

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ЦИКЛЕ ЛИПКОСТНОЙ СЕПАРАЦИИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НАКЫНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Г.П. Двойченкова^{1,2}, Ю.А. Подкаменный^{1,2}, А.С. Тимофеев¹, Ю.Н. Никитина³

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия, e-mail: dvoigp@mail.ru

² Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
имени М.К. Аммосова, Мирный, Россия

³ Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), Республика Саха (Якутия), Мирный, Россия

Аннотация: Приведены результаты исследований состава и способов закрепления минеральных гидрофилизирующих образований на поверхности алмазных кристаллов коренных и россыпных месторождений Накынского рудного поля. Представлены результаты сравнительного анализа полученных данных и данных аналогичных исследований, выполненных институтами ИПКОН РАН и НИГП АК «АЛРОСА» на алмазных кристаллах, извлеченных из кимберлитовых руд месторождений Мирнинского рудного поля. Установлена идентичность минерального строения гидрофилизирующих покрытий на алмазах, которые не закрепляются на поверхности жировой мази и, соответственно, не извлекаются с использованием метода липкостной сепарации из алмазосодержащих продуктов переработки алмазосодержащего сырья месторождений Мирнинского и Накынского рудных полей. В составе гидрофилизирующих примазок на кристаллах из коренных и россыпных месторождений Накынского рудного поля дополнительно обнаружены заполненные водой поры, у которых акустическое сопротивление среды намного меньше, чем у алмазов. На основании полученных данных в цикле липкостной сепарации продуктов обогащения алмазосодержащего сырья месторождений Накынского рудного поля обоснована технология совместного применения электрохимических и ультразвуковых воздействий, разработанная в ИПКОН РАН для аналогичных условий переработки алмазосодержащего сырья. Стеновыми испытаниями подтверждена технологическая эффективность предложенного технического решения, применение которого вследствие синергетического эффекта позволяет удалить с поверхности кристаллов более 95% гидрофилизирующих образований, что обеспечивает прирост на 6,3% извлечения алмазов класса -6+1 мм в соответствующий концентрат.

Ключевые слова: алмазные кристаллы, липкостная сепарация, электрохимическое кондиционирование, ультразвуковые воздействия, гидрофобность, извлечение, гидрофилизирующие образования.

Для цитирования: Двойченкова Г. П., Подкаменный Ю. А., Тимофеев А. С., Никитина Ю. Н. Экспериментальное обоснование применения ультразвуковых и электрохимических воздействий в цикле липкостной сепарации алмазосодержащего сырья месторождений Накынского рудного поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10. – С. 74–88. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_74.

Experimental substantiation of using ultrasound and electrochemical exposure in adhesive separation of diamond-bearing raw materials from Nakyn kimberlite field

G.P. Dvoichenkova^{1,2}, Yu.A. Podkamenny^{1,2}, A.S. Timofeev¹, Yu.N. Nikitina³

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: dvoigp@mail.ru

² Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

³ Yakutniproalmaz Institute of PJSC ALROSA, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russia

Abstract: The article describes the studies into the composition and attachment of hydrophilic formations on the surface of diamond crystals from the primary deposits and placers within Nakyn kimberlite field. The comparative analyses of the research findings and the similar studies are accomplished at the institutes of IPKON RAS and NIGP ALROSA using diamond crystals extracted from kimberlite ore from Mirny field. It is found that the hydrophilic coatings on diamonds, which inadhesive to grease and, accordingly, unrecoverable with adhesive separation from diamond-bearing products of processing of diamond-bearing raw materials from Mirny and Nakyn kimberlite fields, have the identical mineral structure. Leather coats on the crystals from the primary deposits and placers within Nakyn field contain water-filled pores which have the acoustic resistance much smaller than diamonds have. Based on the data obtained in the cycle of adhesive separation of products from processing diamond-bearing raw material from Nakyn field, the technology of joint ultrasound and electrochemical exposure, developed at IPKON RAS for the similar diamond-bearing material processing conditions, is substantiated. The benchmark tests prove efficiency of the proposed technology which, owing to the synergistic effect enables removal of more than 95% of hydrophilic formations from the surface of diamond crystals, which ensures the increment in recovery of diamonds –6+1 mm in size in concentrate by 6.3%.

