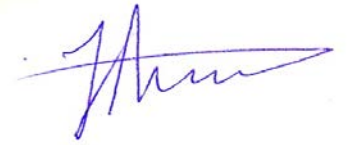


*На правах рукописи*



**АНАШКИНА НАТАЛИЯ ЕВГЕНЬЕВНА**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, СТРУКТУРНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
АЛМАЗОВ И ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ ПРИ  
НЕТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ  
ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова  
Российской академии наук (ИПКОН РАН)

**Научный руководитель**

**Бунин Игорь Жанович**, доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теории разделения минеральных компонентов» отдела «Проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья» Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН).

**Официальные оппоненты:**

**Иванков Сергей Иванович** - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС)

**Чернышева Елена Николаевна** - кандидат технических наук, инженер технолог ООО «Коралайн Инжиниринг» (СЕТСО)

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС» (НИТУ МИСиС)

Защита диссертации состоится «05» февраля 2019 г. в 14 час. 30 мин на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8 (495) 360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте [www.ипконран.рф](http://www.ипконран.рф).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук



Матвеева Т.Н.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность** диссертации обусловлена необходимостью совершенствования технологии обогащения руд алмазоносных кимберлитов на основе разработки и внедрения новых способов интенсификации процессов дезинтеграции, вскрытия порообразующих минералов, селективного распознавания и выведения кристаллов алмазов при дроблении и измельчении, выявления новых разделительных признаков и увеличения контрастности физико-химических, механических, электрофизических и люминесцентных свойств алмазов и минералов породы.

При существующей в России технологии добычи и переработки алмазоносных кимберлитов повреждаемость кристаллов алмаза составляет от 25% до 75%, что приводит к потере полезной массы кристаллов по разным оценкам от 12 до 29%. Основным источником повреждений алмаза при переработке кимберлитовых руд является процесс их самоизмельчения, приводящий к нарушению целостности значительного числа кристаллов алмаза. Кроме того, использование в данном процессе высокоминерализованных оборотных вод, а также дополнительное растворение компонентов из рудной массы приводит к образованию примесных гидрофильных пленок на поверхности кристаллов и, как следствие, изменению их технологических свойств.

Повышение сохранности кристаллов алмазов при их извлечении из руд можно обеспечить как за счет предварительного разупрочнения минералов кимберлита и сокращения пребывания рудной массы в мельницах мокрого самоизмельчения (ММС), так и вследствие направленного изменения (модификации) структурно-химических и технологических свойств самого алмаза. Практика исследований в области переработки алмазосодержащих кимберлитов свидетельствует об экономической нерациональности применения традиционных технологий и существенных потерях алмазов крупностью менее 5 мм. В связи с этим, проблема разработки новых процессов и методов, обеспечивающих эффективную комплексную переработку труднообогатимых кимберлитов, повышение извлечения и сохранности целостности и природного качества алмазов, является весьма актуальной.

В последние годы в России и за рубежом все большее значение приобретают новые, высокоэффективные, энергосберегающие методы переработки труднообогатимого алмазосодержащего минерального сырья, такие как электрохимический метод водоподготовки, обработка химическими реагентами, ультразвуковая обработка минеральных суспензий (пульп), водных систем и реагентов, криогенная обработка, механохимическая активация и другие методы, способствующие повышению эффективности технологического процесса извлечения алмазов из руд и сохранности кристаллов алмазов при измельчении кимберлитов в мельницах самоизмельчения.

Одним из путей повышения эффективности процессов дезинтеграции минерального сырья, разделения минералов с близкими физико-химическими и технологическими свойствами является использование в подготовительных операциях перед обогащением руд нетрадиционных (немеханических) методов энергетических воздействий, таких как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, лазерные, плазменные, микроволновые, электроимпульсные и другие виды воздействий. Вопросам применения энергетических воздействий на геоматериалы с целью интенсификации процессов переработки минерального сырья посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей: И.Н. Плаксина, В.А. Чантурии, Р.Ш. Шафеева, В.П. Якушкина, В.А. Вдовина, Г.Р. Бочкарева, Ю.В. Гуляева, В.А. Черепенина, В.Д. Лунина, И.Ж. Бунина, А.Т. Ковалева, М.В. Рязанцевой, И.А. Хабаровой, В.Е. Вигдергауза, В.И. Ростовцева, Ю.П. Вейгельта, С.А. Гончарова, В.И. Куреца, Ю.А. Гуськова, К.Е. Наге, N.A. Rowson, C. Sahuou и других исследователей.

В ИПКОН РАН экспериментально показано, что нетепловое воздействие мощных наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ) на тонкодисперсное минеральное сырье вызывает селективное раскрытие сростков, направленное (контрастное) изменение структурно-химических и флотационных свойств полупроводниковых рудных (сульфидных) минералов. В диссертации для обоснования эффективности применения импульсных энергетических воздействий в технологическом процессе извлечения алмазов из кимберлитовых руд впервые проведены комплексные экспериментальные исследования механизма воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения на структурные, физико-химические, механические и технологические свойства природных минералов-диэлектриков – порообразующих минералов кимберлита (оливина, серпентина, кальцита) и кристаллов алмазов.

**Идея работы** – эффективное использование нетеплового воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения для разупрочнения природных минералов-диэлектриков (порообразующих минералов кимберлитов), направленного изменения структурно-химических, физико-химических и флотационных свойств кристаллов алмаза.

**Цель работы** – установление основных закономерностей изменения структурно-химических, механических, электрических, физико-химических и технологических свойств алмазов и порообразующих минералов кимберлитов в условиях воздействия мощных (высоковольтных) наносекундных электромагнитных импульсов и обоснование рациональных параметров электромагнитной импульсной обработки геоматериалов для повышения сохранности алмазов и эффективности процессов извлечения из руд ценных кристаллов. Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

1) вскрытие и изучение основных механизмов изменения структурно-химических свойств и преобразования поверхности алмазов и порообразующих минералов в условиях нетеплового воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения с учетом влияния параметров электроимпульсной обработки;

2) исследование влияния МЭМИ на содержание структурных дефектов и механические свойства (микротвердость) природных минералов-диэлектриков (кальцита, оливина и серпентина);

3) изучение изменений электрических, физико-химических (гидрофобно-гидрофильное состояние, смачиваемость) и технологических (флотационных) свойств кристаллов алмазов и порообразующих минералов в результате электромагнитной импульсной обработки;

4) установление и обоснование рационального режима нетеплового воздействия МЭМИ на минералы кимберлита для достижения максимального раскрытия и обеспечения сохранности кристаллов *алмаза в процессе измельчения* кимберлитовых руд, направленного (контрастного) изменения структурно-химических и технологических свойств природных минералов-диэлектриков для повышения эффективности технологического процесса извлечения алмазов из руд.

#### **Объекты исследований:**

- процессы структурно-химических преобразований поверхности алмазов и порообразующих минералов кимберлитов при воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения;

- процессы образования структурных дефектов в кристаллах алмазов и порообразующих минералах в условиях импульсных энергетических воздействий, обуславливающие контрастное изменение механических свойств геоматериалов;

- процессы электроимпульсной деструкции гидрофильных минеральных образований на поверхности природных алмазов и модификации структурно-чувствительных (оптико-спектроскопических, донорно-акцепторных, электрических, физико-химических и технологических) свойств алмазных кристаллов при воздействии МЭМИ;

- процессы регулирования гидрофобно-гидрофильным состоянием поверхности алмазов и минералов кимберлитов для повышения извлечения природных алмазов методом беспенной флотации.

#### **Предметы исследований:**

- состав порообразующих минералов кимберлитов (оливин, серпентина и кальцита; Республика Саха, Якутия), природных технических (месторождение Булкур) и синтетических (АС-120) алмазов, а также поверхностных минеральных образований на алмазах в подготовительных операциях обработки МЭМИ и процессах обогащения;

- структурно-химические, оптико-спектроскопические, механические, донорно-акцепторные, электрические, физико-химические (гидрофобность, смачиваемость) и технологические (флотационные) свойства алмазов и порообразующих минералов в процессе нетеплового воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения;

- рациональные параметры электромагнитной импульсной обработки природных минералов-диэлектриков для разупрочнения кимберлитовой породы, повышения сохранности кристаллов алмазов в процессе измельчения, увеличения контрастности физико-химических свойств поверхности алмазов и минералов породы и улучшения технологического процесса извлечения алмазов из руд.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использовался комплекс современных аналитических, физических и физико-химических методов изучения микроструктуры и свойств минералов.

- Обработка минеральных проб проводилась на лабораторной установке для электромагнитной импульсной обработки УОМЭП – 1 (ИПКОН РАН, ООО «НПП ФОН»).

Исследование структурно-химических, физико-химических и технологических свойств алмазов и порообразующих минералов кимберлита до и после обработки образцов МЭМИ проводили с использованием следующих современных физико-химических методов анализа:

- для анализа фазового состава и структурных примесей поверхности порообразующих минералов кимберлитов и кристаллов природных и синтетических алмазов использовали методы РФЭС и ИК-фурье-спектроскопии;

- морфологические и структурно-химические свойства поверхности изучали методами аналитической электронной, конфокальной лазерной, сканирующей зондовой и оптической микроскопии (Аналитический центр изучения природного вещества при комплексном освоении недр, ИПКОН РАН);

- микротвердость породообразующих минералов определяли по методу Виккерса;  
 - оценку смачиваемости поверхности алмазов проводили методом В.А.Глембоцкого. Для породообразующих минералов кимберлита использовался метод лежащей («покоящийся» на плоскости) капли для определения краевого угла смачивания;

- флотуруемость природных алмазов изучали методом беспенной флотации;  
 - для изучения электрических свойств поверхности синтетических алмазов и породообразующих минералов кимберлитов применялись методы электроосмоса и электрофореза, а также метод Кельвина для определения электростатического потенциала природных алмазов;

- для анализа и интерпретации полученных результатов применяли методы статистической обработки экспериментальных данных, методы цифровой обработки и анализа компьютерных изображений поверхности минералов, а также методики анализа ИК-спектров.

### ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. В результате воздействия высоковольтных наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ) на алмазосодержащие кимберлиты происходит эффективное разупрочнение породообразующих минералов, селективное раскрытие полиминеральных комплексных сростков при сохранении целостности и основных природных свойств кристаллов алмаза. Разупрочнение пород достигается за счет образования каналов электрического пробоя в породообразующих минералах кимберлита вблизи металлосодержащих включений, а также деструкции поверхностного слоя оливина, серпентина и образования микротрещин в кальците, что приводит к уменьшению микротвердости на 40-66%.

В кристаллической решетке алмаза формируются дополнительные планарные образования интерстициального характера – «плейтлеты», характерные для природных алмазов с повышенными прочностными свойствами, что способствует большей сохранности кристаллов алмаза при измельчении кимберлитов.

2. Механизм стадийного процесса структурно-химических преобразований поверхности породообразующих минералов кимберлитов и алмазов при воздействии МЭМИ для направленного изменения физико-химических и технологических свойств минералов заключается в следующем:

- при малых экспозиционных «дозах» электромагнитного излучения ( $t_{\text{treat}} = 10 - 30$  с) происходит *дегидроксилирование* поверхности породообразующих минералов и *электрическое разрушение* гидрофильных минеральных пленок на поверхности алмазов, что вызывает повышение гидрофобности кальцита, оливина и алмазов;

- увеличение времени воздействия ( $t_{\text{treat}} > 30$  с) вызывает *окисление* (гидроксилирование, гидрирование) поверхности и снижение гидрофобности оливина, кальцита и алмаза; *деструкцию* минеральных образований на поверхности алмаза и поверхностного слоя серпентина.

