

**ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Ю.А. Подкаменного  
**«Повышение извлечения алмазов в условиях липкостной сепарации на**  
**основе комбинированного электрохимического и ультразвукового**  
**воздействия»**, представленной на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальностям: 25.00.13 «Обогащение полезных  
ископаемых»

Алмазодобывающая отрасль в Российской Федерации является важнейшим источником пополнения золотовалютных резервов государства и обеспечивает устойчивое развитие ювелирной, станкоинструментальной и нефтегазовой отраслей промышленности, в которых используются природные алмазы ювелирного качества и режущий и буровой инструмент с применением природных технических алмазов.

В настоящее время на мировом рынке возрос спрос на природные алмазы крупностью менее 5 мм, стоимость которых составляет около 25% от стоимости товарной продукции алмазоизвлекательных обогатительных фабрик. При этом потери алмазов указанной крупности достигают 20%. С учетом этого, проблема повышения извлечения алмазов указанной крупности в технологических схемах обогащения алмазосодержащего сырья является актуальной.

Технологические схемы обогащения кимберлитов и россыпных алмазосодержащих месторождений, в отличие от схем, по которым обогащаются большинство руд цветных и черных металлов и угля, являются наиболее сложными как по своей структуре, так и по используемым методам обогащения. В мировой практике обогащения подобного сырья успешно используется рентгено-люминесцентная сепарация (РЛС), тяжелосредняя сепарация (ТСС), пенная сепарация, жировой процесс, магнитная и электрическая сепарации. В первичных циклах обогащения

алмазосодержащего сырья наибольшее применение нашло сочетание РЛС и ТСС.

Однако, с уменьшением крупности извлекаемых кристаллов алмазов в операциях ТСС и РЛС наблюдается закономерное падение извлечения мелких классов в их концентраты. Это связано с ухудшением сепарационных характеристики ТСС за счет деградации свойств ферросилициевой суспензии и проблемой «светимости» мелких кристаллов алмазов в операциях РЛС.

Поэтому, в практике обогащения алмазов крупностью  $-5 + 2$  мм на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» используют липкостную сепарацию для доизвлечения кристаллов алмазов из хвостов операций гравитационного обогащения и РЛС.

Липкостная сепарация основана на избирательном смачивании поверхности зерен акцессорных и породных минералов водой и не смачивании ею поверхности кристаллов алмаза. Такой процесс может быть достаточно селективным, если поверхность кристаллов алмаза не подвержена влиянию контакта с подземными солевыми растворами или искусственно очищена от «рубашек» в процессе подготовки материала к липкостной сепарации. Вопросу очистки поверхности кристаллов алмаза от гидрофильных поверхностных пленок посвящена настоящая диссертация. Поэтому выбранная тема диссертации является достаточно актуальной.

Научному обоснованию применения комбинированных электрохимических и ультразвуковых воздействий, направленных на удаление гидрофилизирующих образований с поверхности кристаллов алмаза перед операцией липкостной сепарации посвящена настоящая диссертация.

Объектом исследования явились процессы деструкции и удаления гидрофилизирующих минеральных образований с поверхности кристаллов алмаза с применением ультразвуковых и электрохимических воздействий на кимберлитсодержащую пульпу.

Предметом исследований является кимберлитовые руды трубок «Ботуобинская» и «Нюрбинская», а также гидрофильтные поверхностные образования на поверхности кристаллов алмазов этих трубок.

Применительно к данному объекту в работе установлено, что гидрофилизирующие поверхностные образования на кристаллах алмаза, извлеченных из подверженных наиболее значительным гипергенным изменениям кимберлитов трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская», преимущественно представлены адгезионно закрепившимися шламовыми примазками силикатно-карбонатного состава и характеризуются значительными объемами пор, заполненных водной фазой. Указанные примазки и шламовые покрытия интенсивно диспергируются и удаляются с поверхности кристаллов алмаза комбинированным электрохимическим и ультразвуковым воздействием в течение короткого времени при мощности ультразвукового поля  $3 - 7.5 \text{ Вт}/\text{см}^2$  частотой  $22 - 130 \text{ кГц}$  плотности тока в бездиафрагменном электрохимическом кондиционере до  $100 \text{ А}/\text{м}^2$ .