Key words: diamond crystals, adhesive separation, electrochemical conditioning, ultrasound exposure, hydrophobicity, recovery, hydrophilic formations.

For citation: Dvoichenkova G. P., Podkamenny Yu. A., Timofeev A. S., Nikitina Yu. N. Experimental substantiation of using ultrasound and electrochemical exposure in adhesive separation of diamond-bearing raw materials from Nakyn kimberlite field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10):74-88. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_74.

Введение

Значительная часть алмазных кристаллов, извлекаемых в процессах переработки кимберлитовых руд, классифицируется как средние или мелкие, их размер составляет менее 6 мм, и для их извлечения используют природную гидрофобность поверхности с применением липкостной сепарации (ЛС) [1].

Работами ряда исследователей установлено, что на поверхности алмазов и

минералов, входящих в состав алмазосодержащего сырья, формируются скопления гидрофилизирующих минеральных образований (пленки) различного происхождения. Степень покрытия кристаллов зависит от множества факторов, основными из которых являются свойства поверхности контактирующих фаз, температура и давление окружающей среды в период нахождения этих кристаллов в рудном массиве. Присутствие покрытий

с гидрофильными свойствами на алмазных кристаллах снижает степень природной гидрофобности их поверхности и, соответственно, эффективность закрепления на жировой поверхности мази липкостного сепаратора [2, 3].

Алмазные кристаллы, поверхность которых заблокирована присутствием гидрофилизирующих образований, подробно исследованы в более ранних экспериментах в схемах переработки алмазосодержащих кимберлитов коренных месторождений Мирнинского рудного поля, результатами которых установлена возможность восстановления гидрофобных свойств алмазов рассматриваемого типа с применением комбинированных электрохимических (ЭХ), тепловых (ТП) и ультразвуковых (УЗ) воздействий [4–7].

Задачи настоящих исследований:

- экспериментальное определение состава минеральных образований, гидрофилизирующих поверхность алмазных кристаллов, извлеченных из интенсивно измененных кимберлитовых руд россыпных и вновь открытых месторождений Накынского рудного поля;

- установление идентичности полученных данных (на алмазах месторождений Накынского рудного поля) и результатов ранее выполненных аналогичных исследований (на алмазах коренных месторождений Мирнинского рудного поля);

- экспериментальное обоснование совместного использования методов ультразвуковой обработки алмазосодержащей рудной пульпы и электрохимической обработки оборотной воды в процессе липкостной сепарации при обогащении кимберлитового материала месторождений Накынского рудного поля.

Актуальность поставленных задач обусловлена тем, что современные компоновочные решения схемы переработки рассматриваемого труднообогатимого алмазосодержащего сырья Накынского рудного поля (коренные интенсивно из-

мененные кимберлитовые руды с добавлением алмазосодержащего материала сопутствующих россыпных месторождений), характеризующегося низким содержанием ценного компонента и ухудшением контрастности природных технологических свойств разделяемых минералов, в качестве заключительной операции используют цикл ЛС, эффективность которой обусловлена гидрофобно-гидрофильным состоянием поверхности извлекаемых кристаллов [8, 9].

В экспериментальных исследованиях изучены природные кристаллы алмазов, извлеченные из алмазосодержащего сырья Накынского рудного поля и продуктов его обогащения.

Объекты, предметы и методы исследований

В настоящее время алмазоносные трубки Нюрбинская и Ботуобинская и сопутствующие пески россыпных месторождений являются основными поставщиками алмазосодержащего сырья, добываемого в районах Накынского рудного поля, переработка которого ведется в условиях обогатительных фабрик (ОФ) № 15 и № 16, с доводкой алмазосодержащих продуктов в схеме ОФ № 16, использующей в качестве конечной контрольной операции липкостную сепарацию. Рассматриваемый алмазосодержащий материал характеризуется высокой степенью измененности вещественного состава (особенно кимберлиты с более глубокими горизонтов), что требует применения дополнительных методов подготовки алмазосодержащих продуктов обогащения к контрольным операциям их доводки [10, 11].