3. Индуцированные электрическим полем структурно-химические преобразования поверхности алмазов вызывали следующие изменения гидрофильно-гидрофобного состояния и флотационных свойств алмазных кристаллов, свидетельствующие о перспективах применения МЭМИ для повышения эффективности технологического процесса извлечения алмазов из руд:

- снижение числа гидрофильных алмазов изучаемой коллекции на 22% (с 45% до 23%; минимум достигался при  $t_{\text{treat}} \sim 150$  с) и увеличение числа кристаллов со смешанными свойствами. Максимальное содержание гидрофобных алмазов получено в результате обработки МЭМИ в течение  $t_{\text{treat}} \cong 50$  с; при увеличении  $t_{\text{treat}}$  до 100–150 с число гидрофобных индивидов снижалось;

- повышение извлечения алмазов в процессе беспенной флотации с 47% (без обработки МЭМИ) до 61% (МЭМИ,  $t_{\text{treat}} \cong 150$  с), причем максимальное содержание гидрофобных флотуруемых кристаллов достигалось при  $t_{\text{treat}} \cong 30$  с.

#### Научная новизна работы

1. Получены новые экспериментальные данные о влиянии МЭМИ на комплекс структурных, механических, электрических, физико-химических и технологических свойств алмазов и породообразующих минералов кимберлитов, подтверждающие развиваемые в диссертации

представления о механизме нетеплового воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения на геоматериалы:

- снижение микротвердости породообразующих минералов в целом на 40–66% при сохранении целостности и природных свойств кристаллов алмазов и контрастное (разнонаправленное) изменение функционально-химического состава поверхности, электрических и физико-химических (гидрофобность) свойств алмазов и минералов породы;

- увеличение извлечения алмазов при флотации за счет предварительной обработки МЭМИ, вызывающей деструкцию и удаление с поверхности кристаллов гидрофильных минеральных пленок, увеличение абсолютного значения электрокинетического потенциала и гидрофобных свойств алмазов.

2. Впервые выявлены и экспериментально обоснованы механизмы изменения структурно-химических, механических, физико-химических и технологических свойств *природных минералов-диэлектриков* – алмаза, оливина, серпентина и кальцита из кимберлитов в результате воздействия мощных электромагнитных импульсов (МЭМИ). Основными из этих механизмов являются следующие:

- *разупрочнение* породообразующих минералов вследствие образования микроканалов электрического пробоя вблизи тонкодисперсных металлосодержащих включений (сульфидов, оксидов), разупорядочения структуры (деструкции) поверхностного слоя минералов в результате высоковольтной поляризации минерального вещества и воздействия на минеральную поверхность активных продуктов излучения плазмы искрового разряда, вызывающее существенное уменьшение микротвердости минералов-диэлектриков;

- дисперсионное *упрочнение* алмазов вследствие образования новых дефектов типа *B2* (плеитлетс) без глубокой структурной перестройки кристаллов, что, предположительно, вызывает повышение прочностных свойств алмазов и способствует большей сохранности ценных кристаллов при измельчении кимберлитов;

- поглощение энергии импульсного электромагнитного излучения в процессе *стадийных структурно-химических преобразований поверхности* минералов, вызывающих контрастное (разнонаправленное) изменение электрических, физико-химических и технологических (флотационных) свойств алмазов и минералов породы.

**Научное значение работы.** Вскрыт и экспериментально обоснован механизм изменения химического (фазового) состава поверхности, физико-химических, структурных и технологических свойств алмазов и породообразующих минералов кимберлитов при импульсном энергетическом воздействии, что позволило обосновать рациональные режимы и условия электромагнитной импульсной обработки геоматериалов, обеспечивающие повышение эффективности процессов дезинтеграции и разупрочнения минералов породы при максимальной сохранности алмазных кристаллов и флотационного извлечения алмазов из руд и концентратов.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке рациональных параметров нетеплового воздействия высоковольтных наносекундных импульсов и условия электромагнитной импульсной обработки кимберлитов для повышения эффективности технологических процессов разупрочнения породообразующих минералов, извлечения алмазов из руд и обеспечения сохранности ценных кристаллов при измельчении алмазосодержащих кимберлитов в мельницах самоизмельчения.

Получены экспериментальные результаты, свидетельствующие о высокой эффективности предварительной электромагнитной импульсной обработки породообразующих минералов кимберлита (Якутия) и природных технических алмазов месторождения Булкур (Нижне-Ленский район Сибирской платформы):

- максимальное относительное изменение (уменьшение) микротвердости породообразующих минералов составило: для оливина 62%, кальцита – 66%, серпентина – 42%, связующей массы кимберлитовой породы - 44%;

- прирост извлечения алмазов в результате предварительной кратковременной  $t_{treat} = 30$  с электромагнитной импульсной обработки кристаллов в процессе флотации составил ~9% (максимальный прирост – 14 % при  $t_{treat} \leq 150$  с) при существенном улучшении флотационных свойств за счет удаления минеральных пленок с поверхности кристаллов.

Даны предварительные рекомендации по использованию импульсных энергетических воздействий (МЭМИ) в технологической схеме обогащения и доводки руды трубки «Интернациональная» на ОФ№3 МГОКа АК «АЛРОСА» для переработки хвостов обогатительных операций, направленных на доизмельчение (циркуляция), относящихся к классу крупности руды менее 5 мм, а также концентратов перед операциями липкостной сепарации и флотации.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в работе, подтверждается использованием комплекса современных физико-химических методов исследований, непротиворечивостью полученных результатов и выводов; достижением высокой эффективности процессов дезинтеграции (разупрочнения) породообразующих минералов кимберлитов, электроимпульсного разрушения минеральных пленок на поверхности алмазов, контрастного структурно-химического модифицирования свойств алмазов и минералов породы при нетепловом воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения в интервале изменения установленных рациональных параметров МЭМИ; использованием методов математической статистики для обработки полученных экспериментальных данных.

**Личный вклад автора** заключается в проведении аналитического обзора научно-технической информации о методах, применяемых при обогащении алмазоносных кимберлитов, формировании эталонной коллекции минералов кимберлитов и алмазов, проведении кристаллохимической классификации природных технических алмазов и выполнении экспериментальных исследований по влиянию МЭМИ на структурно-химические, морфологические, физико-химические, механические, электрические, флотационные свойства алмазов и породообразующих минералов кимберлитов, анализе и обобщении полученных результатов.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на: XXIX International mineral processing congress (IMPC 2018); Международном совещании «Плаксинские чтения» – 2014, 2015, 2016; XIII Международной конференции «Физика диэлектриков», 2014 г.; XI, XII и XIII Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», 2014, 2015, 2016 гг.; IV, V научной молодежной школе «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, 2014, 2015 гг.; 18-ом Международном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах», 2015 г.; Всероссийских ежегодных семинарах по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, 2015, 2016 г.; Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, 2015, 2018 г.; XI-ой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом, 2015, 2017 г.; V Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии в науке о Земле», 2015 г.; VI-ой международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов, 2015 г.; X Конгрессе обогатителей стран СНГ, 2015 г.; VI Всероссийской школе молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия», 2015 г.; 19-й Международном междисциплинарном симпозиуме "Порядок, беспорядок и свойства оксидов", 2016, 2018 г.; XIV Международной школе-семинаре «Эволюция дефектных структур в конденсированных, 2016 г.; Международном научном симпозиуме «Неделя горняка - 2017»; Международной конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли», 2017; XIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 2017 г.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликованы:

- в рекомендованных ВАК РФ изданиях – 7,
- в прочих печатных изданиях – 28,
- всего научных работ – 35.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 170 наименований, содержит 180 страницы машинописного текста, 38 рисунков и 11 таблиц.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории теории разделения минеральных компонентов научного отдела проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья ФГБУН ИПКОН РАН им. академика Мельникова: к.т.н. Г.П. Двойченковой, к.т.н. В.Г. Миненко, к.т.н. М.В. Рязанцевой, к.т.н. И.А. Хабаровой, к.т.н. Е.С. Журавлевой, сотруднику Центра изучения минерального вещества при комплексном освоении недр ИПКОН РАН к. г.-м. н. Е.В. Копорулиной, д.т.н. профессору В.В. Кудряшову, а также сотруднику ФГУП ЦНИГРИ: д. г.-м. н. Г.К. Хачатрян за помощь в проведение исследований и консультации.

Автор глубоко признателен академику РАН, доктору технических наук, профессору В.А. Чантурия за консультации и помощь на протяжении всей работы.

Особую благодарность автор выражает доктору технических наук И.Ж. Бунину – научному руководителю и идейному вдохновителю выполненных исследований.

### Общая характеристика работы

В России в связи с климатическими условиями дезинтеграция алмазоносных руд при их обогащении традиционно осуществляется путем мокрого самоизмельчения кимберлитов, что, как правило, сопровождается значительной повреждаемостью кристаллов алмаза. Другой особенностью обогащения алмазов и, прежде всего, мелких классов крупности, на отечественных предприятиях является широкое применение флотации. В связи с этим основными направлениями совершенствования технологии извлечения алмазов являются интенсификация процессов дезинтеграции минеральных комплексов (сростков) и повышение селективности разделения минералов кимберлитов. Эти задачи могут быть решены за счет использования физико-химических, электрохимических и физических методов энергетических воздействий на геоматериалы. Среди таких методов важное значение имеет высокоэффективный, энергосберегающий способ *нетеплового* воздействия на руды и продукты обогащения мощными наносекундными электромагнитными импульсами – МЭМИ.

Ранее исследованиями ИПКОН РАН, ИРЭ РАН и ЦНИГРИ показана результативность применения МЭМИ в процессах извлечения благородных металлов из упорных руд за счет повышения селективности дезинтеграции минеральных сростков, а также для контрастного изменения химического и фазового состава поверхности, электрофизических, электрохимических, сорбционных и флотационных свойств сульфидов, обладающих близкими физико-химическими свойствами.

При использовании физико-химических методов обогащения и извлечения алмазов одной из основных причин потерь ценных кристаллов является наличие гидрофильных минеральных образований на их поверхности. Они имеют различную морфологию и состав и образуются как непосредственно в рудном теле под воздействием вторичных процессов, так и в результате контакта алмазов с минерализованными водами в ходе обогатительных операций. Для удаления вторичных минеральных пленок с поверхности алмазов в ИПКОН РАН разработан способ электрохимических воздействий, продемонстрировавший свою эффективность в технологических процессах переработки труднообогатимых кимберлитов (Чантурия, Двойченкова, Ковальчук, 2016).

Вместе с тем в настоящее время отсутствует экспериментальное обоснование механизма изменения физико-химических, структурных и технологических свойств природных *минералов-диэлектриков* (алмазов и породообразующих минералов кимберлитов) при воздействии МЭМИ.

В настоящей диссертационной работе с применением современных прецизионных физико-химических методов выполнен комплекс экспериментальных исследований по вскрытию механизма изменения структурно-химических, механических, электрических и технологических свойств кристаллов алмаза и породообразующих минералов кимберлитов при нетепловом воздействии МЭМИ для повышения сохранности и эффективности извлечения алмазов в процессах переработки и обогащения алмазосодержащих руд.

**Защищаемое положение 1 обосновано в 3 и 4 главах.** В результате воздействия мощных наносекундных электромагнитных импульсов на алмазосодержащие кимберлиты происходит эффективное разупрочнение породообразующих минералов, селективное раскрытие полиминеральных сростков при сохранении целостности и основных природных свойств кристаллов алмаза. Разупрочнение пород достигается за счет образования каналов электрического пробоя в породообразующих минералах кимберлита вблизи металлосодержащих включений, а также деструкции поверхностного слоя оливина, серпентина и образования микротрещин в кальците, что приводит к уменьшению их микротвердости на 40-66%.

В кристаллической решетке алмаза формируются дополнительные планарные образования интерстициального характера – «плейтлетс», характерные для природных алмазов с повышенными прочностными свойствами, что способствует большей сохранности кристаллов алмаза при измельчении кимберлитов.