Автором по теме диссертации опубликовано 13 научных трудов; в изданиях рекомендованных ВАК РФ – 5.

По своей структуре диссертационная работа объемом 146 страниц машинописного текста состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения и приложений. Список использованных источников содержит 120 наименований, из которых 20 – иностранных.

В главе 1 дан анализ современного состояния технологии и методов интенсификации процесса липкостной сепарации алмазосодержащего сырья.

Анализу технологий предшествует описание особенностей минерального состава кимберлитовых трубок Западной Якутии, в частности трубок «Нюрбинская» и Ботуобинская». Кимберлитовые трубы Западной Якутии характеризуются повышенным содержанием серпентина, кальцита, кварца и слюды при наличии в них талька и глинистых минералов.

При участии автора установлено, что содержание и частота встречаемости вторично измененных минералов определяет трудности обогащения таких кимберлитов по действующим технологическим схемам.

Далее автором подчеркнуто, что именно гидрогеологические условия залегания трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская» оказали основное влияние на процессы образования вторичных минералов, степень измененности которых обуславливает успех извлечения из них алмазов.

Однако, в сделанном автором обзоре не рассмотрена связь между особенностями минерального состава трубок, гидро-геологическими условиями их залегания и характером покрытий поверхности кристаллов алмазов гидрофильными пленками и шламами, затрудняющие их извлечение в операциях липкостной сепарации.

Далее в главе рассмотрены особенности современных схем переработки алмазосодержащих кимберлитов и, в частности, схемные решения технологии обогащения мелких классов алмазов, включающие операции липкостной сепарации. Данный процесс применяется для извлечения алмазов крупностью  $-5 + 2$  мм из хвостовых продуктов основных операций РЛС на барабанных (ЛСБ-5) или ленточных (ЛС-10, АЖ-2Б) сепараторах. Извлечение алмазов в липкостной сепарации является не достаточно высоким для данного типа сырья и колеблется в пределах 75 – 85%. Основной причиной такого уровня извлечения является наличие в питании данной операции алмазов с гидрофильной поверхностью. Именно поэтому автор поставил своей целью повысить гидрофобность поверхности таких алмазов для их доизвлечения в концентрат липкостной сепарации.

Основываясь на результатах предыдущих исследований, выполненных в ИПКОН РАН, диссертант обосновал комбинированный способ воздействий на гидрофильной поверхности кристаллов алмаза, сочетающий электрозвуковую и электрохимическую обработку кимберлитовых пульп перед липкостной сепарацией.

Глава 2 носит традиционно методический характер. В главе рассмотрены основные методы и их приборное оформление для исследования кимберлитов и продуктов их обогащения, изучения состава и структуры поверхности кристаллов алмаза, ионного состава технологических вод и жидкой фазы пульп.

Основные методы исследования отражены в таблице 2.1 диссертации. Из них следует отметить растровую электронную микроскопию, рентгеновскую дифрактометрию и ИК спектроскопию, примененные для изучения состава пленок на поверхности кристаллов алмаза.

Данная глава содержит скрытую рекламу оборудования, используемого в работе, заключающуюся в фотографиях отдельных приборов зарубежных фирм. Целесообразно было бы обосновать выбор приборного оформления методов, позволяющих исследовать состав гидрофильтрных пленок и шламовых покрытий на кристаллах алмазов, используемых в работе.

Глава 3 отражает результаты исследований минеральных образований на поверхности кристаллов алмаза, отобранных из продуктов обогащения кимберлитовых трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская».

Результатами минералогических исследований установлено, что в кимберлитах трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская» преобладают частично или полностью измененные минералы; в трубке «Нюрбинская» - доломит, слюда, серпентин с преобладанием доломит-серпентиновой ассоциации, а в трубке «Ботуобинская» - первичный и гипергенный кальцит, серпентин, доломит и слюда. В шламовых фракциях наблюдается повышенное содержание серпентина и уменьшенная – доломита.

