

На правах рукописи

КАПЛИН Алексей Иванович

УДК 622.73

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА МОКРОГО
САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОДНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте проблем комплексного освоения недр РАН
(УРАН ИПКОН РАН).

Лаборатория теории разделения минеральных компонентов отдела проблем
комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и
техногенного сырья

Научный руководитель – академик, профессор,
доктор технических наук
Чантурия Валентин Алексеевич

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук
Авдохин Виктор Михайлович

кандидат химических наук
Чихладзе Владимир Вахтангович

Ведущая организация – «Центральный научно-исследовательский
геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГУП
«ЦНИГРИ»)

Защита состоится «26» октября 2010 г. в 14 час. 00 мин на заседании
диссертационного совета № Д 002.074.01 при Институте проблем комплексного
освоения недр Российской академии наук 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 УРАН ИПКОН РАН.

Автореферат разослан « 09 » сентября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Папичев В.И.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Добыча алмазов в РФ составляет примерно 25 % от мировой по стоимости продукции. Основной доход от алмазно-бриллиантового комплекса поступает в бюджет государства от продажи природных алмазов. Добыча и обогащение алмазосодержащих кимберлитов осуществляется на горно-обогатительных предприятиях акционерной компании «АЛРОСА», являющейся одним из мировых лидеров в области разведки, добычи и реализации алмазов и входящей в число десяти наиболее эффективных предприятий России.

Добыча и переработка алмазосодержащих кимберлитов имеет ряд особенностей в сравнении с другими полезными ископаемыми, связанных с повышенной хрупкостью алмазов при воздействии ударных нагрузок, высокой стоимостью и низким их содержанием в рудной массе, наличием кристаллов различной крупности в сырье, что определяет приоритет вопроса сохранности алмазов при их извлечении из руд.

При существующей технологии переработки алмазосодержащих руд из коренных месторождений АК «АЛРОСА» повреждаемость ценных кристаллов составляет от 25 до 75%, что приводит к средней потере их массы до 12%. Основным источником повреждения алмазов является процесс измельчения кимберлитов, приводящий к нарушению целостности кристаллов по количеству до 29%. Кроме того, использование в данном процессе высокоминерализованных оборотных вод, а также дополнительное растворение компонентов рудной массы приводит к формированию гидрофильных пленок на поверхности кристаллов и, как следствие, изменению их технологических свойств.

Вследствие вышеизложенного основная задача работы состояла в научном обосновании и разработке эффективного метода, обеспечивающего повышение эффективности раскрытия кимберлитсодержащих пород и сохранность алмазов в процессе самоизмельчения руды.

Повышение сохранности алмазных кристаллов и технологических показателей при их извлечении можно достичь как за счет сокращения времени пребывания рудной массы в мельницах мокрого самоизмельчения (ММС), так и за счет энергосберегающих технологий и создания условий, ограничивающих растворение рудных компонентов.

На основе анализа литературных данных и результатов исследований, выполненных в УРАН ИПКОН РАН, была установлена возможность интенсификации процесса измельчения руд за счет использования электрохимически обработанных (ЭХО) вод. Применение электрохимической технологии при низких капитальных и энергетических затратах позволяет без использования химических реагентов направленно изменять окислительно-восстановительные свойства, ионный и газовый составы водных систем.

Большой вклад в развитие теории и практики использования электрохимической технологии в процессах дезинтеграции и обогащения минерального сырья внесли такие ученые как: И.Н. Плаксин, Р.Ш. Шафеев, В.А. Чантурия, Г.Д. Краснов, В.Д. Лунин, В.И. Богачев, Э.А. Трофимова, Г.П. Двойченкова, В.Е. Вигдергауз, Г.М. Дмитриева, Т.В. Чекушина, другие российские и зарубежные исследователи.

Цель работы. Научное обоснование, разработка и промышленная апробация электрохимической технологии водоподготовки в процессе мокрого самоизмельчения кимберлитов, обеспечивающей его интенсификацию, повышение извлечения и вероятности сохранности алмазных кристаллов.

Идея работы. Применение электрохимически обработанных водных систем в процессе мокрого самоизмельчения кимберлитов для обеспечения разупрочнения минеральных комплексов за счет формирования оптимального ионного состава жидкой фазы, структурных свойств воды и возможности повышения сохранности алмазов вследствие сорбции тонкодисперсных газовых пузырьков электролиза на гидрофобной поверхности алмазов.

Методы исследований: ионная хроматография (хроматограф Methrom); титриметрический метод; потенциометрический метод (АНИОН 4100, Аквилон); рентгеновская дифрактометрия (ДРОН-2.0, XRD 7000 «SHIMADZU»); оптическая микроскопия (ОМ, Olympus BX51); кондуктометрический метод (Radelkis); метод определения микротвердости (ПМТ-3М); метод диодно-лазерной спектроскопии (Акваспек); методы математической статистики для обработки результатов исследований.

Технологические исследования проводились на природных кимберлитах трубок «Интернациональная», «Юбилейная» и «Заполярная» на стендовых установках в лабораториях УРАН ИПКОН РАН и МПТИ(ф)ЯГУ. Промышленные испытания разработанной технологии проведены в схеме рудоподготовки на обогатительной фабрике №3 Мирнинского ГОКа.

Научная новизна работы состоит в обосновании механизма разупрочнения кимберлитсодержащих пород и возможности повышения сохранности кристаллов алмазов при использовании продуктов электрохимической обработки вод в процессе самоизмельчения за счет увеличения влагоемкости кимберлита и снижения его прочности на 20% и сорбции газов электролиза на поверхности алмазов.

На основе полученных новых научных данных разработаны оптимальные технологические режимы, аппараты и схемы применения электрохимически обработанных технологических вод в цикле мокрого самоизмельчения на Мирнинском ГОКе АК «АЛРОСА».

Практическая значимость работы. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана технология интенсификации процесса мокрого самоизмельчения кимберлитов с применением электрохимического кондиционирования водных систем, обоснована

технологическая схема промышленных испытаний, разработана конструкция аппарата и сделан выбор материала анода. Промышленные испытания подтвердили увеличение выхода продуктивного класса $-5 +0,5$ мм в сливе мельницы на $3 \div 7$ %.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в работе, подтверждена использованием современных физико-химических методов исследований, непротиворечивостью полученных результатов и выводов, удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных исследований с использованием математической статистики при доверительной вероятности не менее 95%.

