статистической обработке и интерпретации результатов; разработке и технико-экономическом обосновании принципиальных технологических схем.

Публикации

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 диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 149 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 166 страницах текста, содержит 93 рисунка и 82 таблицы.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю и педагогическому наставнику, д.т.н., профессору Александровой Татьяне Николаевне, а также коллективу и аспирантам кафедры обогащения полезных ископаемых за оказанную поддержку и помощь при проведении и подготовке диссертационного исследования к защите.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ отечественных и зарубежных источников, систематизированы данные о современном состоянии и перспективах развития переработки углеродистых благороднометалльных руд, рассмотрены возможности применения энергетического воздействия на минеральное сырье на различных стадиях обогащения для обоснования технологических решений, направленных на повышение извлечения благородных металлов из упорных руд.

Во второй главе обоснован выбор в качестве объекта исследования технологически значимых углеродсодержащих материалов. Предложен комплексный подход для обоснования эффективной технологической схемы рудоподготовки упорных руд. Разработан алгоритм и представлен комплекс методов по исследованию влияния СВЧ воздействия на упорные руды и продукты их обогащения.

В третьей главе проведены исследования влияния энергетического воздействия на прочностные параметры благороднометалльных руд. На основе предложенного комплексного

подхода подтверждена возможность применения СВЧ обработки для изменения прочностных параметров упорных руд. Верифицирована эффективность воздействия моделированием и натурными экспериментами.

В четвертой главе представлены результаты экспериментально-теоретических исследований влияния энергетического воздействия на повышение извлечения благородных металлов из упорных руд и продуктов их обогащения. Созданы основы двух технологий переработки углеродистых благороднометаллических руд с содержаниями $C_{орг} > 1\%$ и $C_{орг} < 1\%$.

В пятой главе разработаны две принципиальные технологические схемы переработки углеродистых благороднометаллических руд ($C_{орг} > 1\%$ и $C_{орг} < 1\%$) с применением СВЧ обработки. Проведена технико-экономическая оценка предлагаемых схем.

В заключении отражены обобщенные выводы по результатам работы, а также перспективные направления дальнейших исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Способ предварительной СВЧ обработки углеродистых благороднометаллических руд перед полусамозмельчением обеспечивает разупрочнение рудной массы, что приводит к интенсификации процессов рудоподготовки, увеличению выхода флотационного класса, повышению извлечения целевых компонентов и снижению энергозатрат на измельчение, что подтверждено результатами экспериментов и имитационного моделирования.

На основании результатов экспериментальных исследований по оценке влияния значений энергии СВЧ обработки $E = P \cdot t$ (кВт·ч) на индекс чистой работы дробления Бонда (CWI) установлено, что полученные зависимости адекватно описываются экспоненциальной моделью (1) с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,99$:

$$CWI(E) = a \cdot e^{-b \cdot E + c} \quad (1)$$

где E – энергия СВЧ воздействия, кВт·ч; a – амплитуда снижения значения CWI ; b – скорость снижения; c – асимптота (минимально достижимое значение CWI).

Графическая интерпретация полученных зависимостей представлена на рисунках 1 и 2. Экспериментально подтвержден эффект насыщения: при $E > 0,013$ кВт·ч относительное снижение значения CWI уменьшается с 7-9 % до 3 %, что свидетельствует о достижении предельного достижимого эффекта обработки. Обоснован режим СВЧ обработки $E = 0,013$ кВт·ч (мощность $P = 400$ Вт и время $t = 2$ мин), обеспечивающий снижение значения CWI на 45-52 % в зависимости от класса крупности.

По результатам теста падающего груза при обоснованном режиме СВЧ воздействия достигнуто изменение значений параметров высокоэнергетического $A \cdot b$ с 52,63 до 61,50 и низкоэнергетического разрушения t_a с 0,61 до 0,87 при переходе углеродистой благороднометалльной руды из категории умеренно мягкой в мягкую в сравнении с материалом до обработки. Получены зависимости для углеродистой благороднометалльной руды до и после СВЧ обработки, представленные на рисунке 3.

Разупрочнение рудной массы за счет разницы в диэлектрическом нагреве сульфидных и углеродистых включений с минералами породы подтверждается снижением значения CWI на 45-52 %, изменением крепости руды по параметру $A \cdot b$, а также экспериментально доказанным образованием макротрещин (рисунок 1).

Исследование кинетики шарового измельчения показало, что за счет СВЧ обработки достигается рост выхода флотационного класса крупности -71 мкм на 5,4 %. Графическая зависимость выхода флотационного класса от времени измельчения руды до и после СВЧ обработки представлена на рисунке 4. На основе анализа полученных результатов установлено снижение времени измельчения для достижения готового класса -71 мкм на 18-19 % за счет энергетического воздействия.