По данным аналитической электронной микроскопии (РЭМ–РСМА) в результате импульсных энергетических воздействий на поверхности породообразующих минералов произошли следующие, стимулированные электрическим полем, изменения: образование следов незавершенных пробоев, локализованных в местах скопления металлосодержащих фаз, для оливина и серпентина (Рисунок 1 б, в соответственно) и разнонаправленных трещин и микрокристаллических фрагментов (выколоч) для кальцита (Рисунок 1, а).

Наряду с изменениями микрорельефа поверхности породообразующих минералов кимберлитов, импульсные энергетические воздействия вызывали нарушение их структуры, что подтверждено спектроскопическими исследованиями (глава 3).

Изменения спектральных характеристик оливина и серпентина под воздействием МЭМИ связаны с нарушением слоистой микроструктуры минералов, обусловленные образованием,



перемещением и взаимодействием дефектов (дислокаций, микротрещин и других дефектов), а также процессами разупорядочения и аморфизации, что, по всей видимости, вызвано эмиссией электронов с валентного уровня атома Si и процессами поляризации минералов под воздействием МЭМИ.

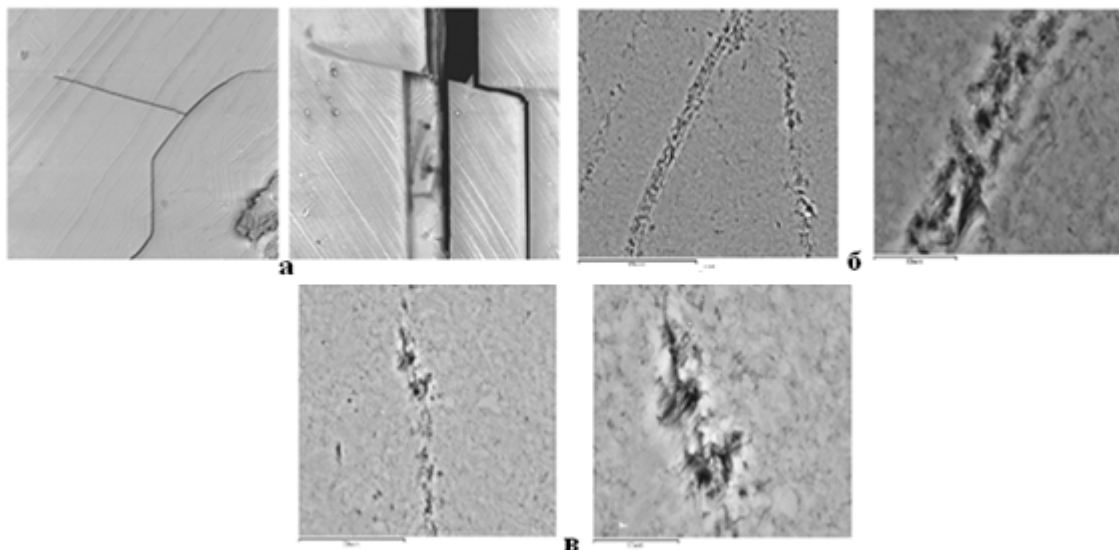


Рисунок 1 – РЭМ-изображение поверхности кальцита (а), серпентина (б) и оливина (в) после воздействия МЭМИ в течение 50 с

Электромагнитная импульсная обработка породообразующих минералов кимберлитов вызвала значительное снижение микротвердости образцов. На рисунке 2 показаны зависимости относительного изменения микротвердости минералов от времени импульсной обработки  $t_{treat}$ :  $(HV_{0i} - HV_i) / HV_{0i}, \%$ , где  $HV_{0i}$  – микротвердость образцов в исходном состоянии,  $HV_i$  – микротвердость  $i$ -го образца после обработки МЭМИ.

В целом максимальное относительное снижение микротвердости минералов достигало 42-66% в результате воздействия МЭМИ в течение 100 и 150 с. Для минералов с низкой твердостью (кальцит, серпентин) резкое снижение микротвердости достигалось уже при  $t_{treat} = 10-30$  с. Скорость изменения микротвердости, среди прочих факторов, по всей видимости, определяется изначальной твердостью минералов (природой (энергией) химических связей, валентностью) и максимальна при малых дозах электромагнитного импульсного излучения для минералов со сравнительно низким уровнем твердости.

По данным конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ) в области вдавливания алмазной пирамидки на поверхности оливина и кальцита в результате обработки МЭМИ образовывались микротрещины, предположительно, дислокационного происхождения (Рисунок 2 з,д), что, по всей видимости, свидетельствует о влиянии импульсных энергетических воздействий не только на прочностные свойства (микротвердость) минералов, но и на их трещиностойкость (вязкость разрушения  $K_C$ ).

В то же время нетепловое воздействие МЭМИ не вызывало образования существенных повреждений кристаллов алмаза, диагностируемых методами микроскопии, что обусловлено величиной электрической прочности алмаза, составляющей порядка  $10^9 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ , и на два порядка превышающей величину напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке генератора импульсов ( $E \sim 10^7 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ )

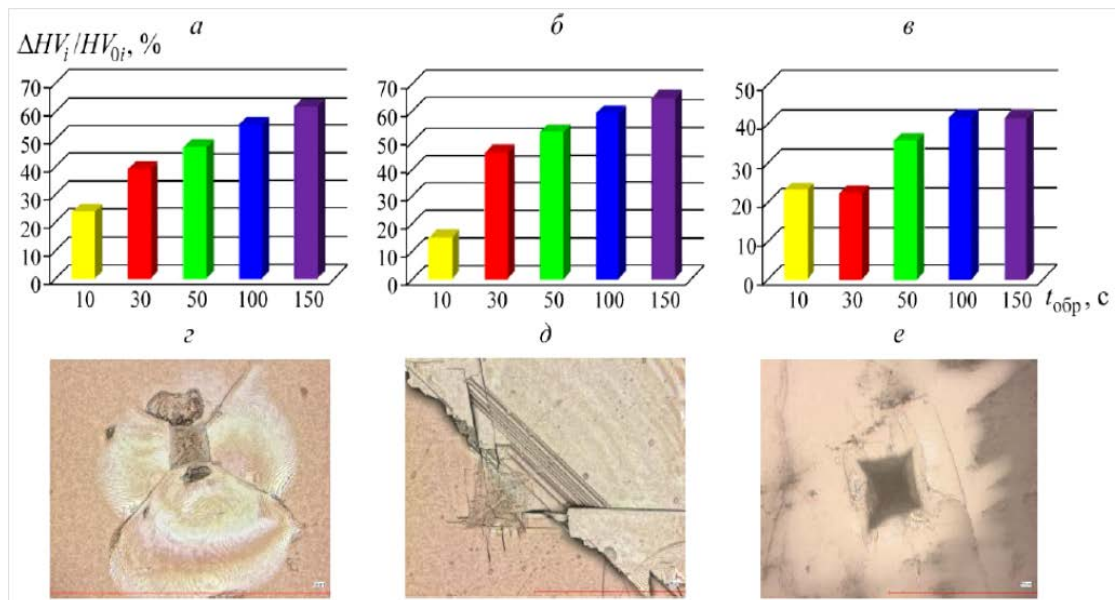


Рисунок 2 – Относительное изменение микротвердости ( $\Delta HV_i / HV_{0i}, \%$ ) оливина (а), кальцита (б), серпентина (e) в зависимости от времени обработки МЭМИ ( $t_{treat}$ ); морфология отпечатков алмазной пирамидки Виккерса на поверхности минералов (z)-(e).

По данным ИКФС в результате электромагнитного импульсного воздействия установлены **значимые** изменения структуры кристаллов алмаза, проявляющиеся в увеличении концентрации дефектов микросдвиговой природы, представленных межуглевыми атомами – плейтлетс или В2, характерными для алмазов с повышенными прочностными свойствами. Данные структурные изменения зафиксированы по **систематическому** увеличению коэффициента поглощения линии ИК-спектра около  $1365 \text{ см}^{-1}$ , обусловленной В2-дефектами, с ростом продолжительности (дозы) электроимпульсной обработки  $N_{imp} = (1-15) \times 10^3$  (Рисунок 3). Вместе с тем глубокой структурной перестройки кристаллов алмаза не происходило, а именно, концентрация и распределение азотных центров практически не изменялись. Новые В2-дефекты образовывались, преимущественно, в образцах с повышенным относительным содержанием азотных В-дефектов, составляющим 35-65% от общего содержания примеси азота в кристаллах.

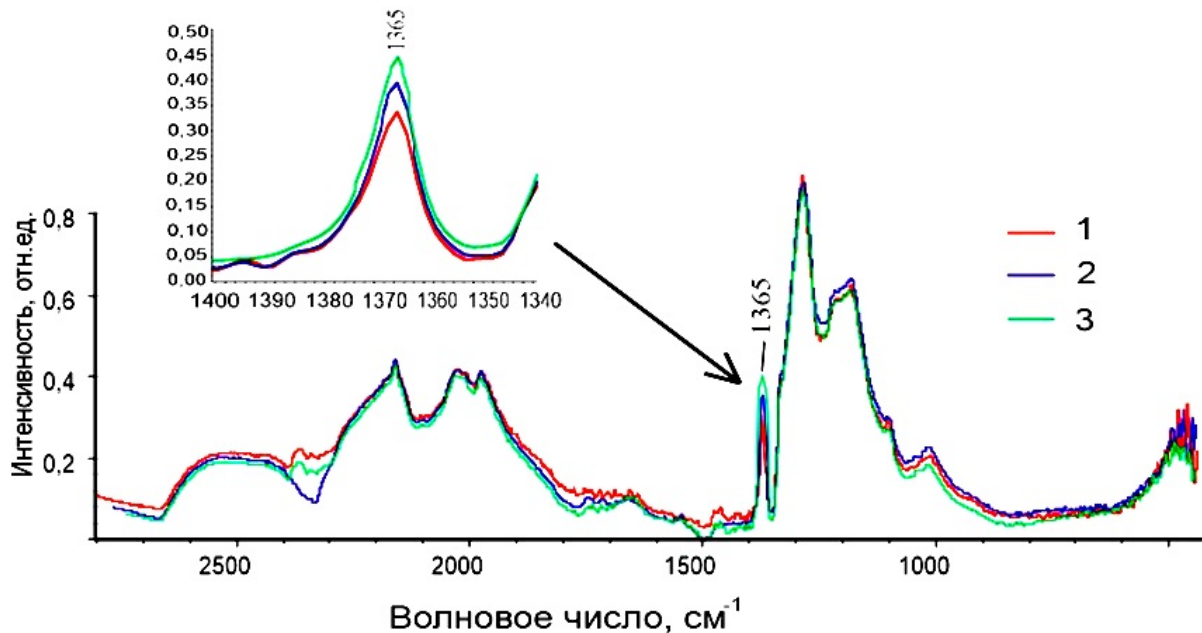


Рисунок 3 – ИК-спектр алмаза до (1) и после (2), (3) обработки МЭМИ: электроимпульсное воздействие в течение  $t_{treat} = 50 \text{ с}$  (2) и  $150 \text{ с}$  (3)

Исследование морфологических особенностей поверхности кристалла алмаза на субмикронном и нанометровом уровнях с использованием атомно-силового микроскопа показало наличие ориентированных узких протяженных полос, разделенных характерными вторичными трещинами. Эти полосы интерпретированы нами как проявление плейтлетс. В результате воздействия на алмазы МЭМИ ( $t_{\text{treat}} = 30$  с) наблюдалось незначительное расширение и углубление этих дефектов (Рисунок 4, а-в) а также возникновение новообразований в виде частиц шарообразной формы размером от нескольких десятков до 100 нм (Рисунок 4, г).