С учетом данного факта в качестве объекта исследований принят цикл липкостной сепарации в условиях переработки вышеуказанного типа алмазосодержащего сырья, в котором минеральные гидрофильные комплексы на поверхно-

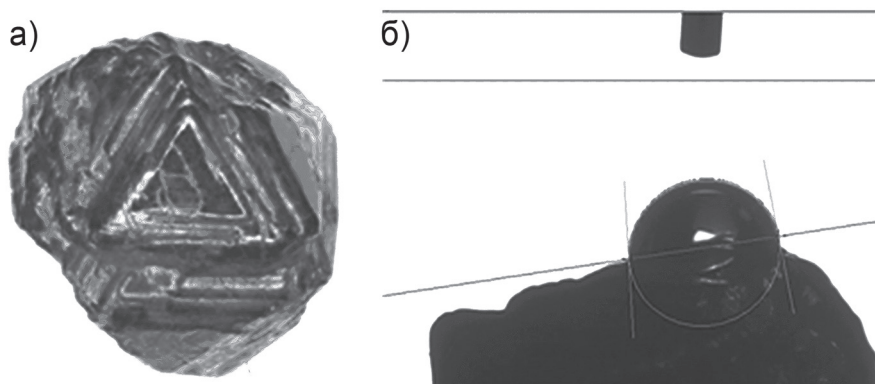


Рис. 1. Поверхность кристалла алмаза (а) и нанесенная капля жидкости (б) в методике измерения краевого угла смачивания

Fig. 1. Image of a diamond surface (a) and a liquid drop on it (b) with graphic-analytical measurement of the contact angle

сти кристаллов алмаза, а также методы их разрушения изучены в качестве предметов исследований.

В лаборатории НИГП АК «АЛРОСА» выполнены экспериментальные исследования минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов с использованием сканирующей электронной микроскопии, включающей микроанализатор JXA-8800R [12].

Степень гидрофобности исследуемых алмазов определена методом нанесения микрокапли на поверхность кристалла (рис. 1). В используемой методике краевой угол смачивания представляет результат среднего значения из двух измеренных на противоположных гранях кристалла и отличающихся на величину, не превышающую 5% [13, 14].

Минералогический состав и химический анализ гидрофильных образований изучен в лаборатории НИГП АК «АЛРОСА» с использованием метода сравнения эталонных спектров пропускания с полосами примесей на алмазах и метода рентгеноспектрального микроанализа и программы анализатора INCA [15].

Степень очистки поверхности алмазов в условиях использования предложенных методов обработки оценивалась

с применением РФЭС и количественной ИК-спектроскопии на отобранной коллекции алмазов. Сравнение произведений высот и ширины пиков поглощения ИК-излучения при использовании количественной ИК-спектроскопии позволяет определить изменение количества минеральных образований на поверхности алмаза [16, 17].

Лабораторные и стендовые испытания с использованием алмазосодержащего материала выполнены в институте НИГП АК «АЛРОСА». Алмазные



Рис. 2. Внешний вид алмазных кристаллов

Fig. 2. Appearance of diamond crystals

кристаллы были отобраны из кимберлитового материала, поступающего в качестве исходного питания в цикл липкостной сепарации схемы доводки продуктов обогащения алмазосодержащего сырья месторождений Накынского рудного поля. Перед проведением экспериментальных исследований отобранные алмазные кристаллы (см. рис. 2) сортировались по степени гидрофобности. Краевой угол смачивания гидрофобных кристаллов изменялся в пределах от 80° до 105° . Краевой угол смачивания гидрофильных кристаллов не превышал 55° .

Экспериментальная коллекция, использованная в последующих исследованиях, содержала выделенные гидрофильные кристаллы с минеральными образованиями на поверхности, пример которых приведен на рис. 3.

На фотографиях (см. рис. 3) видно, что поверхность гидрофильных кристаллов, отобранных для последующих исследований, содержит различной формы минеральные образования, располага-

ющиеся как на ровной плоскости кристаллов, так и в местах различных дефектов поверхности.

Результаты исследований

В результате комплекса выполненных экспериментальных исследований на поверхности исследуемых алмазных кристаллов выявлены минеральные образования различного размера, состава и способа их закрепления, сконцентрированные на ровной поверхности кристалла, а также в локальных трещинах, впадинах и также в углах смежных поверхностей.