Результаты флотационного обогащения позволили подтвердить, что за счет применения СВЧ обработки на стадии рудоподготовки достигается повышение извлечения целевых

компонентов Fe на 2,2–2,6 %, As на 2,1–3,2 %, S на 2,7–3,2 % в сульфидный флотационный концентрат.

Результаты имитационного моделирования схем рудоподготовки без и после предварительной СВЧ обработки перед полусамоизмельчением (рисунки 5 и 6) позволили подтвердить снижение мощности, затрачиваемой мельницей полусамоизмельчения на 157,62 кВт, уменьшение удельного расхода электроэнергии на измельчение на 7,9 % (с учетом затрат на СВЧ обработку).

2. Избирательный диэлектрический нагрев углеродисто-сульфидных компонентов благороднометалльных руд ($C_{орг} > 1\%$) под действием СВЧ энергии приводит к укрупнению тонкодисперсных частиц золота и серебра, что положено в основу разработки энергоэффективной технологии переработки углеродистых золотосодержащих руд и повышения комплексного извлечения ценных компонентов.

На основании экспериментальных исследований СВЧ обработки модельных углеродсодержащих материалов установлено образование активных центров локального нагрева в местах добавления магнетита (рисунок 7). С применением сканирующей электронной микроскопии подтверждено укрупнение тонкодисперсных частиц благородных металлов и обосновано необходимое содержание магнетита 10 % для достижения максимального укрупнения частиц Au до 20-50 мкм и Ag до 20-40 мкм (таблица 1).

По результатам углеродистой флотации благороднометаллической руды ($C_{орг} > 1\%$) содержание Au и Ag в углеродистом концентрате составило 2,91 и 0,12 г/т соответственно (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты углеродистой флотации благороднометаллической руды

Продукт	$\gamma, \%$	$\beta, \% (*\text{г/т})$					
		Au*	Ag*	$C_{орг}$	Fe	As	S
Углеродистый концентрат	2,42	2,91	0,12	25,10	1,04	0,33	0,95
Хвосты	97,58	5,99	0,31	1,04	2,92	0,55	1,70
Исходная руда	100,00	5,92	0,31	1,62	2,88	0,54	1,68

Продолжение таблицы 2

Продукт	γ, %	ε, %					
		Au	Ag	C _{орг}	Fe	As	S
Углеродистый концентрат	2,42	1,19	0,94	37,50	0,87	1,48	1,37
Хвосты	97,58	98,81	99,06	62,50	99,13	98,52	98,63
Исходная руда	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Экспериментально подтверждено, что при СВЧ обработке углеродистого флотационного концентрата с добавлением 10 % магнетита при мощности 0,8-1,0 кВт и времени 3-5 мин происходит укрупнение тонкодисперсных благородных металлов до сферических агрегатов размером 20-40 мкм (рисунок 8). Результаты анализа элементного состава для спектров, показанных на рисунке 8, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты исследования элементного состава для спектров, представленных на рисунке 8

Номер спектра	Содержание, вес. %									
	O	Al	Si	Fe	Au	Cu	Na	S	Ag	Ca
Спектр 1	–	–	–	0,96	3,84	–	–	–	95,20	–
Спектр 2	26,59	–	–	20,46	12,83	–	1,12	0,50	37,02	1,48
Спектр 4	17,95	0,27	–	3,71	75,40	1,50	–	–	1,17	–
Спектр 5	40,08	2,34	9,86	6,17	30,60	10,95	–	–	–	–

Укрупнение обусловлено образованием дефекта Френкеля: при нагреве атомы благородных металлов перемещаются из узлов кристаллической решетки в междоузлия, что вследствие стремления термодинамической системы к равновесию приводит к объединению наночастиц в агрегаты, которые возможно извлечь с применением традиционных методов.

Создана основа разработки энергоэффективной технологии переработки углеродистой благороднометаллической руды с содержанием $C_{орг} > 1\%$ (рисунок 9) для извлечения укрупненных благороднометаллических частиц из углеродистых продуктов после СВЧ обработки, которая обеспечивает повышение суммарного извлечения Au и Ag до 86%. Экономическая эффективность подтверждена индексом доходности 2,72.

3. Обоснованные и разработанные принципиальные технологические основы переработки упорных благороднометаллических руд с содержанием сорбционно-активного углерода менее 1% подразумевают интеграцию стадии СВЧ обработки для интенсификации рудоподготовки и последующую депрессию углеродсодержащих компонентов при оптимизированном реагентном режиме сульфидной флотации.

Введен интегральный критерий оптимизации флотационного процесса и нахождения параметров K , который учитывает взаимосвязанное изменение извлечения углеродистого вещества и серы в сульфидный концентрат (2):

$$K = E_S \cdot (1 - \varepsilon_{C_{орг}}) \quad (2)$$

где $E_S = \frac{\varepsilon_S - \beta_S}{100 - \gamma}$ – эффективность обогащения по S, доли ед.; ε_S – извлечение S в сульфидный концентрат, %; β_S – содержание S в сульфидном концентрате, %; γ – выход сульфидного концентрата, %; $\varepsilon_{C_{орг}}$ – извлечение $C_{орг}$ в сульфидный концентрат, доли ед.