Рентгеноспектральными исследованиями минеральных образований на поверхности кристаллов алмаза установлено, что они представлены микрозернами хлорита, флогопита, пирита, апатита, доломита, гетита и в меньшей степени первичными минералами кимберлита – пиропом, пикроильменитом и оливином.

Для алмазов указанных трубок характерно наибольшее распространение шламовых конгломератов силикат-фосфатного и тальк-смектитового составов. Наибольшее количество минеральных образований находится в природных трещинах, углублениях и природных скульптурах растворения. Выпуклые участки поверхности кристаллов алмаза чаще полностью лишены гидрофильных пленок.

Измерениями краевого угла смачивания установлено, что алмазы октаэдрического габитуса имеют относительно более гидрофобную поверхность, чем алмазы кубического габитуса. Вследствие образования на поверхности природно гидрофобных кристаллов алмаза техногенных гидрофильных пленок такая поверхность становится частично гидрофильной.

Гидрофобность поверхности кристаллов алмаза изучалась автором методом измерений краевого угла смачивания. Учитывая специфичность жирового процесса, на наш взгляд, более целесообразным было бы измерение сил отрыва кристалла алмаза от поверхности слоя мази на воздухе и в воде. Это дало бы более реальную картину удержания кристалла алмаза разной степени гидрофобности на поверхности слоя мази в процессе липкостной сепарации.

В главе 4 представлено экспериментальное обоснование применения комбинированной электрохимической и ультразвуковой технологии для восстановления гидрофобности поверхности кристаллов алмаза, утраченной в процессах рудоподготовки кимберлитов перед их обогащением и в процессе контакта поверхности кристаллов алмаза с природными и технологическими водами.

В качестве методов восстановления гидрофобности поверхности кристаллов алмаза, автором предложена комбинация электрохимического воздействия на жидкую фазу кимберлитовой пульпы и ультразвуковое воздействие на пульпу, приводящая к разрушению и удалению минеральных образований с поверхности кристаллов алмаза.

В первом параграфе главы дано теоретическое обоснование и выбор параметров ультразвукового воздействия на поверхность кристаллов алмаза, обеспечивающих с одной стороны эффективную очистку поверхности кристаллов от гидрофильных пленок и шламовых покрытий, а с другой – не приводящих к разрушению самих кристаллов алмаза.

Применение ультразвуковых воздействий на пульпу обусловлено аномально высоким акустическим сопротивлением кристаллов алмаза, равном  $52.5 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>\*с) превышающим акустическое сопротивление глины -  $7.92 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>\*с), кварца -  $13.36 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>\*с) и воды  $1.52 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>\*с) (табл. 4.2). Это обеспечивает значительное ослабление ультразвукового сигнала в теле кристалла алмаза по сравнению с его ослаблением на гидрофильных пленках и шламовых покрытиях на поверхности того же кристалла алмаза.

Установлен интервал энергий акустического поля (3 – 12.5 Вт/см<sup>2</sup>, обеспечивающий поддержание кавитационного эффекта внутри минеральных образований на поверхности кристалла алмаза, более 1.5 Вт/см<sup>2</sup> и не вызывающий кавитационного режима поля в объеме кристалла алмаза.

В основу режимов электрохимического кондиционирования минерализованных технологических вод автор положил результаты исследований, выполненных ранее в ИПКОН РАН (В.Г. Миненко) с применением бездиафрагменного электролизера при времени кондиционирования 1 – 2 минуты и плотности тока на рабочем электроде 75 – 100 А/м<sup>2</sup>. Автором показано, что такой способ электрохимического воздействия на жидкую фазу приводит к частичному растворению гидрофильных образований на поверхности кристаллов алмаза, что приводит к очистке поверхности кристаллов не более, чем на 25% от силикатов и не более 40% - от карбонатов.

Использование только ультразвуковой очистки поверхности кристаллов алмаза при указанных выше режимах обеспечивает степень

очистки поверхности кристаллов от силикатов на 91%, а от карбонатов на 64%.