На электронных изображениях исследуемых кристаллов (рис. 4) видно, что выявленные поверхностные образования представляют рельефные конгломераты и тонкодисперсные (крупностью менее 20 мкм) минералы в виде пленок в присутствии скоплений минерального вещества в трещинах и сколах.

Приведенными результатами электронной микроскопии установлено, что

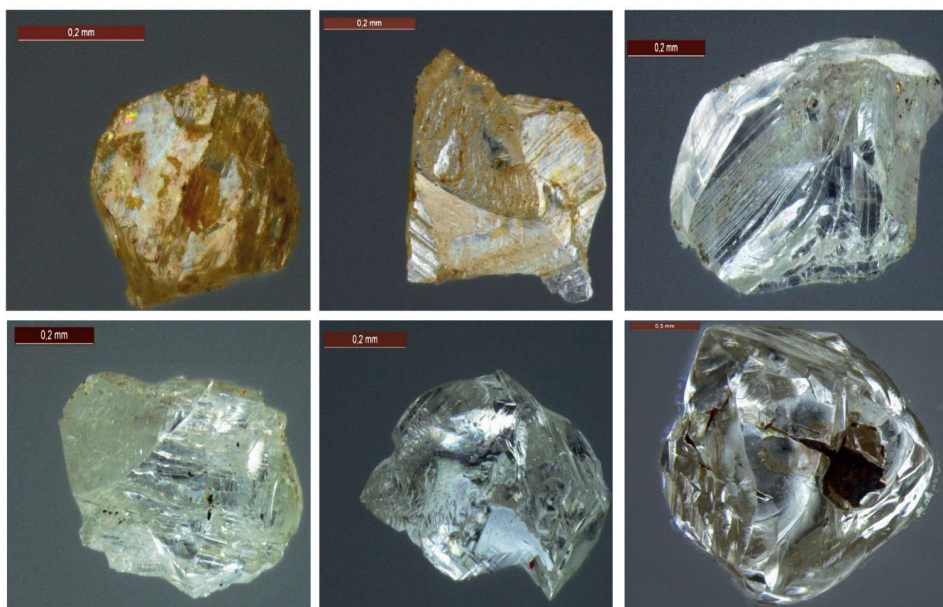


Рис. 3. Пример минеральных образований на поверхности кристаллов

Fig. 3. Diamond crystals with mineral formations on the surface

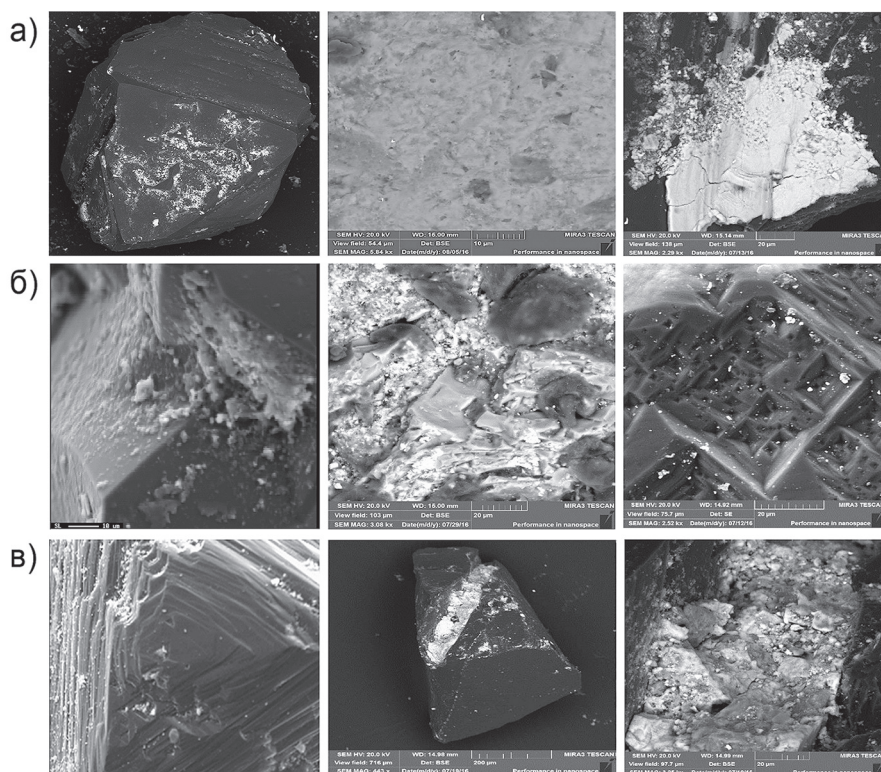


Рис. 4. Внешний вид минеральных образований на различных участках поверхности алмазных кристаллов: ровные участки (а); впадины, трещины и сколы (б); ступени роста кристалла и впадины (в)
 Fig. 4. Appearance of mineral formations in different areas of the surface of diamond crystals: flat areas (a); depressions, cracks and chips (b); crystal growth steps and cavities (v)

мелкозернистые покрытия наиболее часто расположены в вогнутых участках поверхности кристалла, выпуклые участки которой часто полностью лишены пленок. В среднем поверхность изученных гидрофильных кристаллов характеризуется значительными распространениями шламовых пленок при наличии в естественных природных трещинах и впадинах хорошо закрепленного минерального материала.