Критерий оптимизации K является безразмерным и изменяется в диапазоне от 0 до 1: предельное значение $K=1$ достигается при $E_S=1$, $\varepsilon_{C_{орг}}=0$, $K=0$ при $E_S=0$, $\varepsilon_{C_{орг}}=1$.

На основе расчетов интегрального критерия K и статистической обработки результатов получена адекватная математическая модель (3):

$$K = -0,9333 - 1,124 \cdot 10^{-3} \cdot Y_1 + 5,20 \cdot 10^{-7} \cdot Y_1^2 + 4,17 \cdot 10^{-2} \cdot Y_2 - 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot Y_2^2 + 4,42 \cdot 10^{-4} \cdot Y_3 - 3,9 \cdot 10^{-7} \cdot Y_3^2 + 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot Y_1 \cdot Y_2 - 6,39 \cdot 10^{-9} \cdot Y_1^2 \cdot Y_2 - 2,53 \cdot 10^{-10} \cdot Y_1^2 \cdot Y_3 + 4,56 \cdot 10^{-7} \cdot Y_1 \cdot Y_3 - 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot Y_2 \cdot Y_3 \quad (3)$$

где K – комплексный критерий для оптимизации параметров сульфидной флотации; Y_1 – расход Na_2CO_3 , г/т (диапазон: 300-1500 г/т); Y_2 – крупность питания, % готового класса -71 мкм

(диапазон: 70-90 %); Y_3 – расход депрессора, г/т (диапазон: 100-1000 г/т).

Обоснованы параметры флотационного процесса: расход Na_2CO_3 900 г/т; крупность питания 85 % флотационного класса - 71 мкм; расход депрессора 600 г/т, находящиеся в зоне установленного оптимума, при которых достигается максимальное значение интегрального критерия $K=0,738$.

На основе полученных результатов разработана принципиальная технологическая схема переработки углеродистой благороднометаллической руды с содержанием сорбционно-активного углерода менее 1 % (рисунок 10). Интеграция СВЧ обработки в рудоподготовительный передел с последующим флотационным обогащением позволила повысить извлечение Au на 3,31 % при одновременном снижении содержания сорбционно-активного углерода в конечном концентрате до 0,77 %. Экономическая эффективность подтверждена индексом доходности 8,75.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены новые научно-технологические решения по переработке углеродистых благороднометаллических руд с применением СВЧ воздействия перед полусамомельчением и на стадии дообогащения, обеспечивающие снижение энергозатрат на измельчение, укрупнение низкоразмерных частиц золота и серебра и повышение их извлечения в концентраты, что имеет существенное значение для комплексной переработки руд благородных металлов и повышения экономической эффективности обогатительных фабрик. В ходе исследования были достигнуты следующие основные научно-технические результаты:

1. Систематизированы данные о технологиях переработки углеродистых благороднометаллических руд. Установлено, что СВЧ воздействие является перспективным методом интенсификации процессов рудоподготовки и обогащения, недостаточно изученным применительно к углеродсодержащему сырью.

2. Разработан и обоснован методический алгоритм исследований, включающий оценку влияния СВЧ воздействия на физико-механические и технологические характеристики и обогатимость углеродистых благороднометаллических руд, а также

установление механизма укрупнения низкоразмерных благородных металлов и возможности их извлечения.

3. Установлено, что СВЧ воздействие на углеродистые благороднометалльные руды приводит к снижению рабочего индекса чистой работы дробления Бонда на 45-52 %, что обеспечивает разупрочнение рудной массы и снижение энергозатрат на рудоподготовительный передел. Показано, что интеграция СВЧ обработки в рудоподготовительный передел способствует повышению извлечения золота на 3,31 % при одновременном снижении содержания сорбционно-активного углерода в конечном концентрате до 0,77 %.

4. Установлено, что при добавлении магнетита в углеродсодержащие продукты и их последующей СВЧ обработке обеспечивается укрупнение тонкодисперсных частиц золота и серебра до 20-40 мкм, что позволяет достичь повышения суммарного извлечения Au и Ag до 86 % в комбинированных гравитационно-флотационных схемах.

5. Показано, что разработанные технологические схемы переработки углеродистых благороднометалльных руд с применением СВЧ обработки обеспечивают снижение извлечения сорбционно-активного углерода в сульфидный флотационный концентрат при одновременном повышении извлечения серы, что отражается ростом интегрального критерия эффективности схем. Установлено, что реализация предложенных схем переработки углеродистых благороднометалльных руд обеспечивает достижение индекса доходности до 8,75 для руд с содержанием сорбционно-активного углерода менее 1 % и порядка 2,72 для руд с содержанием углерода более 1 %, что подтверждает их высокую технико-экономическую эффективность.

Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие разработанных технологических решений применительно к углеродсодержащим благороднометалльным рудам месторождений других типов с учетом различий минерального состава и природы сорбционно-активного углеродистого вещества.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Александрова, Т.Н. Выбор параметров флотации сульфидных медно-никелевых руд на основе анализа распределения компонентов по флотирруемости / Т.Н. Александрова, А.В. Афанасова, В.В. Кузнецов, **В.А. Абурова** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 1. – С. 131–147. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_131.

2. Афанасова, А.В. Укрупнение низкоразмерных благородных металлов из углеродистых материалов с применением микроволновой обработки / А.В. Афанасова, **В.А. Абурова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 20–35. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_20.

3. Александрова, Т.Н. Влияние энергетического воздействия на прочностные характеристики золотосодержащей руды / Т.Н. Александрова, **В.А. Абурова**, Н.В. Николаева, Г.В. Струк // Обогащение руд. – 2025. – №3. – С. 3-8. – DOI: 10.17580/or.2025.03.01.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Aleksandrova, T. Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation / T. Aleksandrova, N. Nikolaeva, A. Afanasova, A. Romashev, **V. Aburova**, E. Prokhorova // Minerals. – 2023. – Vol. 13, Issue. 1. – p. 84. DOI: 10.3390/min13010084.

5. Александрова, Т.Н. «Невидимые» благородные металлы в углеродистых породах и продуктах обогащения: возможность выявления и укрупнения / Т.Н. Александрова, А.В. Афанасова, **В.А. Абурова** // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9, № 3. – С. 231-242. – DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-229.

Публикации в прочих изданиях:

6. Александрова Т.Н. Применение энергетических методов воздействия при переработке руд / Т.Н. Александрова, **В.А. Абурова** // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки

природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2023) : Материалы Международной конференции, Москва, 02-05 октября 2023 года. – М.: Издательство «Спутник +», 2023. – С. 129-131.

7. **Абурова В.А.** Исследование возможности применения СВЧ воздействия при переработке углеродсодержащего сырья / **В.А. Абурова**, В.А. Люблянова // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов (Плаксинские чтения — 2024) : Материалы международной конференции, Апатиты, 23–27 сентября 2024 года. — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2024. — С. 181-183.

8. Александрова Т.Н. Оценка влияния энергетического воздействия на прочностные параметры золотосодержащей руды / Т.Н. Александрова, **В.А. Абурова** // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2025) : Материалы международной конференции, Екатеринбург, 29 сентября – 4 октября 2025 года. – Екатеринбург: Изд-во «Форт-Диалог Исеть», 2025. – С. 115-116.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

9. Патент № 2799219 Российская Федерация, МПК В03В 7/00 (2006/01), В03D 1/02 (2006/01). Способ извлечения низкоразмерных структур благородных металлов из углеродистого сырья. Заявка № 2022132285 : заявл. 19.12.2022: опубл. 04.07.2023 / Т.Н. Александрова, А.В. Афанасова, **В.А. Абурова**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". – 11 с. : ил.

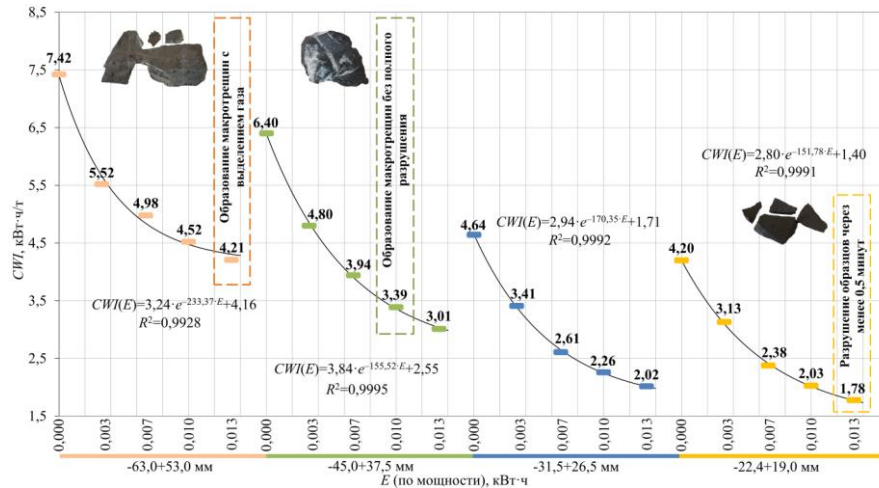


Рисунок 1 – Графическая зависимость значений CWI от энергии СВЧ обработки (E) при варьировании мощности