Личный вклад автора заключается в анализе научно-технической литературы по вопросам дезинтеграции и подготовки алмазосодержащего сырья к обогащению, проведении исследований по изучению свойств продуктов электролиза водных систем, влагоемкости, микротвердости и измельчаемости кимберлитов при их взаимодействии с различными водными системами; разработке технологии интенсификации процесса мокрого самоизмельчения кимберлитов и применении электрохимически обработанных вод; участии в промышленных испытаниях электрохимической технологии в процессе мокрого самоизмельчения кимберлитов; анализе и обобщении полученных результатов.

Основные защищаемые положения

1. Механизм интенсификации процесса самоизмельчения кимберлитов и возможность повышения сохранности алмазов при использовании электрохимически обработанных вод заключается в увеличении влагоемкости кимберлитов, уменьшении их прочности и сорбции электролизных газов на гидрофобной поверхности алмазов.

2. Продукты электролиза оборотных вод снижают микротвердость связующей массы кимберлитов, состоящей в основном из кальцита, серпентина и пироаурита, на 20,4%, что позволяет сократить время высвобождения алмазов из породы в процессе измельчения.

3. Электрохимическая обработка воды в режиме – плотность тока $I_s = 100 \div 250$ А/м², продолжительность электролиза 30 сек с нерастворимыми анодами обеспечивает в процессе мокрого самоизмельчения разупрочнение кимберлитов и, как следствие, прирост продуктивного класса $-5 +0,5$ мм на $3 \div 7$ %.

4. Разработанная технология интенсификации процесса мокрого самоизмельчения алмазосодержащих кимберлитов на основе использования электрохимического кондиционирования минерализованных технических вод, обеспечивает увеличение выхода продуктивного класса $-5 +0,5$ мм на 3,4% и

повышает извлечение алмазов в процессах липкостной и пенной сепарации на 0,6 и 22,6% соответственно.

Реализация результатов работы. Разработана и апробирована в промышленном масштабе электрохимическая технология водоподготовки в процессе мокрого самоизмельчения, в результате чего установлено увеличение выхода продуктивного класса -5 +0,5 мм на 3,4% и, как следствие, повышение извлечения алмазов в процессах пенной и липкостной сепараций на 22,6% и 0,6%, соответственно.

На основании результатов промышленных испытаний электрохимическая технология водоподготовки рекомендована к использованию в цикле самоизмельчения алмазосодержащих руд на объектах АК «АЛРОСА».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на научных семинарах УРАН ИПКОН РАН, Международных совещаниях Плаксинские чтения (Иркутск, 2004 г. и Санкт-Петербург, 2005 г), V конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва: МИСиС, 2005 г), научно-практической конференции, посвященной 50-летию алмазодобывающей промышленности и г. Мирный (Мирный: МПТИ(ф)ЯГУ, 2005 г), IV международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва: ИПКОН РАН, 2007 г), научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва: МГГУ, 2007, 2010 гг).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, из них: в рекомендованных ВАК РФ изданиях – 3, в прочих изданиях – 5.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка использованных источников из 103 наименований, 1 приложения; содержит 107 страниц машинописного текста, 37 рисунков и 22 таблицы.

Автор выражает глубокую признательность академику, докт.техн.наук, проф. В.А. Чантурия за научное руководство при выполнении работы.

Автор также выражает благодарность сотрудникам УРАН ИПКОН РАН: Двойченковой Г.П., Миненко В.Г., Богачеву В.И., Трофимовой Э.А., Бунину И.Ж., Мозольковой Е.А., Матвеевой Т.Н., Подгаецкому А. В., Кудряшову В.В., а также коллективу лаборатории обогащения института «Якутнипроалмаз» за оказанную помощь при проведении исследований в условиях обогатительной фабрики №3 Мирнинского ГОКа.

Основное содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы исследований, сформулированы цель, идея и задачи работы, основные защищаемые положения, научная новизна, практическое значение диссертации, приведены сведения о материалах и методах исследований, апробации работы и публикациях автора.

Анализ современного состояния рудоподготовки алмазосодержащих кимберлитов и методы ее интенсификации

При существующей на объектах АК «АЛРОСА» технологии переработки кимберлитов, включающей рудоподготовку с последовательным извлечением алмазов в процессах рентгенолюминесцентной сепарации, гравитационного обогащения, пенной и липкостной сепарации, повреждаемость ценных кристаллов составляет от 25,0 % до 75,0 %. На стадии добычи руд (комбайновая отбойка, взрыв) повреждаемость ~ 16%, а в процессе самоизмельчения кимберлитов – около 29% алмазов.

В мельницах мокрого самоизмельчения (ММС), в зависимости от режима их работы, куски руды, совершая круговые движения, свободно падая и взаимодействуя с другими фракциями материала, разрушают не только породу, но и алмазы. Кроме того, использование в данном процессе высокоминерализованных оборотных вод, а также дополнительное растворение компонентов рудной массы, приводит к формированию гидрофильных пленок на поверхности кристаллов и, как следствие, изменению их технологических свойств.

Высокая повреждаемость алмазов в ММС обусловлена следующими факторами:

- повышенной хрупкостью кристаллов и их низким содержанием в общей массе измельчаемых кимберлитов;
- наличием в питании «раскрытых» алмазов, что обусловлено недостаточным их извлечением в пределах обогащения и высокой циркуляционной нагрузкой в мельницах мокрого самоизмельчения – до 140%;
- несовершенством конструкции ММС и не оптимальными параметрами их работы.

Однако выбор ММС в качестве оборудования для разрушения кимберлитов, взамен шаровых, был обусловлен необходимостью повышения сохранности ценных кристаллов алмазов при их извлечении из руд. Внедрение ММС позволило заменить операции среднего и мелкого дробления и значительно снизить себестоимость конечной продукции – алмазов.

В настоящее время существующие на предприятиях схемы рудоподготовки с применением ММС наиболее эффективны в сравнении с «классическими» схемами, и позволяют достигнуть достаточно высоких показателей сохранности и раскрытия алмазов в процессе разрушения кимберлитов, что доказывает целесообразность их применения при рудоподготовке алмазного сырья. Эффективность работы ММС зависит от их конструкции, рабочих параметров, режимов эксплуатации, свойств кимберлитов и жидкой фазы.

Несмотря на значительный объем выполненных исследований, посвященных проблеме разупрочнения алмазосодержащих руд и оптимизации

режимов работы дезинтегрирующего оборудования, окончательно не выявлены наиболее эффективные способы и не определены параметры обработки кимберлитов, обеспечивающие при заданной производительности и минимальных энергозатратах сохранность кристаллов алмазов при их извлечении из руд. Таким образом, интенсификация процесса селективной дезинтеграции кимберлитов с целью повышения сохранности кристаллов алмазов является весьма актуальной задачей.