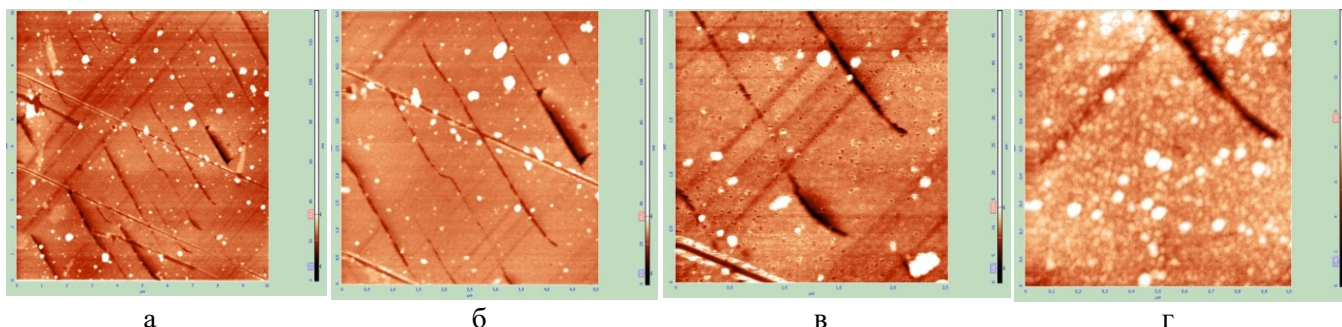


Рисунок 4 – АСМ–изображения рельефа поверхности кристалла алмаза после обработки МЭМИ в течение  $t_{\text{treat}} = 30$  с. Размер сканов: 10 x 10 мкм,  $Z \sim 70$  нм – (а); 5 x 5 мкм,  $Z \sim 30$  нм – (б); 2,5 x 2,5 мкм,  $Z \sim 30$  нм – (в); 1,0 x 1,0 мкм,  $Z \sim 15$  нм – (г)

Таким образом, в результате проведенных исследований установлен эффект разнонаправленного изменения механических (прочностных) свойств породообразующих минералов кимберлита (оливина, серпентина, кальцита) и алмазов в условиях воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения, состоящий в разупрочнении поверхности минералов породы, уменьшении их микротвердости в целом на 40–60% и, предположительно, повышении прочностных свойств алмазных кристаллов. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения импульсных энергетических воздействий для повышения эффективности разупрочнения породообразующих минералов алмазосодержащих кимберлитов без повреждения кристаллов алмазов, обеспечения их сохранности в процессе измельчения руд.

**В главе 3 и 4 раскрывается защищаемое положение 2.** Механизм стадийного процесса структурно-химических преобразований поверхности породообразующих минералов кимберлитов и алмазов при воздействии МЭМИ для направленного изменения физико-химических и технологических свойств минералов заключается в следующем:

- при малых экспозиционных «дозах» электромагнитного излучения ( $t_{\text{treat}} = 10\text{--}30$  с) происходит *дегидроксилирование* поверхности породообразующих минералов и *электрическое разрушение* гидрофильных минеральных пленок на поверхности алмазов, что вызывает повышение гидрофобности кальцита, оливина и алмазов;

- увеличение времени воздействия ( $t_{\text{treat}} > 30$  с) вызывает *окисление* (гидроксилирование, гидрирование) поверхности и снижение гидрофобности оливина, кальцита и алмаза; *деструкцию* минеральных образований на поверхности алмаза и поверхностного слоя серпентина.

Известно, что активность поверхности минерала в адсорбционных и химических взаимодействиях зависит от многих факторов, среди которых определяющую роль играет химическая и энергетическая неоднородность состава, структуры и свойств поверхности (Чантурия, Шафеев, 1977). Одним из подходов к исследованию структурно-химического состояния и физико-химических свойств поверхности твердого тела является оценка ее реакционной способности в донорно-акцепторных взаимодействиях на основе определения кислотно-основных свойств (Нечипоренко, 2017). Исследование функционально-химического состава поверхности изучено методами кислотно-основных индикаторов Гаммета для кальцита, оливина, синтетических алмазов и РФЭС для серпентина и синтетических алмазов.

Методом кислотно-основных индикаторов Гаммета установлено, что для кальцита (Рисунок 5, а) в результате обработки МЭМИ в течении 10 с наблюдалось снижение числа (содержания) центров

Бренстеда основного типа и увеличение содержания центров Льюиса и Бренстеда кислотного типа, что связано с дегидроксилированием поверхности, а при увеличении длительности воздействий наблюдался противоположный эффект, вызванный гидроксилированием поверхности. Для оливина (Рисунок 5, б) выявлена такая же закономерность - при кратковременной обработке происходило снижение концентрации основных бренстедовских центров, а при дальнейшем воздействии происходило гидроксилирование поверхности. Данные процессы связаны с взаимодействием поверхности кальцита и оливина с продуктами радиолитического распада воды.

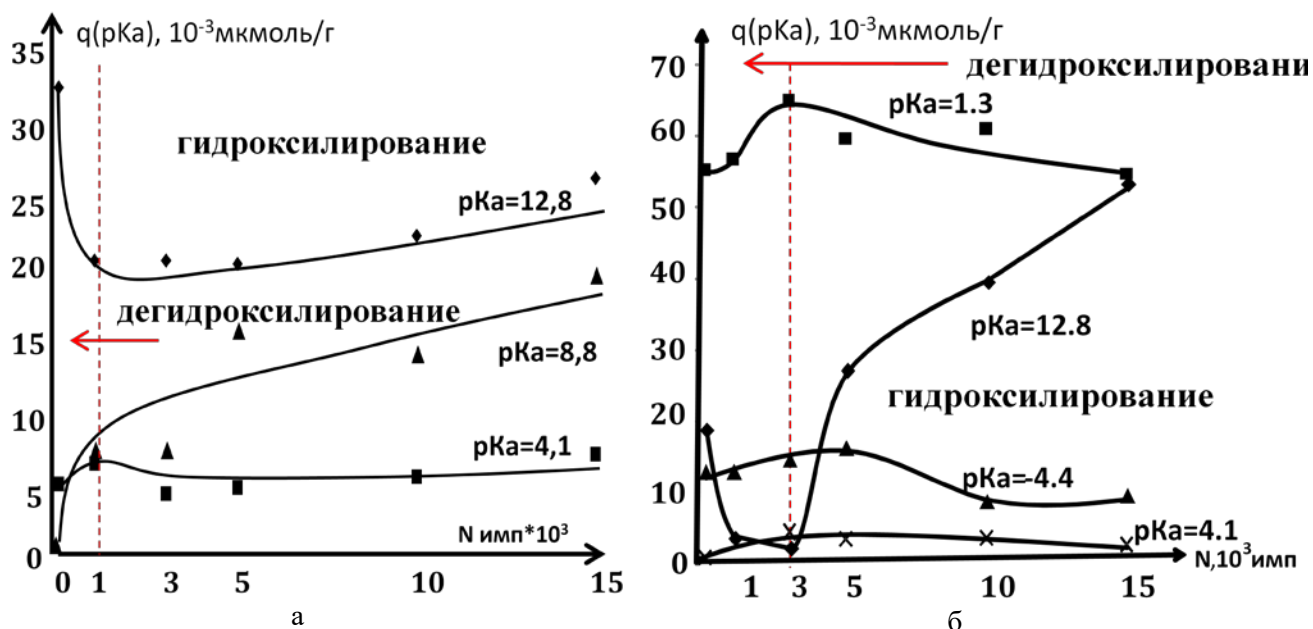


Рисунок 5 – Зависимость содержания центров ( $q(pK_a)$ ,  $10^{-9}$  моль·г $^{-1}$ ) с  $pK_a = 1,3; 4,1; 4,4; 8,8$  и  $12,8$  от дозы ( $N_{imp}$ ) электромагнитной импульсной обработки для кальцита (а) и оливина (б)

Для серпентина методом РФЭС выявлено, что при кратковременной импульсной обработке доля трехкоординированного  $Si^{3+}$  снижалась. Увеличение длительности обработки приводило к обратному эффекту – снижению концентрации  $Si^{4+}$  и атомов кислорода (Таблица 1).

Таблица 1 – Изменение фазового состава поверхности серпентина в результате воздействия МЭМИ (по данным РФЭС), ат. %

| Число МЭМИ, $10^3$ | Si 2p      |            | O 1s    |         |      |
|--------------------|------------|------------|---------|---------|------|
|                    | Si $^{3+}$ | Si $^{4+}$ | Si–O–Si | Si–O–Mg | O–Mg |
| 0                  | 88,4       | 11,7       | 8,5     | 69,12   | 22,4 |
| 1                  | 76,9       | 23,1       | 8,8     | 70,3    | 20,9 |
| 10                 | 82,3       | 17,7       | 8,1     | 63,7    | 28,2 |

Структурно-фазовые преобразования поверхностного слоя кристаллов алмазов в результате обработки МЭМИ в основном связаны с изменением химического состояния атомов кислорода. В спектре O 1s-уровня наблюдалось увеличение доли (ат. %) пика с  $E_{св} = 530,9$  эВ на 3,2-4,3% (Таблица 2), относящегося к кислороду гидроксильных групп, связанных с поверхностными атомами металлов, или к кислороду в составе C=O поверхностных карбонильных группировок.

Согласно результатам РФЭС нетепловое воздействие высоковольтных наносекундных импульсов на частицы синтетических алмазов определяло следующие изменения функционального покрова поверхности кристаллов алмаза:

- **гидроксилирование** поверхности при  $t_{reat} = 50-150$  с за счет взаимодействия активных продуктов радиолитического распада молекул адсорбированной воды с атомами металлических микропримесей, присутствующих в составе кристаллов алмазов;

- формирование карбонильных групп вследствие **окисления** поверхностного слоя минеральных частиц при их взаимодействии с активными продуктами радиолитического разложения водно-

воздушной среды ( $O_3$ ), образующимися в результате в разрядном промежутке генератора МЭМИ в воздухе при нормальных условиях при напряженности электрического поля  $\sim(1,5-2,5)\times 10^6$  В·м<sup>-1</sup>.

Таблица 2 – Влияние МЭМИ на фазовый состав поверхности синтетических алмазов (по данным РФЭС), ат. %

| Число МЭМИ, $10^3$ | C 1s            |                 |                 |      | O 1s                   |             |      |                                        |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|------------------------|-------------|------|----------------------------------------|
|                    | C-C ( $-sp^2$ ) | C-C ( $-sp^3$ ) | C=O, C-O, O-C-O | C-Me | O-Me, O <sub>ads</sub> | HO-Me, C=O  | HO-C | C-O-C, H <sub>2</sub> O <sub>ads</sub> |
| 0                  | 2,5             | 73,2            | 12,7            | 1,5  | 5,5                    | <b>32,1</b> | 52,8 | 9,6                                    |
| 3                  | 12,0            | 73,6            | 13,4            | 1,1  | 5,3                    | <b>32,2</b> | 51,0 | 11,3                                   |
| 5                  | 12,6            | 73,5            | 13,0            | 1,1  | 5,3                    | <b>35,3</b> | 51,4 | 8,1                                    |
| 15                 | 12,7            | 72,7            | 13,2            | 1,3  | 5,1                    | <b>36,4</b> | 51,9 | 6,7                                    |

В дополнение к РФЭС исследованиям методом адсорбции кислотно-основных индикаторов Гаммета изучен функционально-химический состав поверхности синтетических алмазов (Рисунок 6). Выявлено, что в исходном состоянии на поверхности преобладали брэнстодовские кислотные и нейтральные центры. Кратковременное воздействие МЭМИ приводило к увеличению содержания кислотных брэнстодовских центров ( $pK_a=1,3$ ), а увеличение длительности обработки, напротив, к снижению их содержания. В то же время, число основных брэнстодовских центров ( $pK_a=12,8$ ) монотонно возрастало с увеличением длительности обработки. Таким образом, при кратковременном воздействии происходила адсорбция воды на поверхности алмаза и усиление ее донорных свойств. Увеличение продолжительности обработки, напротив, вызывало повышение акцепторной способности поверхности, что связано с процессом ее гидроксильирования.