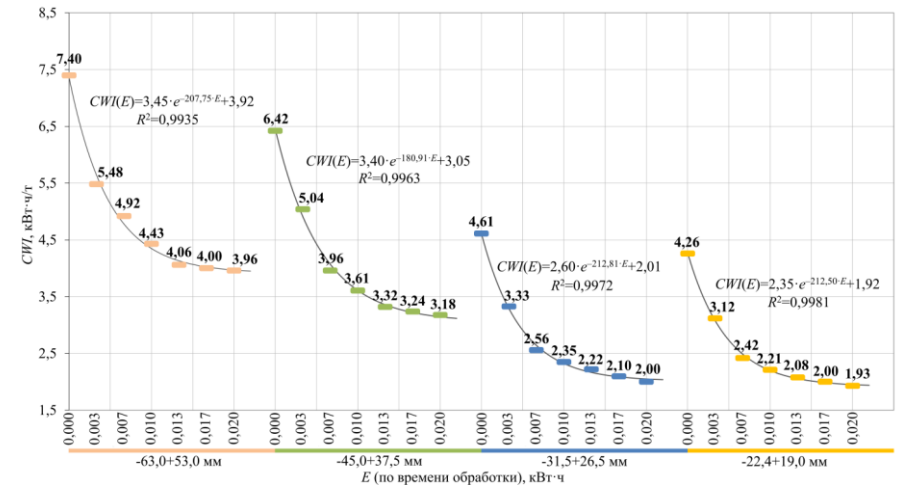


Рисунок 2 – Графическая зависимость значений CWI от энергии СВЧ обработки (E) при варьировании времени

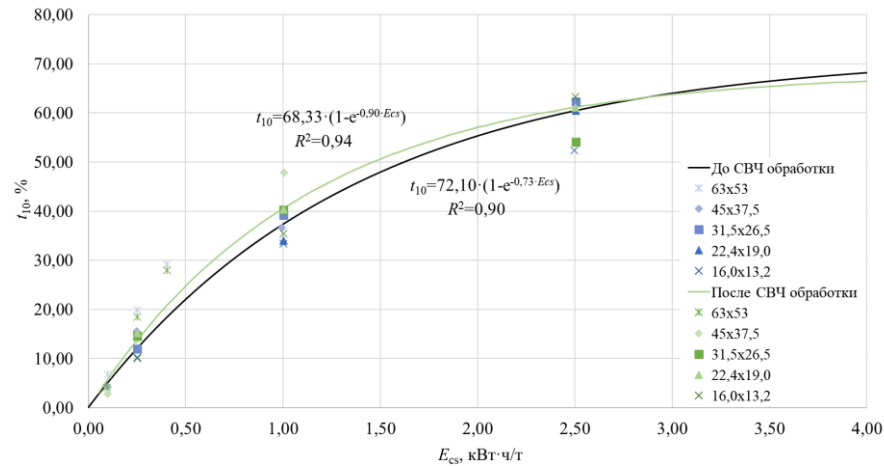


Рисунок 3 – Графическая зависимость параметров t_{10} от E_{cs} для углеродистой благороднометалльной руды до и после СВЧ обработки

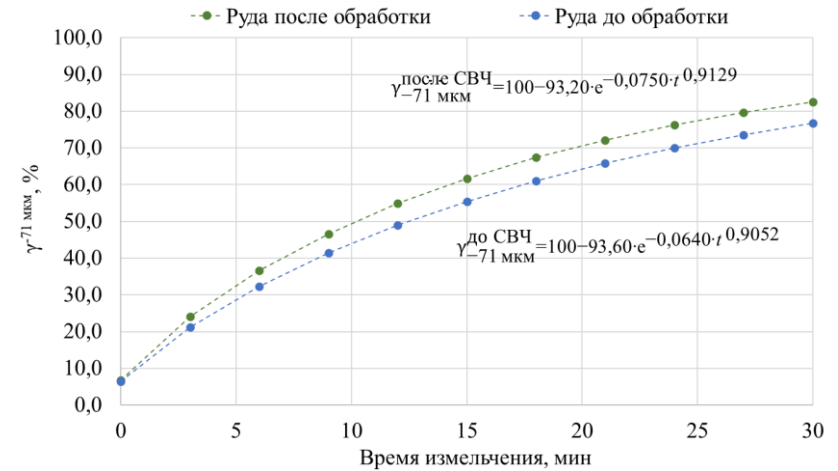


Рисунок 4 – Графическая зависимость выхода флотационного класса -71 мкм от времени измельчения руды до и после СВЧ обработки