Согласно литературным данным, использование высокоэнергетических методов интенсификации процесса самоизмельчения алмазосодержащего сырья не привело к эффективным результатам из-за характерных особенностей минерального состава и электрофизических свойств кимберлитов и требует дополнительных исследований во избежание нарушения природной целостности кристаллов алмаза.

Одним из наиболее перспективных методов интенсификации процессов обогащения, развиваемых в последние годы в УРАН ИПКОН РАН, является электрохимическая технология водоподготовки, которая позволяет без введения реагентов, получать значительные технологические эффекты. Большой вклад в данное направление внесли отечественные ученые: И.Н. Плаксин, Р.Ш. Шафеев, В.А. Чантурия, В.Д. Лунин и др., в том числе в процесс дезинтеграции минеральных комплексов – Г.М. Дмитриева, В.И. Богачев, Э.А. Трофимова, Г.П. Двойченкова, В.А. Зуев.

В диссертационной работе для интенсификации процесса самоизмельчения кимберлитов предложено использовать метод электрохимической водоподготовки. Данный метод позволяет регулировать физико-химические и физические свойства поверхности минералов, а также ионный и газовый состав жидких сред (технических вод, пульп, растворов и пр.).

Материалы и методы исследований

В главе представлены: характеристика алмазосодержащих кимберлитов и водных систем, теоретические и практические аспекты электрохимического кондиционирования водных систем, оборудование для электрохимической обработки вод и измельчения кимберлитов, методы и методики проведения исследований.

Технологические исследования проводились на кимберлитах трубок «Интернациональная», «Юбилейная» и «Заполярная» с использованием оборотных вод фабрик, модельных водных систем и продуктов их электролиза.

Электрохимическая обработка вод проводилась в бездиафрагменных электролизерах с различными материалами анодов (Ст.3, нерж. сталь, ОРТА, графит). Воды обрабатывались в разных режимах при различных плотностях тока ($I_s = 50 \div 250 \text{ А/м}^2$) и времени электролиза (до 2 мин).

Эксперименты по влиянию продуктов электролиза водных систем на процесс измельчения кимберлитов проводились согласно разработанной методике.

Исследование влияния физико-химических характеристик водных систем на влагоемкость кимберлитов

Вода, повышая скорость измельчения практически любых горных пород и минералов, является эффективным средством для интенсификации процесса их измельчения в различных аппаратах и механизмах. Можно предположить, что при условии увеличения проникновения молекул воды в объем кимберлита можно добиться снижения прочности минерального комплекса. В данной диссертационной работе рассматривается возможность увеличения проникновения молекул воды в кимберлит за счет ее электрохимической обработки.

С целью выявления основных факторов, определяющих технологическую эффективность электрохимически обработанных вод при самоизмельчении кимберлитов, проведены исследования по влиянию электрохимической обработки (ЭХО) на физико-химические свойства вод (табл. 1). Эксперименты выполнены с использованием электролизеров бездиафрагменного типа, обладающих по сравнению с диафрагменными аппаратами следующими преимуществами: простота конструкции и эксплуатации, минимальный удельный расход электроэнергии на ЭХО вод, высокая производительность и низкая стоимость оборудования. В электролизерах использовались аноды изготовленные из различных материалов (Ст.3, ОРТА, графит, нерж. сталь) (табл. 2). Использование анодов из различных материалов в процессе ЭХО исследуемых водных систем, а также изменение режимов обработки позволило регулировать окислительно-восстановительные свойства в следующих пределах: pH от 3,5 до 10; Eh от -700 до +800 мВ (рис.1).

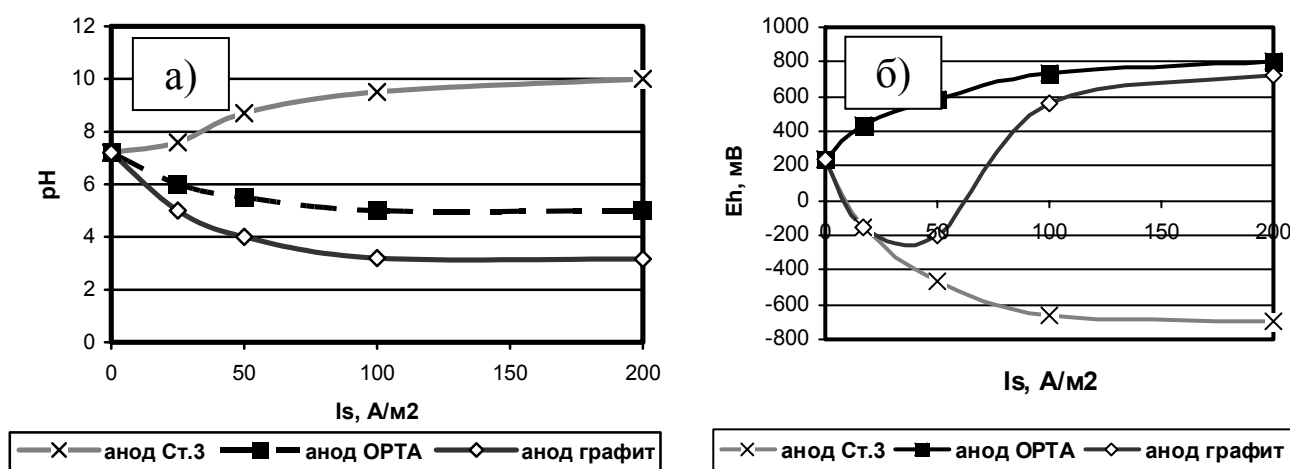


Рис. 1 – Изменение pH (а) и Eh (б) электрохимически обработанной водной системы в зависимости от плотности тока на электродах различного типа

Таблица 1 – Физико-химические свойства и ионный состав водных систем

Исследуемая водная система		рН	Eh, мВ	Концентрация ионов, мг/л							Минерализация, г/л
				Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
Оборотная вода ОФ№3	2004 г	7,7	290	1057	428,5	259,6	2,3	93,2	2950	1602	6,4
	2007 г	8,3	210	6100	1123	228,0	3,0	83,2	1893	7742	17,2
Модельная водная система	№1	7,0	200	2000	1,5	1,6	0,0	78,0	6,0	3030	5,1
	№2	7,2	210	5850	3,5	2,6	0,0	83,2	18,0	9150	15,1
	№3	7,1	215	15600	7,0	5,2	0,0	86,4	22,9	24400	40,1
	№4	7,1	212	47800	2,1	15,6	0,0	92,4	54,6	73200	121,2
	№5	7,1	200	8,0	3440	2,6	0,0	79,0	7,0	6110	9,65
	№6	6,5	225	8,0	12,0	6,0	4810	68	8,0	9156	14,1
	№7	7,1	242	1031	420,8	230,5	2,1	92,4	3037	1562	6,4

* В модельных водных системах №1– №4 различная концентрация NaCl, в №5 – №7 высокое содержание Ca²⁺, Fe³⁺, SO₄²⁻, соответственно.