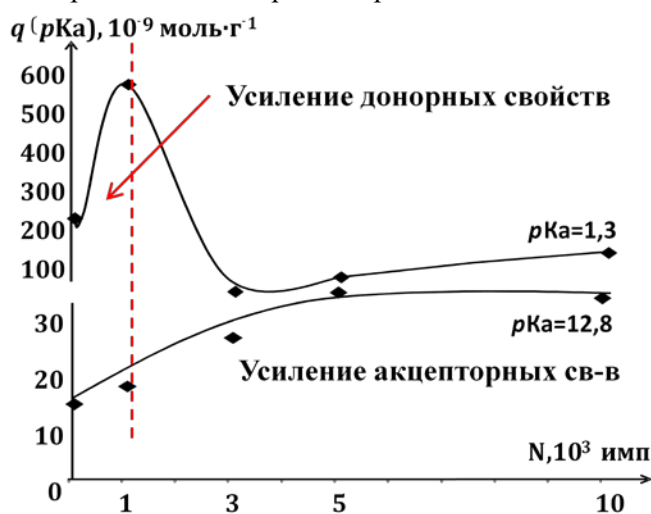


Рисунок 6 – Зависимость содержания центров ( $q(pK_\alpha)$ ,  $10^9$  моль·г<sup>-1</sup>) с  $pK_\alpha = 1,3$  и  $12,8$  от дозы ( $N_{imp}$ ) электромагнитной импульсной обработки синтетических алмазов

Данные об изменении физико-химических свойств минералов подтверждены результатами исследований их электрофизических свойств. Известно, что снижение величины электрокинетического потенциала ( $\zeta$ ) свидетельствует об уменьшении толщины диффузного слоя на границе раздела поверхности алмаз-раствор и, как следствие, - увеличении гидратированности поверхности.

Результаты измерений дзета-потенциала частиц породообразующих минералов и синтетических алмазов марки АС-120 приведены и на Рисунке 7. В исходном (до обработки МЭМИ) состоянии поверхность серпентина имела положительный, а оливина, кальцита и алмазов – отрицательный заряд, что согласуется с литературными данными по изучению химического состава и электроповерхностных свойств данных минералов.

В результате воздействия кратковременной электромагнитной импульсной обработки,  $t_{\text{treat}} \leq 30$  с, на природные минералы диэлектрики наблюдалось **контрастное** (разнонаправленное) изменение электрокинетического потенциала частиц синтетических алмазов и породообразующих минералов кимберлита, а именно, – монотонное увеличение  $\zeta$ -потенциала алмаза и кальцита при существенном снижении этого параметра для оливина и серпентина. При дальнейшем увеличении продолжительности импульсного воздействия происходило снижение абсолютной величины  $\zeta$ -потенциала оливина и кальцита вследствие гидроксирования поверхности и повышение  $\zeta$  потенциала серпентина. В этих условиях для частиц синтетического алмаза наблюдалось повышение электрокинетического потенциала в области отрицательных значений, по всей видимости, вследствие *гидрирования* поверхности частиц.

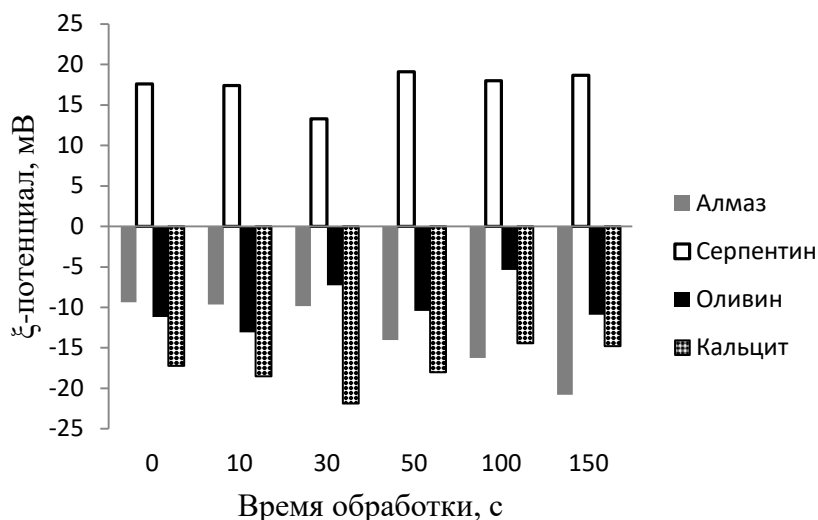


Рисунок 7 – Влияние МЭМИ на электрокинетический потенциал синтетических алмазов и породообразующих минералов кимберлита

В тоже время, наряду с процессами окисления поверхности алмазов при продолжительном воздействии МЭМИ ( $t_{\text{treat}} > 30$  с), развивался процесс электрической деструкции минеральных образований на поверхности кристаллов природных алмазов.

По данным растровой электронной микроскопии (РЭМ, микроскоп Jeol) на поверхности кристалла алмаза плоской формы (Рисунок 8, а) в исходном (без энергетических воздействий) состоянии наблюдались минеральные образования, по всей видимости, автономных фаз с дискретным, неравномерным характером распределения по поверхности кристалла (Рисунок 8, б-в) и микро-нанопористой структурой минерального вещества образований (Рисунок 8, в).

В результате электромагнитной импульсной обработки алмазного кристалла в течение  $t_{\text{treat}} = 30$  с ( $N_{\text{imp}} \cong 3 \times 10^3$ ) происходило отделение от поверхности алмаза фрагментов вторичных минеральных фаз размером от 40 до 100 мкм (Рисунок 8 г), предположительно, сульфата кальция и оксидов (гидроксидов) железа (РЭМ-РСМА).

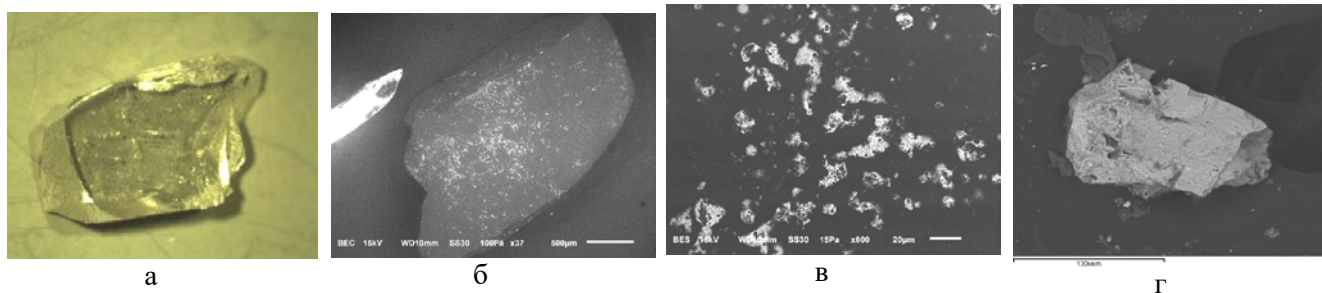


Рисунок 8 – Общий вид кристалла алмаза в исходном состоянии (а) (ОМ) и минеральные образования на поверхности алмаза (б, в) (РЭМ, JEOL JSM-6610LV). Фрагмент вторичных минеральных фаз, отделившийся от поверхности алмаза в результате обработки МЭМИ в течение  $t_{\text{treat}} = 30$  с (г) (РЭМ–РСМА, аналитический электронный микроскоп LEO 1420VP–EDX Oxford INCA Energy 350).

Полученные результаты подтверждены данными ИК-спектроскопии природных алмазов, имеющих на поверхности минеральные плёнки оксидов железа, примазки глинистых минералов и другие примеси, обусловленные длительным нахождением алмаза в экзогенных условиях. При увеличении времени импульсного воздействия на кристаллы ( $t_{\text{treat}} \geq 30$  с), в их ИК-спектрах исчезали максимумы поглощения, связанные с фазовыми примесями оксидов, глинистых и других минералов.

При нетепловом воздействии высоковольтных наносекундных электромагнитных импульсов возможным *механизмом электрического разрушения* (деструкции) тонких гидрофильных минеральных пленок на поверхности алмазов является процесс, подготавливающий образование проводящего канала электрического пробоя и собственно пробой диэлектрической пленки из-за протекания тока высокой плотности  $\sim 10^7$  А/см<sup>2</sup>. Данный процесс обусловлен интенсивной *инжекцией* носителей заряда (электронов) из металлических электродов генератора импульсов (и электронов, образующихся в межчастичных разрядах) в тонкую диэлектрическую пленку и массивную подложку в виде кристалла алмаза (минерала с низкой электрической проводимостью) в условиях воздействия электрических полей высокой напряженности ( $10^7 - 10^9$  В·м<sup>-1</sup>), захватом электронов глубокими ловушками и *образованием объемного заряда* в системе "алмаз-минеральное образование" (Закревский, Сударь, 2005).

С увеличением числа наносекундных импульсов (разрядов), повторяющихся с частотой следования  $f \cong 100$  Гц, происходило прорастание канала пробоя, образование новых каналов, что вызывало деструкцию и удаление вторичных минеральных фаз (пленок) с поверхности алмазных кристаллов.

В целом для породообразующих минералов кимберлита установлен эффект нелинейного изменения краевого угла смачивания в условиях импульсных энергетических воздействий (Рисунок 10).

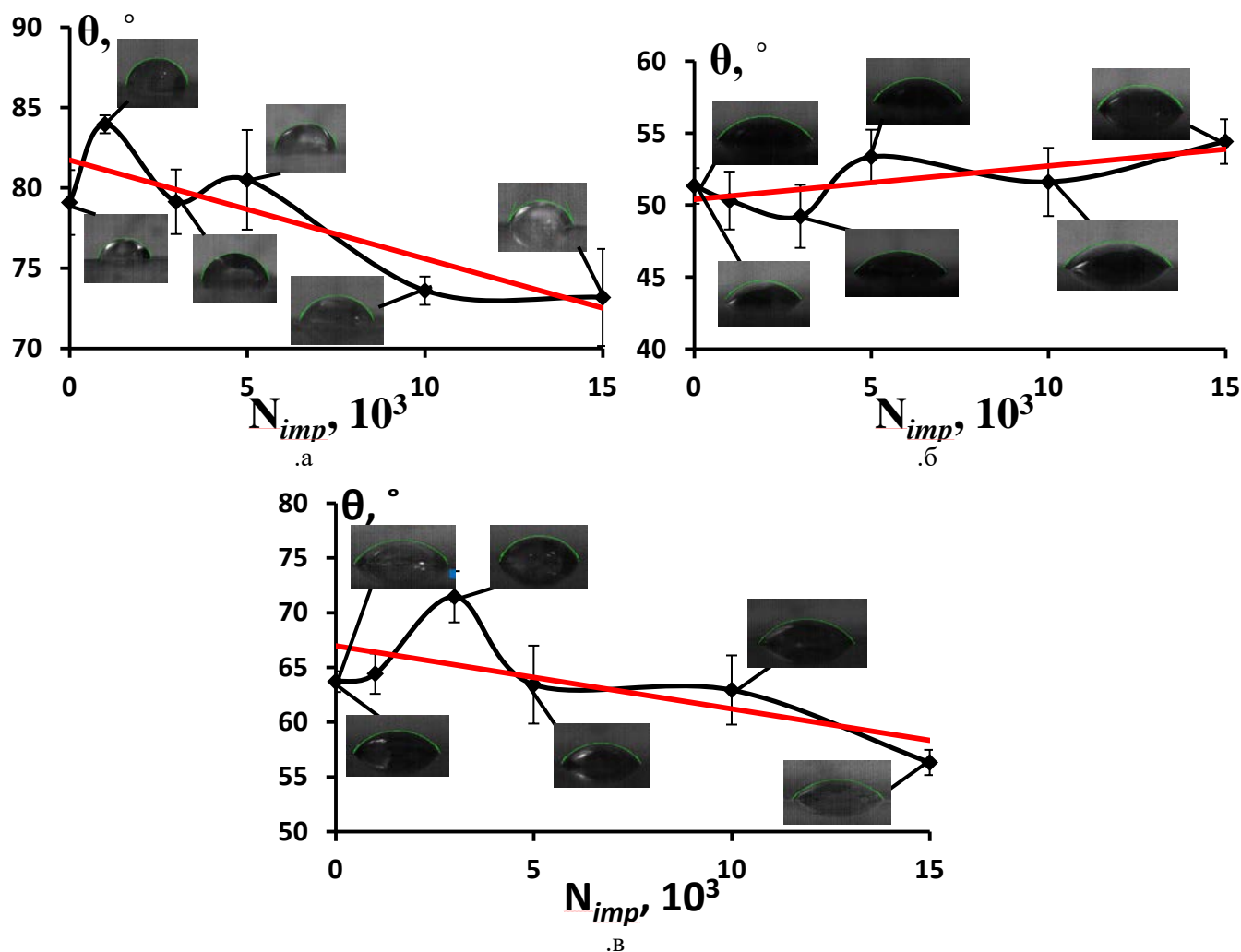


Рисунок 10 – Изменение краевого угла смачивания кальцита (а), серпентина (б) и оливина (в) в результате обработки МЭМИ ( $N_{\text{imp}}$  - число импульсов)