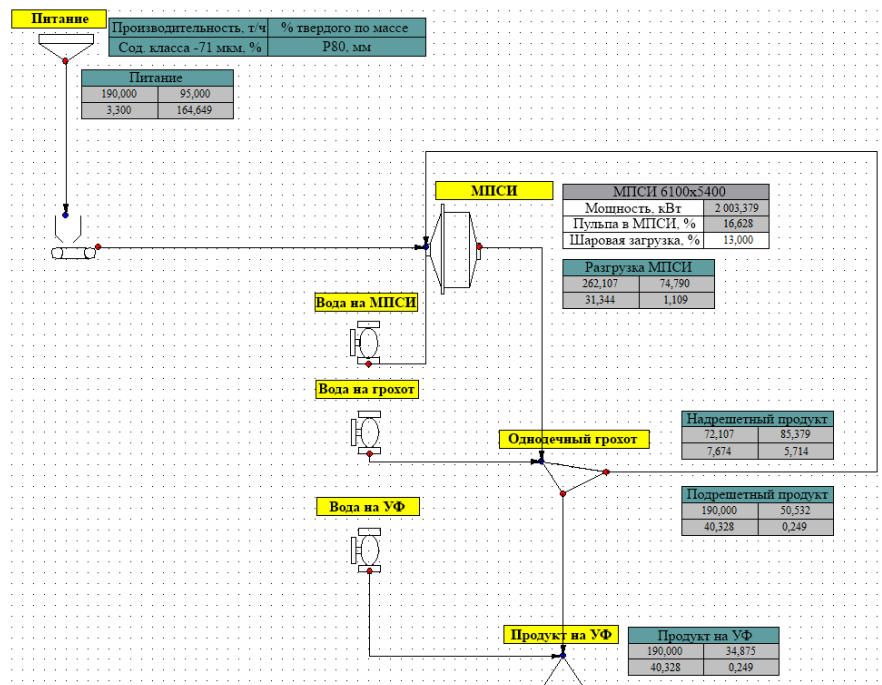


Рисунок 5 – Схема рудоподготовки углеродистой благороднометаллической руды без предварительной СВЧ обработки

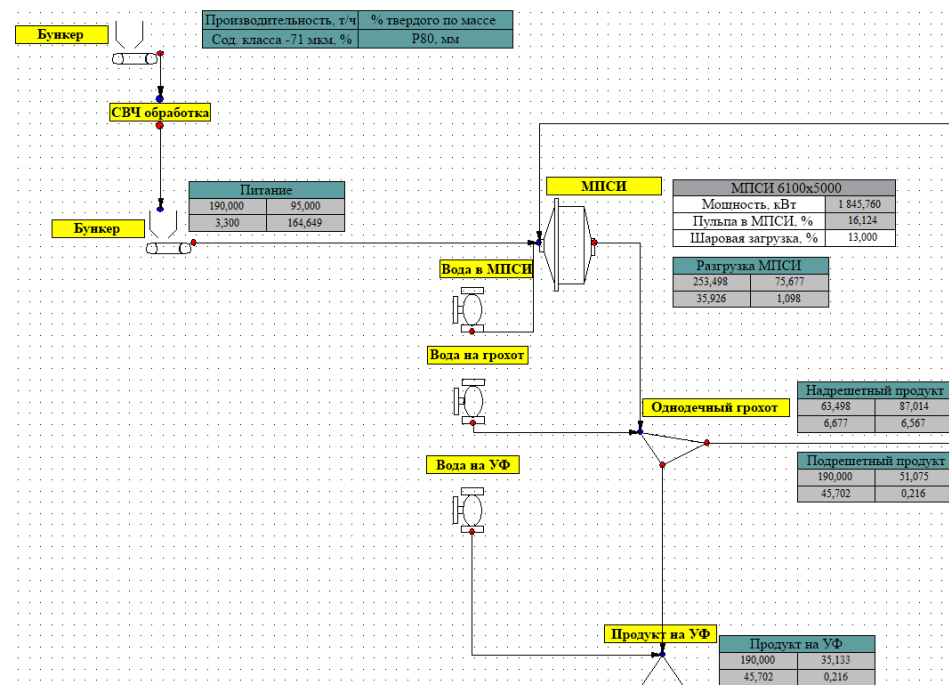


Рисунок 6 – Схема рудоподготовки углеродистой благороднометаллической руды после предварительной СВЧ обработки