Таблица 2 – Типы и технологическая характеристика электродов

Технологическая характеристика		Тип электродов				
		ОРТА	ПТА	Графит	Нерж. ст.	Ст. 3
Анодное растворение		–	–	+	+	+
Скорость анодного растворения		Очень низкая	Очень низкая	Высокая	Низкая	Очень высокая
Устойчивость в процессах очистки от катодных отложений:						
1. Кислотная промывка		+	+	+	–	–
2. Механическое удаление		+	+	–	+	+
3. Перемена полярности		–	+	+	+	+
Стоимость материала электродов		Высокая	Очень высокая	Средняя	Средняя	Низкая
Диапазон изменения	Eh, мВ	до +1200	до +1200	до +1000	от –300 до +700	до –700
	рН	до 3,5	до 3,5	до 3,5	до 6÷9	до 10÷11

Анализ полученных экспериментальных данных, представленных на рис.1, показал, что при электрохимической обработке водных систем с использованием анодов из графита и нерастворимых анодов из ОРТА происходило увеличение E_h (ОВП) в область положительных значений с 240 до 700 и 800 мВ, при максимальном снижении величины значений рН в кислую область с 7,7 до 3,2 и 5,0 соответственно. Использование анодов из стали марки Ст.3 снижало значения E_h обработанной воды до -700 мВ, т.е. в восстановительную область, при сдвиге величины рН в область щелочных значений с 7,7 до 10,0.

Установлено, что величины рН и E_h в процессе электрохимической обработки модельных водных систем достигают своих оптимальных значений при плотности тока (I_s) на электродах более 100 А/м² (рис. 1). Увеличение плотности тока более 250 А/м² приводит к резкому увеличению расхода электроэнергии. Поэтому, дальнейшие эксперименты по электрохимической обработке исследуемых водных систем проводились при величине плотности тока на электродах от 100 А/м² до 250 А/м².

Определена оптимальная продолжительность электрохимической обработки водных систем, при которой происходит максимальное изменение их кислотно-основных свойств: величины рН и E_h в процессе электролиза вод достигают своих максимальных значений при времени их обработки от 30 до 60 сек. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки вод нецелесообразно, т.к. при этом практически не происходит изменений физико-химических характеристик вод, а расход электроэнергии возрастает.

Для дальнейших исследований рекомендованы аноды из Ст.3 – для получения щелочного продукта с отрицательным ОВП (-600 мВ); нерж. сталь, графит, ОРТА – для получения кислого продукта с высокими значениями ОВП (+600 ÷ 900 мВ).

Для оценки влагоемкости кимберлитов после взаимодействия с исследуемыми водными системами совместно с сотрудниками Института общей физики (ИОФ) им. А.М. Прохорова РАН (А.А. Волковым, В.Г. Артемовым) проведены исследования по оценке диффузии молекул воды в обработанных кимберлитах с использованием метода диодно-лазерной спектроскопии. Оригинальная установка позволяет быстро, с высокой точностью изучать кинетику адсорбции и десорбции молекул воды при взаимодействии с различными образцами твердых веществ. Принцип работы установки заключается в следующем: пространство вблизи обработанного кимберлита просвечивается пучком электромагнитного излучения ближнего ИК – диапазона ($\lambda = 1,8$ мкм, $\nu = 33,8$ кГц) и измеряется коэффициент поглощения, из которого рассчитывается концентрация поглощающих молекул.

Пробы кимберлита трубки «Интернациональная» были обработаны следующими водами:

1. Продукт бездиафрагменной обработки $pH=7,2$, $Eh=830$ мВ (анод – нержавеющая сталь, $I_s=250$ А/м², $t_{обр} = 30$ сек);
2. Минерализованная модельная вода $pH=8,3$, $Eh=200$ мВ;
3. Дистиллированная вода $pH=6,5$, $Eh=160$ мВ.

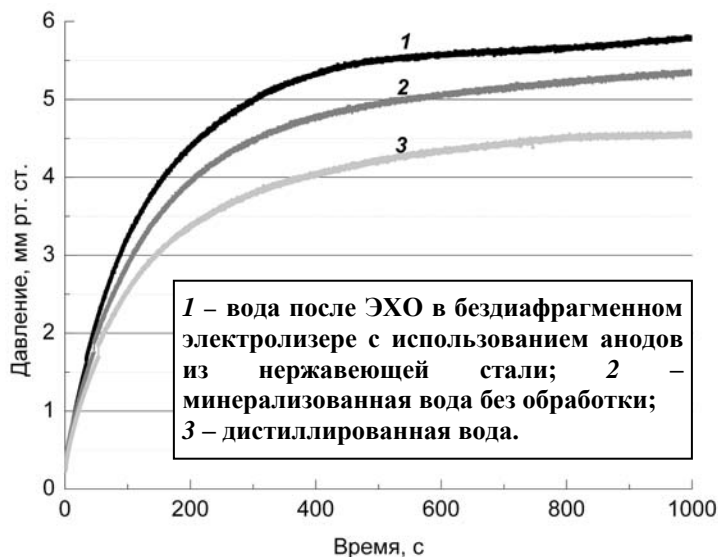


Рис. 2 – Экспериментальные зависимости давления водяного пара при десорбции из кимберлитов

Для каждой пробы снимались кривые десорбции, которые приведены на рис. 2. Экспериментально установлено, что из кимберлита, обработанного продуктом бездиафрагменной обработки, за время равное 1000 секунд выделяется наибольшее количество молекул воды – давление водяного пара в измерительной кювете достигает максимальных значений и составляет около 6 мм рт.ст.; при обработке кимберлита модельной водной системой – давление водяного

пара в измерительной кювете снижается на 0,6 мм рт.ст. (11%) в сравнении с продуктом электролиза и составляет 5,4 мм рт. ст. Минимальное давление водяного пара в измерительной кювете, равное 4,5 мм рт.ст., соответствует обработке кимберлита дистиллированной водой.