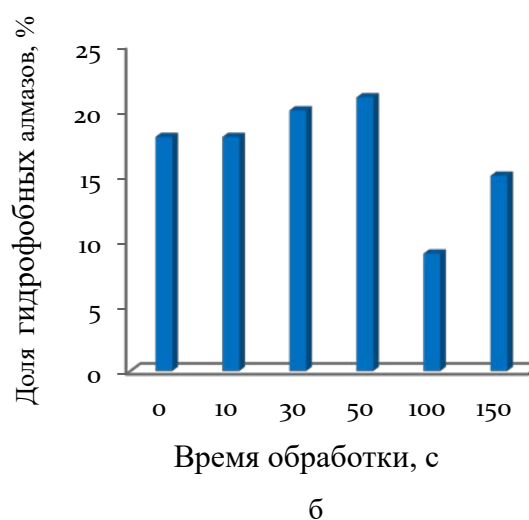
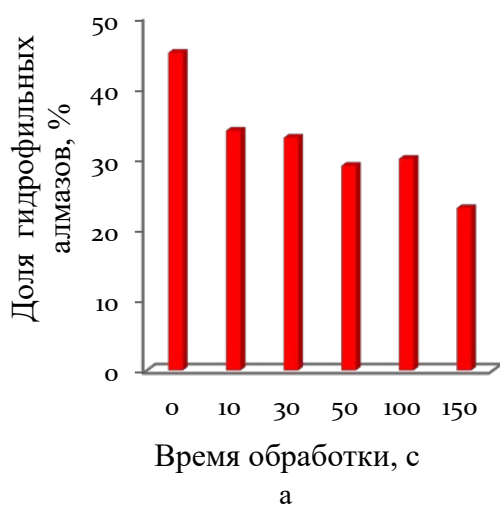
Для алмаза, кальцита и оливина при кратковременной импульсной обработке ( $t_{\text{treat}} = 10-30$  с) происходило незначительное увеличение гидрофобных свойств, что обусловлено изменениями, происходящими на поверхности минералов: для алмаза – очищением от примесных фаз, а для кальцита и оливина – процессами дегидроксилирования. При продолжительном импульсном воздействии ( $t_{\text{treat}}$  до 100–150 с) гидрофобные свойства алмаза, кальцита и оливина снижались за счет окисления и гидроксилирования их поверхности.

**Защищаемое положение 3 обосновывается в главе 4 и 5 диссертации.** Индуцированные электрическим полем структурно-химические преобразования поверхности алмазов вызывали следующие изменения гидрофильно-гидрофобного состояния и флотационных свойств алмазных кристаллов, свидетельствующие о возможности применения МЭМИ для повышения эффективности технологического процесса извлечения алмазов из руд:

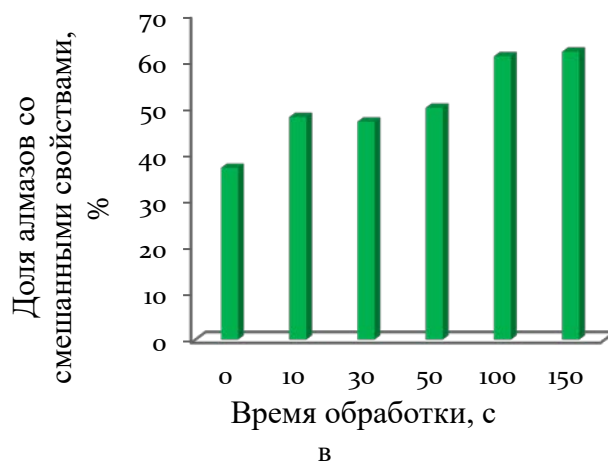
- снижение числа гидрофильных алмазов изучаемой коллекции на 22% (с 45% до 23%; минимум достигался при  $t_{\text{treat}} \sim 150$  с) и увеличение числа кристаллов со смешанными свойствами. Максимальное содержание гидрофобных алмазов получено в результате обработки МЭМИ в течение  $t_{\text{treat}} \cong 50$  с; при увеличении  $t_{\text{treat}}$  до 100–150 с число гидрофобных индивидов снижалось;

- повышение извлечения алмазов в процессе беспенной флотации с 47% (без обработки МЭМИ) до 61% (МЭМИ,  $t_{\text{treat}} \cong 150$  с), причем максимальное содержание гидрофобных флотируемых кристаллов достигалось при  $t_{\text{treat}} \cong 30$  с.

В результате экспериментов по оценке влияния МЭМИ на гидрофобно-гидрофильное состояние поверхности природных алмазов среди образцов в исходном состоянии выделены три условных типа кристаллов алмаза: с гидрофобной, гидрофильной поверхностью и алмазы со смешанными свойствами. В ходе обработки число гидрофильных алмазов снижалось (Рисунок 11, а), а число кристаллов со смешанными свойствами увеличивалось (Рисунок 11, в). Максимальное содержание гидрофобных алмазов достигалось при обработке в течение  $t_{\text{treat}} \sim 50$  с, а при увеличении времени воздействий число гидрофобных индивидов снижалось (Рисунок 11, б). Повышение гидрофобности алмазов в результате обработки МЭМИ, по-видимому, связано с отслоением и частичным разрушением минеральных плёнок на поверхности кристаллов, что свидетельствует о целесообразности применения высоковольтных наносекундных импульсов для эффективной деструкции и удаления поверхностных гидрофильных минеральных микро- и наночастиц на кристаллах алмазов и увеличения контрастности физико-химических и технологических свойств минералов кимберлитов. Длительное воздействие ( $t_{\text{treat}} \sim 100-150$  с) приводило к окислению поверхности чистых кристаллов (подтверждено методом РФЭС для синтетических алмазов), что вызывало снижение гидрофобных свойств алмазов и появление у них смешанных свойств.







В

Рисунок 11 – Зависимость распределения в коллекции гидрофильных (а), гидрофобных (б) и со смешанными свойствами (в) алмазов от продолжительности обработки МЭМИ

Оценку флотационных свойств природных алмазов до и после электромагнитной импульсной обработки проводили методом беспенной флотации в трубке Халлимонда. В результате выполненных экспериментов установлен эффект повышения флотируемости алмазов с увеличением времени (дозы) электроимпульсного воздействия (Рисунок 12). В целом содержание флотируемых кристаллов повысилось на 14% (с 47% до 61%). В области малых «доз» электромагнитного излучения ( $t_{treat} \leq 30$  с) происходило значительное увеличение флотационной активности алмазов (Рисунок 12). Максимальное содержание гидрофобных флотируемых алмазов достигалось в результате предварительной импульсной обработки кристаллов в течение  $t_{treat} \sim 30$  с. Содержание гидрофильных нефлотируемых алмазов существенно уменьшалось после обработки МЭМИ в течение  $t_{treat} \sim 10-30$  с, что свидетельствует о целесообразности применения режимов кратковременных импульсных энергетических воздействий для направленного изменения структурно-химического состояния поверхности, физико-химических и флотационных свойств кристаллов алмазов.

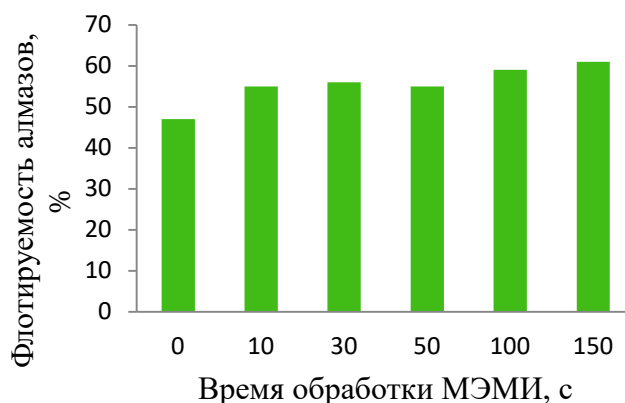


Рисунок 12 – Влияние воздействия МЭМИ ( $t_{treat}$ ) на флотационные свойства кристаллов алмазов

Для оценки возможности применения способа обработки кимберлитовых руд МЭМИ в непрерывном режиме в условиях технологического процесса обогащения алмазосодержащего минерального сырья, были проанализированы такие факторы, как **минимальный и максимальный размер** обрабатываемых минеральных частиц и относительная **влажность** пульпы.

Как было установлено ранее (Бунина, 2009) размер обрабатываемой МЭМИ минеральной частицы не должен меньше  $\sim 100$  мкм, что определяется условиями формирования зоны повреждений (трещиноватости) вокруг канала электрического пробоя в частице для повышения эффективности процесса дезинтеграции (раскрытия) минеральных сростков при последующем измельчении. Максимальный размер минеральных частиц составляет 2–3 мм (максимально 5 мм), что обусловлено необходимостью формирования слоя руды заданной толщины для обеспечения равномерности

воздействия МЭМИ на минералы руды в условиях непрерывной подачи геоматериала в зону электроимпульсной обработки. В то же время повышенное содержание жидкости в обрабатываемом материале приводит к энергетическим потерям вследствие поглощения электромагнитного излучения миллиметрового диапазона молекулами воды. Поэтому, для использования способа обработки МЭМИ геоматериалов с большим содержанием влаги (минеральных суспензий) должны быть проведены предварительные операции по обезвоживанию минерального сырья. Также важно отметить необходимость применения защитного экранирования зоны размещения генератора высоковольтных импульсов.

**Несмотря** на указанные ограничения, нетепловое воздействие наносекундных МЭМИ позволяет направленным образом модифицировать физико-химические и технологические свойства породообразующих минералов кимберлита и алмазов при непрерывном режиме обработки геоматериалов и минимальных энергозатратах (1,7 кВт·ч на 1 т руды).

Принципиальная схема обогащения и доводки руды трубки «Интернациональная» на ОФ№3 МГОКа АК «АЛРОСА» (Рисунок 13) представляет собой классическую «замкнутую» схему, применяемую в России для обогащения алмазоносных кимберлитов. Следует отметить, что в условиях «замкнутой» схемы хвосты обогащения различных стадий возвращают в начало процесса обогащения на доизмельчение и последующую переработку (циркуляция).

В результате анализа особенностей технологической схемы обогащения кимберлитовой руды, преимуществ и ограничений способа обработки геоматериалов МЭМИ можно сделать вывод о возможности и эффективности применения данного вида импульсного энергетического воздействия для переработки (обработки) хвостов обогатительных операций, направленных на доизмельчение (циркуляция), относящихся к классу крупности руды менее 5 мм. Проведенные исследования изменения физико-химических, структурных и технологических свойств свидетельствует о целесообразности применения режимов кратковременных импульсных энергетических воздействий для направленного изменения структурно-химического состояния поверхности, механических и флотационных свойств кристаллов алмазов и породообразующих минералов кимберлитов. В этом случае следует ожидать реализации за счет предварительной электромагнитной импульсной обработки руды следующих положительных эффектов:

1 - интенсификация процесса дезинтеграции кимберлитовой породы перед операцией доизмельчения хвостов (циркуляции), повышение селективности раскрытия минеральных сростков и сохранности алмазов в мельницах самоизмельчения;

2 - направленная модификация структурно-химических и технологических свойств гидрофильных, покрытых минеральными пленками, алмазов для повышения эффективности извлечения ценных кристаллов из хвостов обогащения (циркуляции), а также контрастное изменение физико-химических и механических свойств минералов породы (кальцита, оливина, серпентина).