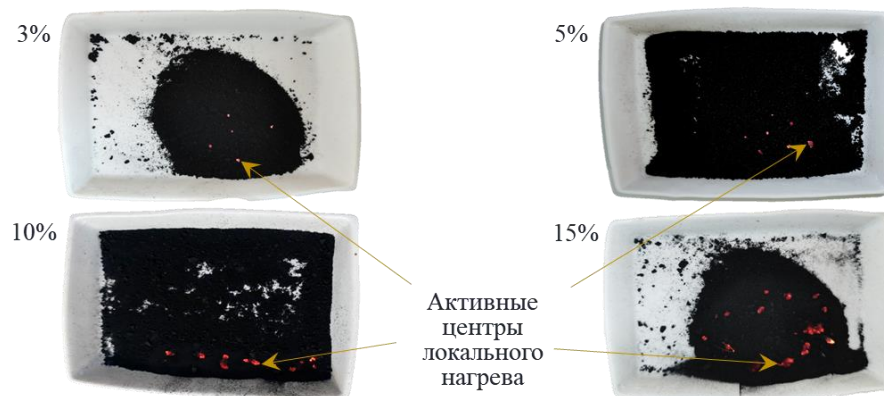
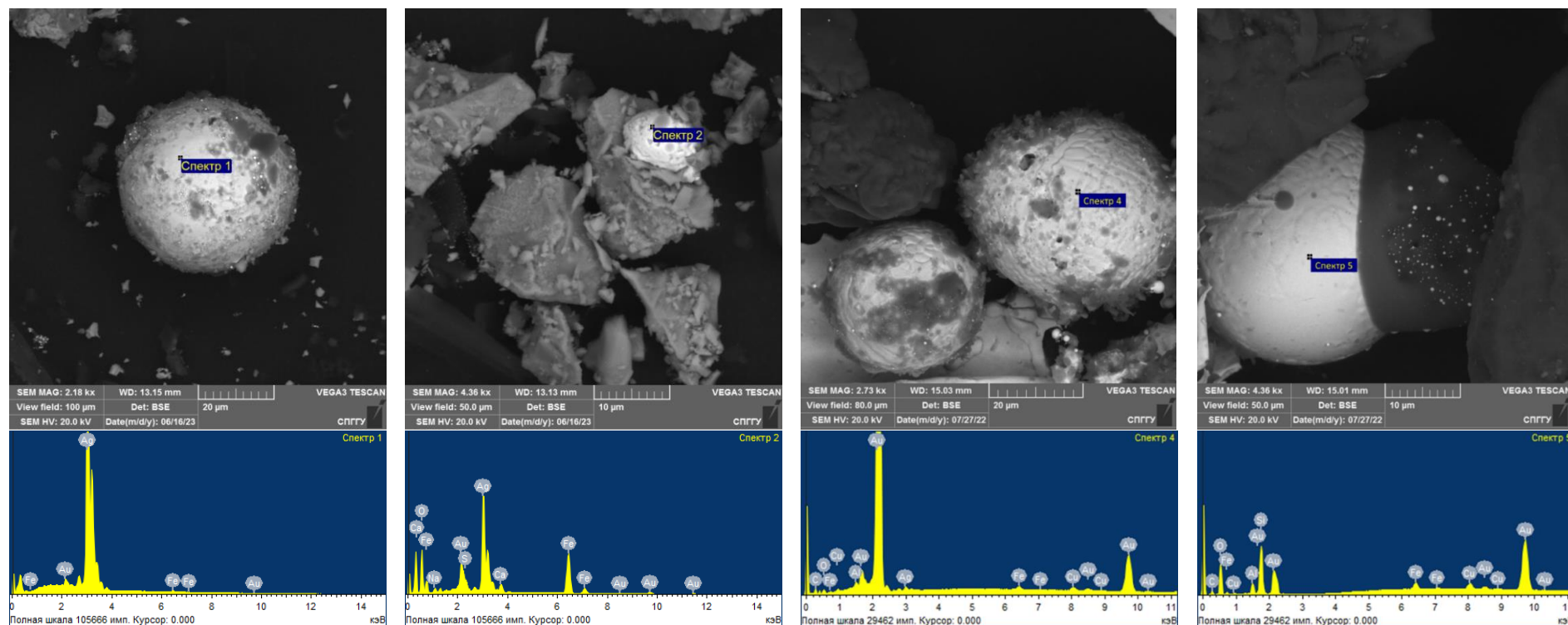


Рисунок 7 – Образование активных центров локального нагрева при добавлении варьируемых содержаний магнетита в процессе СВЧ обработки в модельных углеродсодержащих материалах

Таблица 1 – Сводные результаты исследования влияния содержания магнетита на укрупнение низкоразмерных благородных металлов в модельных навесках до и после обработки

Параметры	Значения					
Содержание магнетита, %	0 (до обработки)	0	3	5	10	15
Средний размер укрупненного низкоразмерного Ag, мкм	1-100 нм	5-10	10-15	10-20	20-40	10-15
Максимальный размер укрупненного низкоразмерного Ag, мкм		39,0	43,0	92,3	123,1	102,0
Степень укрупнения		75-7500	125-12500	150-15000	300-30000	125-12500
Средний размер укрупненного низкоразмерного Au, мкм	1-100 нм	1-5	5-10	10-20	20-50	20-50
Максимальный размер укрупненного низкоразмерного Au, мкм		6,7	13,7	55,2	83,3	59,2
Степень укрупнения		30-3000	75-7500	150-15000	350-35000	350-35000
Средняя крупность магнетита, мкм	10-15					
Максимальная крупность магнетита, мкм	49,0					