Таким образом в результате проведенных экспериментов установлено, что повышение минерализации воды до 6,4 г/л и ее электрохимическая обработка, приводит к более интенсивному проникновению молекул воды в объем кимберлита в сравнении с дистиллированной водой. Сорбционная способность (влагоемкость) кимберлита возрастает на 20 и 31%, что можно объяснить усилением трансляционного движения молекул воды и, как следствие, увеличением их проникновения в объем кимберлита. Данный факт должен привести к снижению твердости кимберлитсодержащих пород и увеличению выхода готового класса при измельчении.

Исследование влияния электрохимически обработанных вод на разупрочнение кимберлитов

С целью подтверждения теории разупрочнения кимберлитов, при их взаимодействии с продуктами электролиза вод, проведены исследования по изучению их влияния на микротвердость минералов, составляющих кимберлиты.

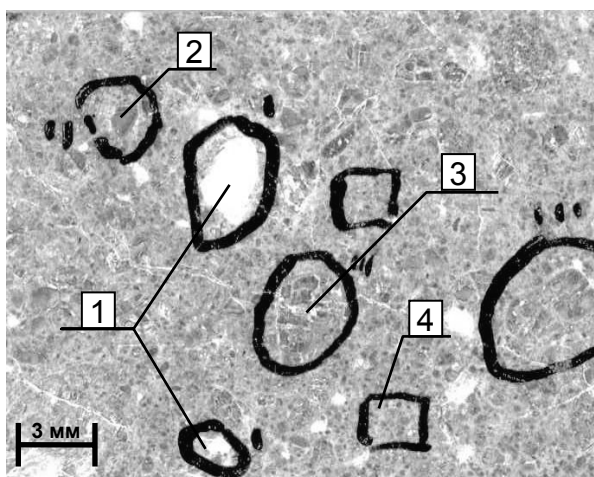
Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3М по методу Виккерса. Данный метод позволяет определять микротвердость минералов, составляющих кимберлит, т.е. сопротивление минералов механическому разрушению.

Эксперимент состоял в следующем: в сухих аншлифах кимберлита измеряли микротвердость включений минералов и их сростков (рис. 3), затем аншлифы выдерживали в течение 15 минут в водной системе и продуктах ее электрохимической обработки, полученных в бездиафрагменном электролизере с использованием различных типов анодов. Электрохимическая обработка водной системы проводилась в режимах: $I_s = 150 \text{ А/м}^2$, время обработки – 30 сек. В процессе исследований контролировались: кислотно-основные, окислительно-восстановительные свойства водных систем, концентрация растворенного кислорода. После обработки образцы кимберлитов высушивали в естественных условиях в течение 12-ти часов и повторно измеряли микротвердость отмеченных ранее минералов и их сростков.

В результате экспериментов установлено снижение микротвердости кимберлитов (табл. 3) при их контакте с продуктами электролиза водных систем в сравнении с исходной минерализованной водой. При этом максимальное снижение величины микротвердости исследуемых минералов и связующей массы кимберлита происходит при контакте кимберлита с продуктами электролиза вод, полученных в аппарате с анодами из нержавеющей стали и ОРТА, обладающими высокими окислительными свойствами: - микротвердость кальцита снижается на 12,3%; - оливина $1,8 \div 4,2\%$; - серпентина 5,8%. Микротвердость связующей массы, состоящей в основном из кальцита, серпентина и пироаурита (табл. 4), снижается на 20,4% (рис. 4) в зависимости от материала анодов.

На основании полученных данных об изменении микротвердости минералов, составляющих кимберлит, можно предположить, что использование в процессе мокрого самоизмельчения продуктов электрохимической обработки вод позволит повысить сохранность алмазных кристаллов за счет разупрочнения кимберлита (связующей массы) и более быстрого высвобождения алмазов в процессе измельчения.

Изучение прочностных свойств кимберлитов в процессе их измельчения с использованием продуктов электролиза вод выполнялись на руде трубки «Интернациональная» крупностью -5 мм. Продукты электролиза получали в бездиафрагменном аппарате с анодами из стали марки Ст.3, ОРТА и графита при плотности тока на электродах 100 и 150 А/м^2 , времени обработки 30 и 60 сек.



1 – кальцит, 2 – оливин, 3 – сростки оливина с серпентином, 4 – связующая масса

Рис. 3 – Исследуемый аншлиф кимберлита

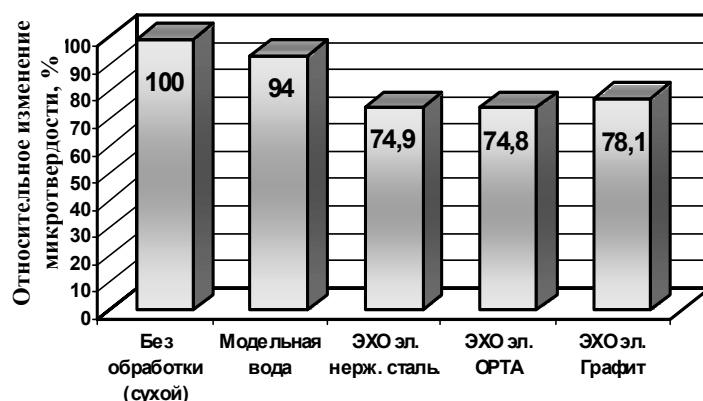


Рис. 4 – Изменение микротвердости связующей массы кимберлита после его взаимодействия с различными водными системами

Таблица 3 – Изменение микротвердости минералов в условиях их взаимодействия с различными водными системами

Область	Микротвердость, МПа				
	Сухой	Мод. водная система	ЭХО (нерж. сталь)	ЭХО (ОРТА)	ЭХО (графит)
1 - кальцит	622,0	615,1	539,6	573,9	577,8
2 - оливин	6664,9	6325,5	6056,7	6234,3	6280,4
3 - сростки оливина и серпентина	677,9	656,3	618,0	617,1	622,0
4 - связующая масса	801,5	753,4	599,4	600,4	625,9

Таблица 4 – Минералогический состав связующей массы кимберлита

Минералы	Оливин	Пироаурит	Серпентин	Кальцит	Ангидрит
Содержание минералов, %	12,0	28,0	28,0	25,0	7,0

Таблица 5 – Изменение значений pH и Eh модельных водных систем после электролиза с использованием электродов из различных материалов

Показатель	Материал электродов				
	Без обработки	Ст.3	Нержавеющая сталь	ОРТА	Графит
pH	7,7	9,2	7,8	7,3	4,0
Eh, мВ	240	-680	567	782	570

По кумулятивным кривым, построенным по экспериментальным данным, при измельчении руды в течение $10 \div 30$ мин, было установлено оптимальное время измельчения равное 15 мин.