Проведение ультразвуковой очистки поверхности кристаллов находящихся в пульпе, жидкую фазу которой прошла бездиафрагменную электрохимическую обработку повысила степень очистки поверхности кристаллов алмаза от силикатов на 94% и от карбонатов – на 92% (табл. 4.9).

Необходимо отметить, что оценка степени очистки поверхности кристаллов алмаза от указанных силикатных и карбонатных образований проводилась на основе ИК спектров поверхности кристаллов, т.е. косвенным методом. Хотя на рис. 4.10 представлены микроскопические изображения поверхности кристаллов, позволяющие оценить как степень покрытия поверхности кристаллов гидрофильными образованиями, так и состав таких покрытий.

Далее автором исследована зависимость гидрофобности кристаллов алмаза от режимов как отдельных видов очистки, так и их комбинации и флотируемость очищенных и неочищенных кристаллов алмаза.

Однако в выводе 4 главы говорится, что максимальная гидрофобность и флотируемость в аппарате беспенной флотации достигается в результате ультразвуковых воздействий на кристаллы или минеральную суспензию, но не указывается прошла ли жидкую фазу электрохимическое кондиционирование. Было бы целесообразнее оценить не изменение краевого угла смачивания, а как уже отмечалось выше, силу отрыва кристалла алмаза от слоя мази.

Глава 5 посвящена разработке и апробации предложенной автором технологии очистки поверхности кристаллов алмаза перед липкостной сепарации.

Автором предложен режим подготовки исходного питания липкостной сепарации, включающий оттирку хвостов РЛС, ультразвуковую обработку продукта в течение 1 минуты при мощности ультразвукового воздействия 5 –

7.5 Вт/см<sup>3</sup> при разбавлении его электрохимически обработанной воды при плотности тока 100 А/м<sup>2</sup> при расходе электроэнергии 0.75 – 1.5 кВт\*ч/м<sup>3</sup>

Данный режим апробирован при проведении стендовых испытаний с использования стенового липкостного сепаратора.

На основе результатов стендовых испытаний комбинированной ультразвуковой и электрохимической очистки кристаллов алмаза, поступающих в операцию липкостной сепарации, что дало прирост извлечения алмазов от операции в 4.13%, выполнен расчет экономической эффективности от внедрения предложенной автором технологии очистки, который составит 17.7 млн. рублей в год.

Необходимо отметить, что предложенную автором технологию, для большей достоверности полученных технологических показателей и экономического эффекта, было бы желательно проверить в промышленных условиях на обогатительной фабрике №16 АК «АЛРОСА», перерабатывающих кимберлиты трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская».

**Можно согласиться с предложенной диссертантом научной и практической значимостью работы.**

**Достоверность полученных результатов** обоснована комплексом современных физических, физико-химических, химических, минералогических методов исследований состава гидрофильных образований на поверхности кристаллов алмаза, поступающих на их извлечение липкостной сепарацией, большим объемом лабораторных, исследований и стендовых испытаний, предложенной автором технологии комбинированной очистки поверхности кристаллов алмаза.

**Теоретические и практические выводы обоснованы** анализом результатов исследований состава поверхностных соединений на поверхности кристаллов алмаза, ростом гидрофобности поверхности кристаллов, полученного в результате очистки поверхности алмазов приведенных в работе

Представленные автором публикации отражают основное содержание диссертации. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту и основным выводам диссертации.