Для реализации эффекта направленного изменения флотационных свойств алмазов и породообразующих минералов кимберлитов (2) рационально применение метода МЭМИ для обработки концентратов перед операциями липкостной сепарации и флотации.

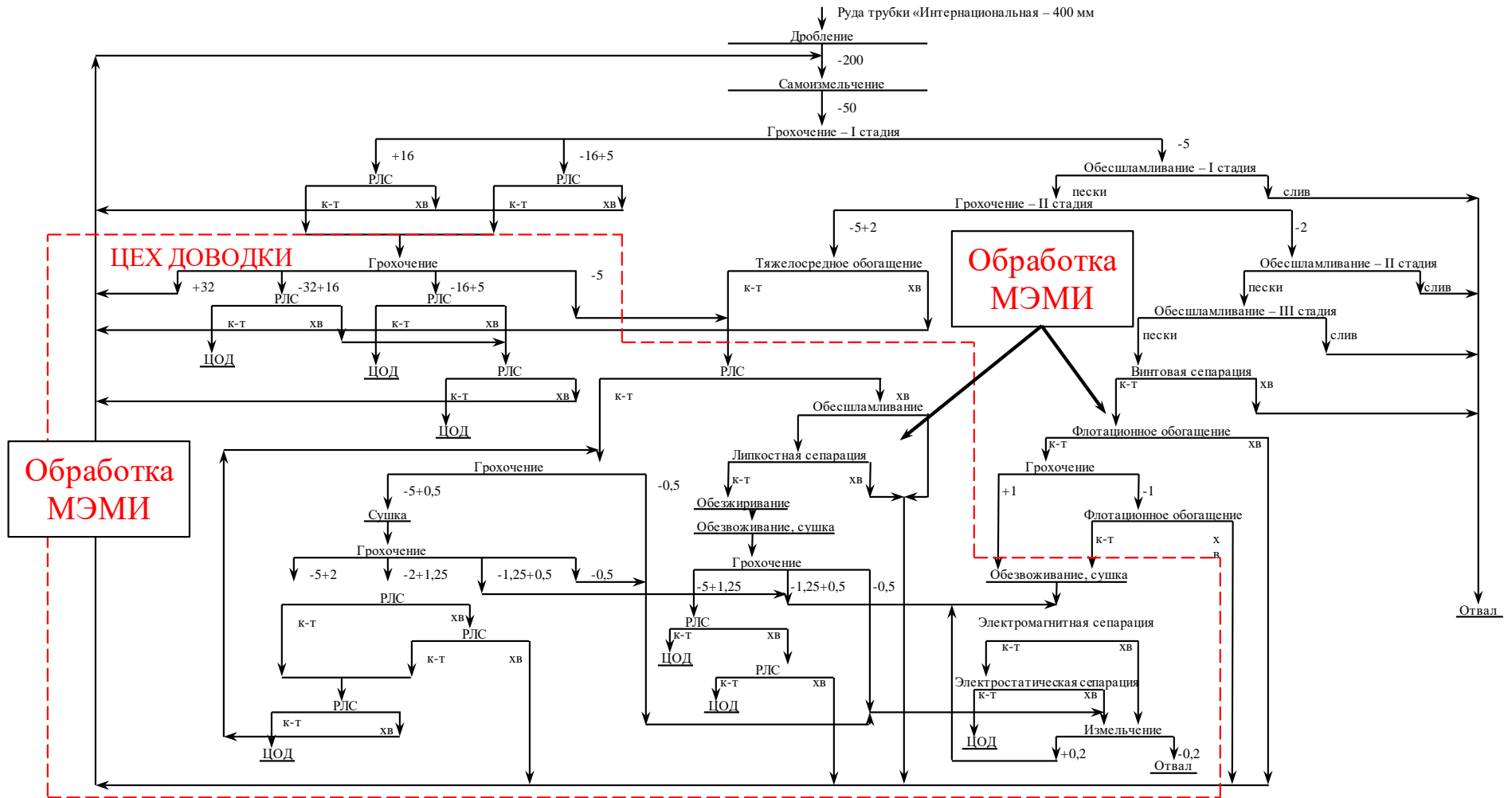


Рисунок 13 –Принципиальная схема обогащения и доводки руды трубки «Интернациональная» на ОФ№3 МГОКа АК «АЛРОСА» (Отчет независимых экспертов о запасах и ресурсах алмаза групп компаний «Алроса», 2013) и предполагаемая область применения МЭМИ в технологическом процессе

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В диссертации на основании выполненных автором экспериментальных исследований решена актуальная научная задача обоснования механизма изменения структурно-химических, механических, физико-химических и технологических свойств алмазов и породообразующих минералов кимберлитов при нетепловом воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения, что позволило установить рациональные режимы электромагнитной импульсной обработки геоматериалов, обеспечить повышение эффективности разупрочнения породообразующих минералов, сохранности кристаллов алмазов в процессах измельчения и технологического процесса извлечения алмазов из руд, имеющих важное значение при обогащении алмазосодержащих кимберлитов.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. В результате комплексных исследований состава, структуры и свойств минералов алмазосодержащих кимберлитов с использованием современных физико-химических методов анализа вскрыты механизмы разупрочнения (дезинтеграции), образования дефектов в кристаллах, структурных преобразований поверхности и модификации структурно-чувствительных (оптико-спектроскопических, донорно-акцепторных, электрических, физико-химических, механических и технологических) свойств алмазов и породообразующих минералов кимберлитов (оливина, серпентина и кальцита) в условиях нетеплового воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения (МЭМИ).

2. Экспериментально установлены (РЭМ–РСМА, РФЭС, адсорбционно-фотометрический анализ, электрофоретическое рассеяние света, микротвердометрия) закономерности изменения физико-химических свойств породообразующих минералов кимберлита и основные стадии процесса структурно-химических преобразований поверхности оливина, серпентина и кальцита при воздействии МЭМИ:

(1) начальная стадия ( $t_{\text{treat}} \cong 10-30$  с) – разупорядочение структуры поверхности породообразующих минералов (*серпентина*) вследствие проявления эффекта межслоевой или структурной высоковольтной поляризации природных минералов-диэлектриков и воздействия на минеральную поверхность активных продуктов излучения плазмы искрового разряда ( $O_3$  и  $H_2O_2$ ); образование незавершенных электрических пробоев в местах скопления металлсодержащих фаз на поверхности *серпентина* и *оливина*. Электроимпульсная обработка ( $t_{\text{treat}} \leq 30$  с) породообразующих минералов вызывала контрастное (разнонаправленное) изменение электрических свойств минеральных частиц, а именно, – снижение абсолютного значения электрокинетического потенциала оливина и серпентина и рост дзета-потенциала кальцита. Дегидроксилирование поверхности *кальцита* и *оливина*, вызывающее увеличение гидрофобности минералов и незначительное снижение гидрофобных свойств поверхности *серпентина*; образование трещин транскристаллитного и интеркристаллитного характера на поверхности *кальцита*, а также микроструктурных фрагментов (микровыколов);

(2) стадия интенсивной электроимпульсной обработки при  $t_{\text{treat}} > 30$  с – расслоение (деструкция) поверхностного слоя *серпентина*, образование структурных дефектов, что вызывало повышение гидрофобности поверхности и электрокинетического потенциала минерала; гидроксилирование поверхности *оливина* и *кальцита*, обуславливающее снижение гидрофобности поверхности и дзета-потенциала минералов. Максимальное относительное изменение (уменьшение) микротвердости ( $\Delta HV$ ) породообразующих минералов в результате нетеплового воздействия МЭМИ составило для оливина 62%, кальцита – 66%, серпентина – 42%, связующей массы кимберлитовой породы - 44%.

3. Вскрыт и экспериментально обоснован (ИКФС, РЭМ–РСМА) механизм электрического разрушения гидрофильных пленок вторичных минеральных фаз (оксидов и гидроксидов железа, сульфата кальция, примазок глинистых минералов) на поверхности алмазов, которые при воздействии МЭМИ – вследствие инжекции носителей заряда (электронов) в диэлектрическую пленку, образования объемного заряда в системе "алмаз–минеральное образование", формирования и распространения микроканалов электрического пробоя – претерпевали частичное разрушение и удалялись с поверхности алмазов, что приводило к изменению гидрофильно-гидрофобного состояния кристаллов, а именно – снижению числа гидрофильных алмазов изучаемой коллекции на 22% (с 45% до 23%; минимум достигался при  $t_{\text{treat}} \sim 150$  с) и увеличение числа кристаллов со смешанными свойствами и гидрофобных алмазов на 16 % (с 55% до 71%) при  $t_{\text{treat}} \leq 50$  с.

4. С использованием методов РФЭС и адсорбции кислотно-основных индикаторов установлено, что в результате воздействия МЭМИ происходило усиление донорной способности (основности) поверхности синтетических алмазов (АС-120) при кратковременной электроимпульсной обработке ( $t_{\text{treat}} \leq 10$  с), а также гидроксилирование при  $t_{\text{treat}} \geq 30$  с и гидрирование ( $t_{\text{treat}} \geq 50$  с) поверхности, что сопровождалось ростом дзета-потенциала в области отрицательных значений, а при увеличении  $t_{\text{treat}}$  до 100–150 с – усиление акцепторной способности поверхности алмазов.

5. Для алмазов из группы среднеазотных кристаллов с высокой концентрацией азота в агрегированной форме  $N_{\text{B}} \sim 35\text{--}65\%$  впервые установлен (ИКФС) эффект последовательного повышения концентрации дефектов типа *B2* (плейтлетс) с увеличением дозы электромагнитного излучения, что происходило без глубокой структурной перестройки и повреждения структуры кристаллов алмаза (концентрация и распределение азотных центров в кристаллах не изменялись).

Таким образом, экспериментально показано, что воздействие МЭМИ вызывает разупрочнение поверхностного слоя и уменьшение микротвердости порообразующих минералов в целом на 40–66%, а также образование дополнительных *B2*-дефектов в кристаллах алмаза, которые вследствие дисперсионного упрочнения кристалла, предположительно, будут способствовать повышению прочностных свойств алмазов.

6. Для мономинеральной флотации природных технических алмазов установлен и экспериментально обоснован рациональный режим предварительной электромагнитной импульсной обработки кристаллов ( $t_{\text{treat}} \leq 30$  с,  $N_{\text{imp}} \leq 10^3$ ), при котором существенно (на ~9%) повышалась флотированность алмазов (с 47% до 56%), а число нефлотированных кристаллов снижалось с 53 % до 44 %. При увеличении продолжительности импульсных энергетических воздействий ( $t_{\text{treat}} \cong 50\text{--}150$  с;  $N_{\text{imp}} \cong 1,5 \times 10^4$ ) флотированность алмазов последовательно повышалась до 61%.

7. Экспериментально обоснована эффективность нетеплового воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения на природные минералы-диэлектрики, и даны рекомендации по практическому применению способа обработки геоматериалов МЭМИ в технологическом процессе обогащения алмазосодержащих кимберлитов, а именно – для переработки хвостов обогатительных операций, направленных на доизмельчение (циркуляция), относящихся к классу крупности руды менее 5 мм, а также концентратов перед операциями липкостной сепарации и флотации.