Во время экспериментов выполнялся контроль физико-химических характеристик жидкой фазы слива мельницы, включающий определение концентрации ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , значения величин pH и Eh.

В результате проведенных экспериментов установлена возможность снижения степени минерализации рудной пульпы на 13 – 30 % в зависимости от используемого материала электродов, т.е. снижения степени растворения рудных компонентов, причем максимальный эффект достигался при использовании в процессе ЭХО вод графитовых электродов (рис. 5).

Таким образом, применение ЭХО вод приводит к «торможению» процесса растворения кимберлитобразующих минералов, что должно снизить шламообразование, толщину техногенных гидрофильных образований на поверхности алмаза, и повысить их извлечение в процессах обогащения.

Результаты измельчения оценивались путем сравнения параметров уравнения кумулятивной характеристики крупности (по распределению материала по классам крупности в измельченном продукте).

Для оценки результатов измельчения по гранулометрическому составу продуктов было использовано уравнение характеристики крупности Годена-Андреева.

$$y = Ax^k, \text{ или } \lg y = k * \lg x + \lg A$$

где y – суммарный выход класса мельче отверстий сита, A и k – постоянные для данного продукта параметры.

Коэффициент A величина, зависящая от диаметра максимального зерна материала. Параметр k определяет кривизну кривой, т.е. соотношение между количеством отдельных классов крупности в продукте. Чем ниже значение параметра k , тем меньше преобладание крупных классов в продукте.

Результаты изучения гранулометрического состава кимберлитов трубки «Интернациональная» при подаче в процесс измельчения продуктов электролиза показали, что максимальное разупрочнение кимберлитов происходит при использовании продуктов электролиза с высокими окислительными свойствами (Eh= $570 \div 782$ мВ) (табл. 5), полученных в аппарате с применением анодов из ОГРА и графита (рис. 6). При этом выход класса +2,5 мм снижается на 11,3 и 6,5 %, при этом значение параметра k также снижается с 0,167 до 0,134 и 0,155 соответственно (табл. 6). Подача воды, полученной в аппарате с анодами из стали марки Ст.3, обладающей восстановительными свойствами (Eh= -680 мВ), приводит к «загрублению» помола: выход класса +2,5 мм возрастает на 1,1%.

Таблица 6 – Параметры характеристик крупности

Параметры	Исх. минер. вода	Продукты электролиза полученные с анодами из:		
		Сталь марки 3	ОРТА	Графит
k	0,167	0,176	0,134	0,155
A	59,42	58,17	69,01	64,33

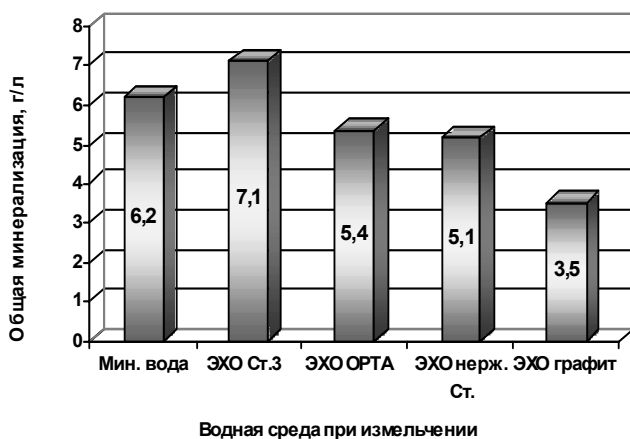


Рис. 5 – Изменение минерализации жидкой фазы рудной пульпы при измельчении кимберлита трубки «Интернациональная» в исследуемых водных системах

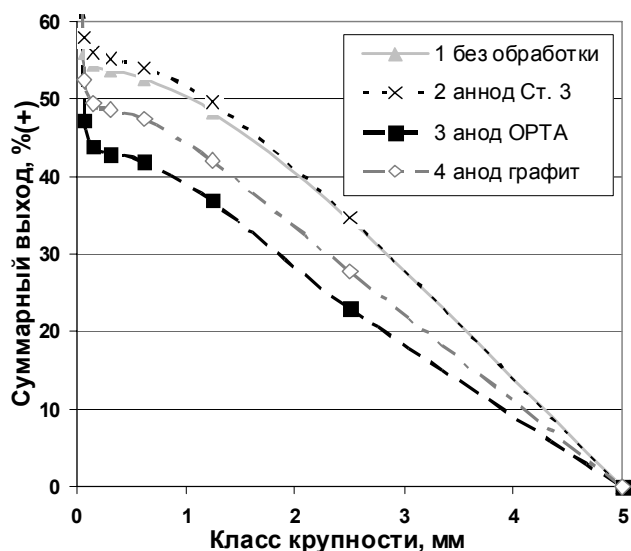


Рис. 6 – Изменение гранулометрического состава руды, измельченной в минерализованной воде и продуктах ее электролиза, полученных с применением различных анодов

В результате экспериментов по измельчению кимберлитов трубки «Заполярная» крупностью -20 мм, обладающего высокой прочностью, установлена возможность интенсификации процесса их разрушения за счет применения продуктов электролиза водных систем: при использовании для электрохимической обработки воды анодов ОРТА и нержавеющей стали в сливе мельницы наблюдалось снижение выхода крупного класса -20 +10 мм на 7,4% и 6,8%. О подтверждении эффекта интенсификации процесса измельчения кимберлитов говорит и сравнение параметров k уравнения Годэна – Андреева, снижающиеся с 0,13 до ~0,11.

Экспериментами по измельчению кимберлитов трубки «Заполярная» с использованием продуктов электролиза вод, установлена возможность повышения сохранности минералов-спутников алмазов. Минералогический анализ классов крупности -5 +1,2 мм измельченных кимберлитов позволил установить, что в пробе, измельченной с использованием электрохимически обработанной воды, количество кальцита с пироауритом возрастает в 2,4 – 3,6 раза при неизменной массе серпентина и оливина, т.е. наибольшее воздействие

электрохимически обработанная вода оказывает на кальцит и пироаурит. Кроме того, при использовании в процессе измельчения кимберлитов продуктов электролиза возрастает сохранность минералов-спутников алмаза – пиропов. На основании полученных данных можно сделать вывод, что использование в процессе мокрого самоизмельчения продуктов электрохимической обработки водных систем позволяет повысить сохранность алмазных кристаллов за счет разупрочнения кимберлита (связующей массы) и более быстрого высвобождения алмазов в процессе измельчения.