**По диссертационной работе имеются следующие замечания:**

1. В сделанном автором обзоре (глава 1) не рассмотрена связь между особенностями минерального состава трубок, гидро-геологическими условиями их залегания и характером покрытий поверхности кристаллов алмазов гидрофильтральными пленками и шламами, затрудняющие их извлечение в операциях липкостной сепарации. Это сужает область применения результатов, изложенных в диссертации при переходе от кимберлитов трубок «Нюорбинская» и «Ботуобинская» к другим кимберлитам Якутии и других алмазодобывающих стран мира.
2. Глава 2 содержит скрытую рекламу оборудования, используемого в работе, заключающуюся в фотографиях отдельных приборов зарубежных фирм. Целесообразно было бы обосновать выбор приборного оформления методов, позволяющих исследовать состав гидрофильтральных пленок и шламовых покрытий на кристаллах алмазов, используемых в работе.
3. Гидрофобность поверхности кристаллов алмаза изучалась автором методом измерений краевого угла смачивания в трехфазной системе «алмаз-вода-воздух». Учитывая специфичность жирового процесса, на наш взгляд, более целесообразным было бы измерение сил отрыва кристалла алмаза от поверхности слоя мази на воздухе и в воде. Это дало бы более реальную картину удержания кристалла алмаза разной степени гидрофобности на поверхности слоя мази в процессе липкостной сепарации.
4. Оценка степени очистки поверхности кристаллов алмаза от указанных силикатных и карбонатных образований проводилась на основе ИК спектров поверхности кристаллов, т.е. косвенным методом. Хотя на рис. 4.10 представлены микроскопические изображения поверхности кристаллов, позволяющие оценить как степень покрытия поверхности кристаллов гидрофильтральными образованиями, так и состав таких покрытий.

5. Предложенную автором технологию для большей достоверности полученных технологических показателей и экономического эффекта, было бы желательно проверить в промышленных условиях на обогатительной фабрике №16 АК «АЛРОСА», перерабатывающих кимберлиты трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская».

Указанные замечания не снижают ценности полученных автором результатов. Диссертационная работа Ю.А. Подкаменного является законченным научным трудом, практическая реализация научных положений которой позволит сократить безвозвратные потери алмазов крупностью -6+1 мм на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА».

Оппонируемая диссертация полностью соответствует требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых», а сам автор Подкаменный Юрий Александрович – искомой ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры обогащения  
и переработки полезных ископаемых  
и техногенного сырья НИТУ «МИСиС»,  
д.т.н.

Подпись Горячева Бориса Евгеньевича  
заверяю

  
Б.Е. Горячев  
*10.09.18 г*

Проректор по безопасности и  
общим вопросам НИТУ «МИСиС»



  
И.М. Исаев

## Список научных работ Горячева Б.Е.

1. Горячев Б.Е., Николаев А.А., Чжо З.Я. Потенциометрические исследования состояния сфалеритового электрода в растворах сульфата меди, цинка и железа // В сборнике: Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья Материалы XXIII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады. – 2018. – С.448-450.
2. Горячев Б.Е., Николаев А.А., Чжо З.Я., Моргун А.А. Термодинамика формирования сорбционного слоя тиольных собирателей на поверхности сфалерита при условии окисления сульфидной серы минерала до элементной // Цветные металлы. – 2018. № 4. – С. 19-26.
3. Горячев Б.Е., Яа Ч.З., Николаев А.А. Исследование влияния сульфатов меди, цинка и железа на флотацию сфалерита сульфидильными собирателями // Цветные металлы. – 2017. № 3. – С. 7-12.
4. Горячев Б.Е., Лин У Н., Николаев А.А., Жебрикова А.А. Термодинамика взаимодействия тиольных собирателей с поверхностью пирита при контролируемой степени окисления сульфидной серы минерала // Цветные металлы. 2017. № 5. С. 20-26.
5. Николаев А.А., Петрова А.А., Горячев Б.Е. Кинетика закрепления зерен пирита на пузырьке воздуха в условиях перемешивания суспензии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 131-139.
6. Чантурия В.А., Бондарь С.С., Годун К.В., Горячев Б.Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира // Горный журнал. – 2015. № 2. – С. 55-58.
7. Чантурия В.А., Годун К.В., Желябовский Ю.Г., Горячев Б.Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира (часть 2) // Горный журнал. – 2015. № 3. – С. 67-75.
8. Горячев Б.Е., Чжо З.Я., Николаев А.А., Полякова Ю.Н. Особенности флотации сфалерита бутиловым ксантогенатом калия и дитиофосфатом натрия в известковой среде // Цветные металлы. – 2015. № 11 (875). – С. 14-19.