Полученные результаты показали принципиальную возможность использования импульсных энергетических воздействий (МЭМИ) для повышения эффективности разупрочнения порообразующих минералов кимберлитов, обеспечения сохранности кристаллов алмазов при измельчении кимберлитовой породы в мельницах самоизмельчения, направленного изменения физико-химических и технологических свойств природных минералов-диэлектриков и совершенствования технологического процесса извлечения алмазов из руд.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах автора:  
Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:**

1. Анашкина Н.Е., Хачатрян Г.К. Применение метода ИК-фурье-спектроскопии для оценки технологических свойств и качества алмазного сырья // Руды и металлы. – 2015. – № 3. – С. 70-77.
2. Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В. Экспериментальное обоснование механизма импульсных энергетических воздействий на структурно-химические свойства и микротвердость порообразующих минералов кимберлитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 4. – С. 130-142.
3. Чантурия В.А., Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Хачатрян Г.К. Изменение состава функционального покрова природных и синтетических алмазов при воздействии высоковольтных наносекундных импульсов // Руды и металлы. – 2016. – № 4. – С. 98-110.
4. Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. Влияние импульсных энергетических воздействий на физико-химические, структурные и технологические свойства алмазов и порообразующих минералов кимберлита // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 2. – С. 118-129
5. Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Рязанцева Н.Е. Воздействие высоковольтных наносекундных импульсов на структуру поверхности, микротвердость и электрические свойства природных минералов-диэлектриков // Вестник Тамбовского государственного университета (ТГУ). Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – Вып. 3. – Физика. – С. 865-868
6. Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Рязанцева М.В., Анашкина Н.Е., Копорулина Е.В. Изменение функционально-химического состава поверхности и микротвердости минералов кимберлитов при воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения // Известия РАН. Серия. «Физическая». – 2016. – Т. 80. – № 6. – С. 712-717.
7. Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В., Копорулина Е.В., Хачатрян Г.К. Изменение функционально-химического состава поверхности и структурных дефектов кристаллов алмазов при нетепловом воздействии высоковольтных наносекундных импульсов // Известия РАН. Серия. Физическая. – 2017. – Т. 81. – № 3. – С. 397-401.

**Статьи и тезисы докладов:**

8. Анашкина Н.Е., Хачатрян Г.К. Типоморфные особенности алмазов из россыпей Нижне-Ленского района (участки Булкур, Усат-Хая и Ольховый) // Материалы международного совещания «Плаксинские чтения – 2014», Алматы, Республика Казахстан, 16-19 сентября 2014 г.
9. Анашкина Н.Е. Влияние примесного состава алмазов на их физические свойства (на примере алмазов из россыпей Нижне-Ленского района) // Материалы XI Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – Москва, ИПКОН РАН, 24-28 ноября 2014.
10. Анашкина Н.Е. Зависимость физических свойств алмазов из россыпей нижне-ленского района от дефектности их структуры // Материалы Четвертой Российской молодежной Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, ИГЕМ РАН, 2014, - 50-51 с.
11. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Хабарова И.А., Анашкина Н.Е. Влияние импульсных энергетических воздействий на фазовый состав, химическое состояние атомов поверхности, сорбционные и флотационные свойства галенита и кальцита // Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2014), 15-16 апреля 2014. – М.: ОНТИ ГЕОХИ РАН. – С. 12-13.
12. Бунин И.Ж., Копорулина Е.В., Рязанцева М.В., Хабарова И.А., Анашкина Н.Е. АСМ-изучение морфологии и свойств поверхности кальцита, измененных высоковольтными наносекундными импульсами // Материалы XIII международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики – 2014). – 2-6 июня 2014 г. / ред. кол.: Гороховатский Ю. А. (отв. ред.) и др. – Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им.А.И. Герцена, 2014. – Т. 2. – С. 251-252.
13. Бунин И.Ж., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В. Экспериментальное изучение влияния наносекундных импульсов высокого напряжения на структуру поверхности и микротвердость порообразующих минералов кимберлитов // Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2015), 21-22 апреля 2015. – М.: ОНТИ ГЕОХИ РАН. – С. 16-17.

14. Бунин И.Ж., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В. Экспериментальное изучение влияния наносекундных импульсов высокого напряжения на структуру поверхности и микротвердость порообразующих минералов кимберлитов // Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ - 2015). Москва, 21–22 апреля 2015 г. / Отв. редактор А.А.Кадик. – М.: ГЕОХИ РАН. – 2015. – С. 352-356.
15. Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Копорулина Е.В., Рязанцева М.В. Изучение механизма импульсных энергетических воздействий на порообразующие минералы кимберлитов (РЭМ-РСМА, РФЭС и ИКФС) // Тезисы докладов XIX Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РЭМ–2015), Черногловка, 1-4 июня 2015 г. – М. – Черногловка: ИПТМ РАН. – 2015. – Ч. 5. – С. 422-423.
16. Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Анашкина Н.Е., Копорулина Е.В., Рязанцева М.В. Влияние наносекундных импульсов высокого напряжения на структурно-химические свойства и микротвердость порообразующих минералов кимберлитов // 18-й Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-18): Труды симпозиума, г. Ростов-на-Дону – пос. Южный, 10-15 сентября 2015. – Ростов н/Д: Изд-во Фонд науки и образования, 2015. – Вып. 18. – Т. 1. – С. 46-49.
17. Анашкина Н.Е. Влияние импульсных энергетических воздействий на микротвердость и физико-химические свойства и минералов кимберлита (серпентина, оливина, кальцита) // Материалы Пятой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, ИГЕМ РАН, 2015. - 24-26 с.
18. Анашкина Н.Е. Направленное изменение структурно-химических свойств и микротвердости порообразующих минералов кимберлитов при нетепловом воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения // Материалы XIII Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – Москва, ИПКОН РАН, - 2015.
19. Анашкина Н.Е. Оценка технологических свойств и качества алмазного сырья из россыпей Нижне-Ленского района (Якутия) методом ик-спектроскопии // Сборник материалов X Конгресса обогатителей стран СНГ 2015. - Москва: МИСиС, 2015. - 60-63 с.
20. Анашкина Н.Е. Направленное изменение структурно-химических и технологических свойств алмаза под влиянием высоковольтных наносекундных импульсов // Материалы XIII Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – Москва, ИПКОН РАН, - 2016.
21. Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. Влияние импульсных энергетических воздействий на структурно-химические свойства и микротвердость порообразующих минералов кимберлитов // Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения – 2015): Материалы международного совещания, Иркутск, 21-25 сентября 2015 г. – Иркутск: Изд-во ООО «Полиграфический центр «РИЭЛ», 2015. – С. 318-321.
22. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Анашкина Н.Е., Хабарова И.А. Модификация структуры и флотационных свойств геоматериалов с помощью высоковольтных наносекундных импульсов // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ – IRS-2015): Материалы XI-ой международной конференции, Минск, Беларусь, 23-25 сентября 2015 г. – Минск: Издательский центр БГУ, 2015. – Секция. 3: Модификация свойств материалов. – С. 190-192.
23. Бунин И.Ж., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В. Влияние наносекундных электромагнитных импульсов на структуру поверхности и микротвердость порообразующих минералов кимберлитов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (DFMN-2015): Сборник материалов VI-ой международной конференции, Москва, ИМЕТ РАН, 10-13 ноября 2015. – М.: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 705-706.
24. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Анашкина Н.Е., Миненко В.Г., Рязанцева М.В., Самусев А.Л., Копорулина Е.В. Экспериментальное обоснование энергетических воздействий на структурно-химические свойства и микротвердость порообразующих минералов кимберлитов // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии в науке о Земле», 13-22 сентября 2015, г. Новый Афон, Абхазия. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2015. – С. 111-119.
25. Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. Влияние высоковольтных наносекундных импульсов на состав, структуру, электрокинетический потенциал и гидрофобность поверхности алмазов // Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по

экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2016), 19-20 апреля 2016. – М.: ОНТИ ГЕОХИ РАН. – С. ВЕСЭМПГ-2016. –6 с.

26. Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Копорулина Е.В., Рязанцева М.В. Влияние импульсных энергетических воздействий на морфологию и структурно-химические свойства поверхности алмазов (РЭМ-РСМА, АСМ, РФЭС) // Тезисы докладов XXVI Российской конференции по электронной микроскопии и 4-я Школа молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов». – В рамках Международного форума «Техноюнити – РКЭМ-2016», г. Москва – Зеленоград, 30 мая – 3 июня 2016 г. – Зеленоград: ИПТМ РАН, 2016. – Т. 2. – С. 590-591.

27. Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В., Хачатрян Г.К. Применение импульсных энергетических воздействий для направленного изменения фазового состава и поверхности, электрических свойств и гидрофобности алмазов // 19-й Международный симпозиум "Упорядочение в минералах и сплавах" (ОМА-19), Ростов-на-Дону – пос. Южный (п. "Южный"), 10-15 сентября 2016 г. – Труды симпозиума. – Ростов-на-Дону, Фонд науки и образования. – 2016. – Выпуск 19. – Том 1. – С. 33-36.

28. Анашкина Н.Е., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. Влияние высоковольтных наносекундных импульсов на структурно-химические и технологические свойства алмазов // Материалы международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2016) / науч. ред. акад. РАН В.А. Чантурия; сост. к.т.н., доц. Т.В.Чекушина, 26-30 сентября 2016 г. – М.: АО «Издательский дом «Руда и Металлы». – 2016. – С. 211-214.

29. Bunin I.Zh., Chanturiya V.A., Anashkina N.E., Ryazantseva M.V., Koporulina E.V. Non-Thermal Effect of High-Voltage Nanosecond Pulses on Kimberlite Rock-Forming Minerals Processing // "Advanced Materials – Techniques, Physics, Mechanics and Applications". Springer Proceedings in Physics, Ivan A. Parinov, Shun-Hsyung Chang, Muaffaq A. Jani (Eds.). – Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. – 2017. – PP. 37-53.

30. Бунин И.Ж., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В. Экспериментальное изучение влияния высоковольтных наносекундных импульсов на структуру поверхности и микротвердость природных минералов-диэлектриков // «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» – Сборник тезисов XIV Международной школы-семинара (ЭДС-2016), 12-15 сентября 2016 г. – Барнаул: Изд-во ООО «НИЦ «Системы управления», 2016. – С. 129-133.

31. Бунин И.Ж., Анашкина Н.Е., Рязанцева М.В., Хачатрян Г.К. Модификация структурно-химических и технологических свойств алмазов при воздействии высоковольтных наносекундных импульсов // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ – IRS-2017): Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 12-й Международной конференции, Минск, Беларусь, 19–22 сентября 2017 г. / редкол.: В.В. Углов (отв.ред.). – Минск: Изд. центр БГУ, 2017. Секция 3: Модификация свойств материалов. – С. 205-207.

32. Bunin I.Zh., Chanturiya V.A., Anashkina N.E., Khachatryan G.K., Ryazantseva M.V., Koporulina E.V. Influence of Nanosecond Electromagnetic Pulses on the Structural Characteristics, Physico-Chemical and Technological Properties of Diamonds // Advanced Materials – Proceedings of the International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications", Springer Proceedings in Physics, Series Volume 207. – Ivan A. Parinov, Shun-Hsyung Chang, Vijay K. Gupta (Eds.). – Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing. – 2018. – PP. 87-100.

33. Анашкина Н.Е. Влияние мощных электромагнитных импульсов на структурные, физико-химические и технологические свойства алмазов и порообразующих минералов кимберлита // Сборник статей конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли». – Москва, 2017. – 437-443 с.

34. Анашкина Н.Е. Изменение структурно-химических и электрических свойств поверхности алмазов при воздействии высоковольтных наносекундных импульсов //Сборник трудов XIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Москва. 17-20 октября 2017 г. – М:ИМЕТ РАН, - 432 - 434 с.

35. Anashkina N.E., Bunin I.Zh., Khachatryan G.K. Influence of Energy Pulse Impacts on Physico-Chemical, Structural and Technological Properties of Diamond and Kimberlite Rock-Forming Minerals // Proceedings of XXIX International Mineral Processing Congress (IMPC 2018), Moscow, Russia; Edited by: International Agency of Congress Management (MAKO LLC). – Moscow: "Ore and Metals" Publishing house, 2018. – PP. 183-192.