В результате экспериментов по изучению изменения плотности и ионно-газового состава водных систем в процессе их электрохимической обработки и оценки их влияния на разупрочнение кимберлитов было установлено:

– электрохимическая обработка водных растворов с минерализацией от 5 до 120 г/л вызывает снижение их плотности на $0,48 \div 3,83$ г/см³ при снижении проводимости на $0,2 \div 3,0$ мСм. Такое понижение плотности растворов обусловлено их газонасыщением в результате процесса электролиза, в частности, в них возрастает концентрация кислорода с 6 – 7 мг/л (без ЭХО) до 16 – 31 мг/л (ЭХО);

– минерализация водных систем, обеспечивающая максимальное разупрочнение кимберлитов, составляет величину порядка $5 \div 15$ г/л. Повышение минерализации жидкой фазы до 120 г/л приводит к увеличению ее плотности с 1,0 до 1,08 г/см³, что, вследствие увеличения вязкости водного раствора, может оказывать негативное влияние на процесс разрушения кимберлитов. Максимальный прирост продуктивного класса -5мм на $2,2 \div 6,6\%$ в сливе мельницы достигается при минерализации вод $5 \div 15$ г/л, концентрации в них кислорода 21,5 мг/л и гипохлорит-ионов 9,5 мг/л;

– электролизные газы, интенсивно сорбируясь на гидрофобной поверхности алмазов (рис. 7), повышают их сохранность в процессе измельчения кимберлитов за счет образования «экранирующей» газовой пленки на поверхности кристаллов.

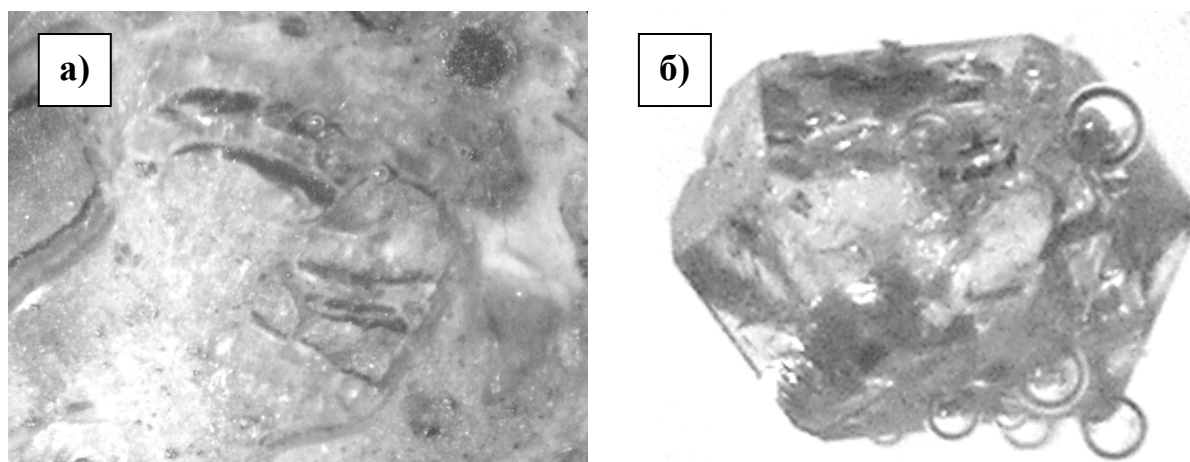


Рис. 7 – Выделение пузырьков электролизных газов на поверхности кимберлита (а) и алмаза (б)

Таким образом, на основании проведенных исследований, вскрыт механизм селективного разупрочнения кимберлитов и повышения сохранности алмазов при использовании продуктов электролиза воды, который заключается в увеличении проникновения молекул воды в объем кимберлита, снижении его твердости и возможности уменьшения разрушения кристаллов алмазов вследствие их покрытия пузырьками электролизных газов, образующих поверхностный газовый «демпфер».

Промышленная апробация электрохимической технологии водоподготовки в процессе мокрого самоизмельчения кимберлитов

Для подтверждения модельных представлений и результатов экспериментальных исследований были проведены промышленные испытания разработанной электрохимической технологии водоподготовки применительно к процессу самоизмельчения кимберлитов трубки «Интернациональная» на ОФ №3 Мирнинского ГОКа. Схема проведения опытов предусматривала подачу оборотной воды в количестве 16 - 32 м³/ч в промышленный электролизер бездиафрагменного типа ЭКВБ-50М, в котором она подвергалась электрохимической обработке в течение 12 - 24 сек при плотности тока на электродах от 150 до 250 А/м², изготовленных из нержавеющей стали марки 18ХН10Т. Далее электрохимически обработанная оборотная вода вместе с рудой (50 - 100т/ч) подавалась в мельницу мокрого самоизмельчения ММС-7х2,3.

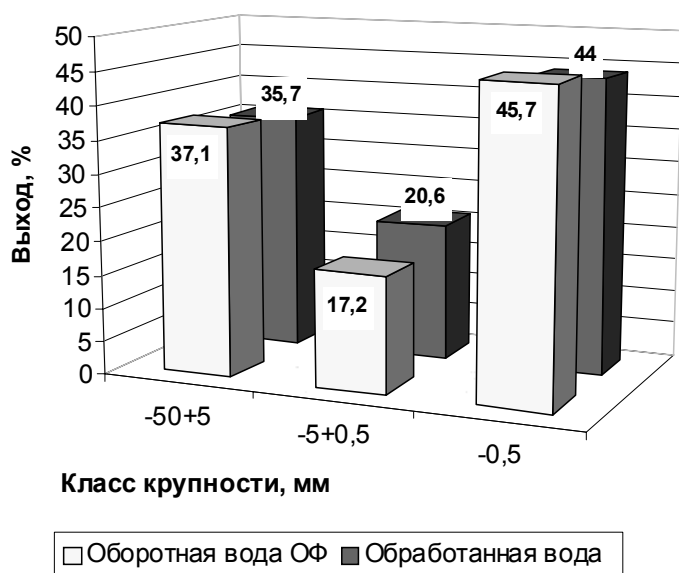


Рис. 8 – Гранулометрический состав продуктов измельчения кимберлита в ММС в период промышленных испытаний на ОФ№3 МГОКа

В результате электрохимической обработки оборотной воды наблюдались следующие изменения ее физико-химических свойств: повышение значений Eh с 220 до 700 мВ; снижение величины pH с 8,4 до 7,5; увеличение концентрации растворенного кислорода и гипохлорит-ионов (ClO⁻) с 6,3 до 16,5 мг/л и с 0 до 13,6 мг/л соответственно.