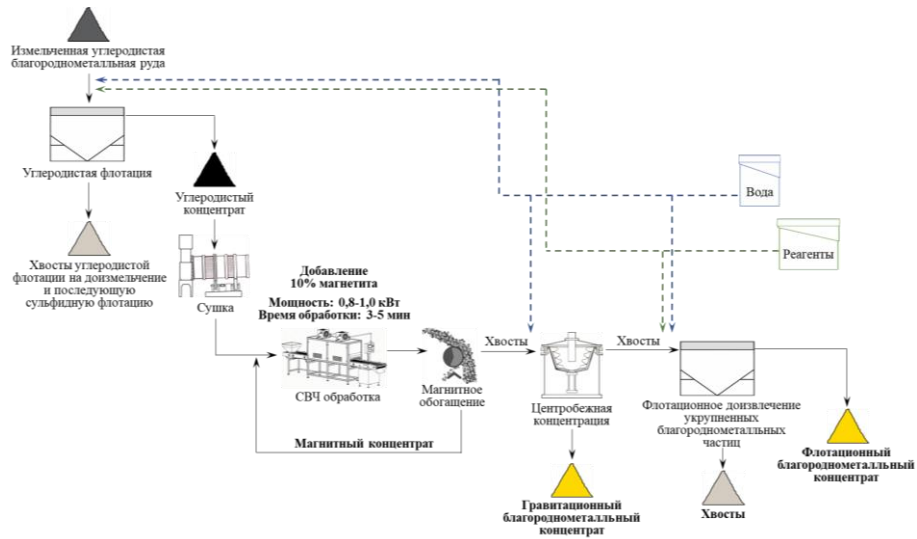


Рисунок 9 – Основа разработки энергоэффективной технологии переработки углеродистой благороднометаллической руды ($C_{org} > 1\%$)

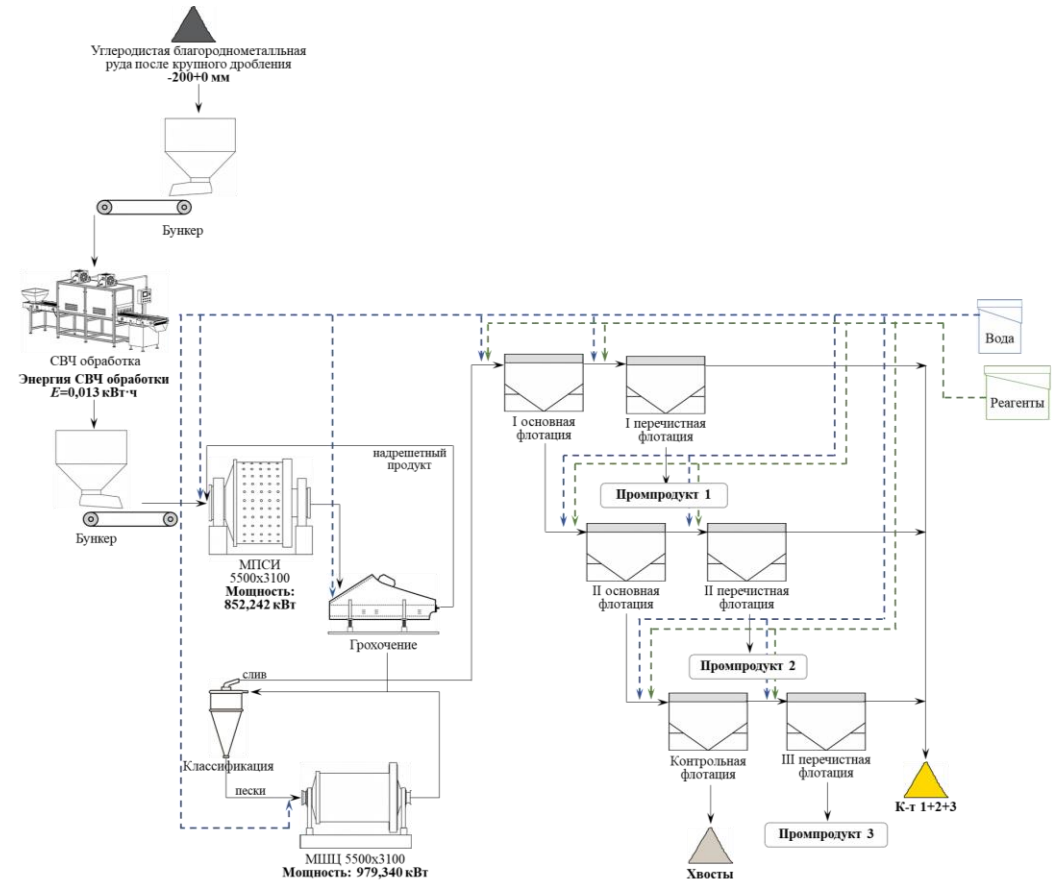


Рисунок 10 – Разработанная принципиальная технологическая схема переработки углеродистой благороднометаллической руды ($C_{org} < 1\%$)