Сравнение работы ММС в фабричном режиме с использованием оборотной воды и продуктов ее электрохимической обработки позволило установить оптимальный режим

электролиза ($I_s = 250 \text{ A/m}^2$), обеспечивающий максимальное разупрочнение кимберлитов. Выход продуктивного класса $-5+0,5 \text{ мм}$ в сливе ММС увеличивался на 3,4% (рис. 8). Сорбционный слой тонкодисперсных газов электролиза, образующейся на поверхности алмазов, увеличивает вероятность сохранности кристаллов при их вскрытии в процессе измельчения и оказывает гидрофобизирующее действие на их поверхность, что повышает извлечение алмазов в последующих операциях пенной и липкостной сепараций на 22,6% и 0,6% соответственно. Полученные результаты согласуются с данными, полученными при проведении промышленных испытаний электрохимической технологии водоподготовки непосредственно в процессах пенной и липкостной сепараций. Общее извлечение алмазов на фабрике №3 МГОКа за период испытаний увеличилось на 1,4%. Удельный расход электроэнергии на обработку воды в период испытаний не превышал $1,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$.

Таким образом, промышленными испытаниями подтверждены результаты лабораторных исследований, и электрохимическая технология водоподготовки рекомендована к использованию в цикле самоизмельчения алмазосодержащих руд.

Заключение

В диссертации на основе проведенных современных методов исследования решена актуальная научная задача раскрытия механизма селективного разупрочнения кимберлитов в процессе мокрого самоизмельчения алмазосодержащих руд при использовании электрохимической обработки вод, что позволило разработать эффективный метод разупрочнения кимберлитсодержащих пород, обеспечивающий повышение выхода готового класса и сохранности кристаллов алмазов, что имеет важное промышленное значение при обогащении алмазосодержащих кимберлитов. Основные выводы заключаются в следующем:

1. Вскрыт механизм интенсификации процесса самоизмельчения кимберлитов и снижения вероятности разрушения алмазов при использовании электрохимически обработанных вод, который заключается в увеличении скорости проникновения молекул воды в объем кимберлита и сорбции электролизных газов на гидрофобной поверхности алмазов.

2. Экспериментально методом диодно-лазерной спектроскопии на основе изучения сорбционной активности различных водных систем впервые выявлен факт повышенной реакционной способности продукта бездиафрагменной электрохимической обработки воды, приводящий к увеличению ее проникновения в объем кимберлита и, как следствие, к увеличению влагоемкости и снижению прочности кимберлитсодержащих пород.

3. Установлено, что в сравнении с модельной водной системой продукты ее электрохимической обработки, практически не изменяя микротвердость

исследуемого минерала-спутника алмаза в кимберлитах (оливин), оказывают существенное разупрочняющее действие на серпентин – карбонатную связующую породу, микротвердость которой уменьшается в 1,2 раза.

4. Изучены процессы растворения кимберлита и минерализации жидкой фазы пульпы в операции измельчения при использовании продуктов электролиза воды с анодами из различных материалов и установлено, что минимальная минерализация достигается с анодами из ОРТА, графита и нержавеющей стали. Данный факт обеспечит уменьшение влияния техногенного фактора на формирование примесных пленок на алмазах и снижение их потери в процессах обогащения.

5. Разработана технология и обоснованы оптимальные режимы бездиафрагменной электрохимической обработки промышленных вод, используемых в процессе самоизмельчения алмазосодержащих кимберлитов, обеспечивающих повышение выхода готового класса на 20%.

6. Промышленными испытаниями электрохимической технологии водоподготовки в процессе мокрого самоизмельчения кимберлитов на обогатительной фабрике №3 МГОКа подтверждена эффективность применения продуктов электролиза оборотной воды для разупрочнения кимберлитов и активации поверхности алмазов обеспечивающая:

- увеличение выхода продуктивного класса $-5 + 0,5$ мм на 3,4% (на 19,8 отн.%) с 17,2 до 20,6 %;

- повышение извлечения алмазов в процессах липкостной и пенной сепарации на 0,6 и 22,6 % соответственно. Прирост общего извлечения алмазов по фабрике – 1,4%.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Двойченкова Г.П., Каплин А.И., Шободоев С.Б. Интенсификация процесса мокрого самоизмельчения кимберлитов применением электрохимически обработанных водных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2009. – № 6. – С. 390-396.

2. Чантурия В.А., Каплин А.И., Двойченкова Г.П., Миненко В.Г. Артемов В.Г. Исследование механизма разупрочнения кимберлитов при их взаимодействии с электрохимически обработанной водой // Горный журнал. – 2010. – № 12 (в печати).

3. Каплин А.И. Исследование влияния электрохимически обработанных водных систем на процесс мокрого самоизмельчения кимберлита // Естественные и технические науки. – 2007. – №6. – С. 167-169.

4. Каплин А.И., Мозолькова Е.А., Прошина Е.М. Влияние электрохимически обработанных водных систем на измельчение кимберлита трубки «Интернациональная» и состав жидкой фазы // Материалы

международного совещания. «Плаксинские чтения – 2004». – Иркутск: Изд-во Альтекс, 2004. – С. 228 – 229.

5. Двойченкова Г.П., Трофимова Э.А., Каплин А.И. Интенсификация процесса самоизмельчения кимберлитов применением электрохимически обработанных водных систем // Труды V Конгресса обогатителей стран СНГ. – М.: Альтекс, 2005. – Т.1. – С. 43-46.

6. Двойченкова Г.П., Миненко В.Г., Каплин А.И., Зуев А.В., Коваленко Е.Г., Амелин С.А. Интенсификация процесса разрушения кимберлитовых пород при переработке алмазного сырья применением в схеме самоизмельчения электрохимически обработанных водных систем // Материалы международного совещания. «Плаксинские чтения – 2005». – СПб.: Роза мира, 2005. – С. 190 – 192.

7. Каплин А.И. Применение электрохимически обработанных водных систем в процессе самоизмельчения алмазосодержащих кимберлитов // Материалы IV Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М.: ИПКОН РАН, 2007. – С. 239-243.

8. Двойченкова Г.П., Миненко В.Г., Каплин А.И. Разработка комплексной схемы переработки минерализованных оборотных вод обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» и экспериментальное обоснование параметров промышленной установки // Материалы международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». – Екатеринбург: Изд-во ПОО «Форт Диалог-Исеть», 2007. – С. 270 – 274.