В результате анализа результатов данного комплекса экспериментов выявлены минеральные образования на поверхности исследуемых алмазов, представленные в виде шламовых силикатно-карбонатных (рис. 5), алюмосиликатных и кальциевых (рис. 6) комплексов.

Данными микрорентгеноспектрального анализа определен химический состав минеральных силикатно-карбонатных образований (рис. 5, а):

- в химическом составе силикатных образований (рис. 5, б) представлены в основном соединения: SiO_2 (26,3%); MgO (11,7%) в присутствии: FeO (6,2%); K_2O (5,7%); Al_2O_3 (8%); TiO_2 (2,4%). Установлена концентрация воды до 30%;

- в химический состав карбонатных образований (рис. 5, в) представлены в основном соединения: MgO (20,8%); CaO (29,5%) в присутствии SiO_2 (2,6%); FeO (4%); Al_2O_3 (0,9%). Концентрация воды установлена на уровне 35%.

Данными микрорентгеноспектрального анализа определен химический со-

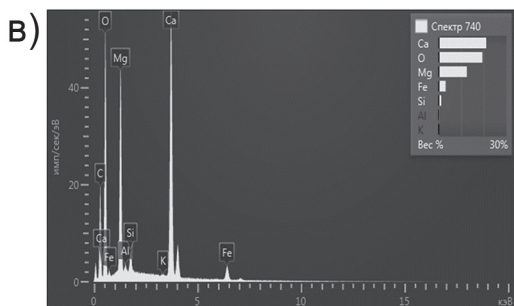
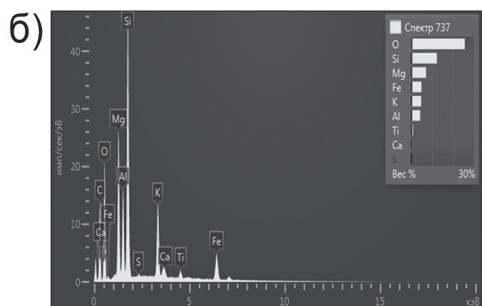
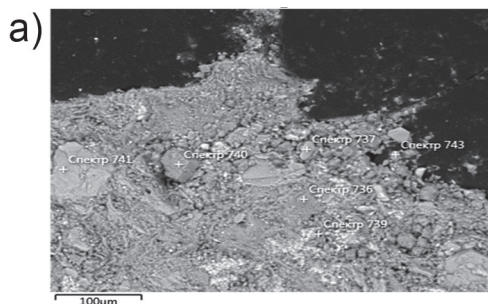


Рис. 5. Пример силикатно-карбонатных поверхностных образований на алмазе (а) и рентгеновские спектры химических элементов силикатного (б) и карбонатного (в) участков соответственно
 Fig. 5. Silicate-carbonate mineral formations on the diamond surface (a) and X-ray spectra of chemical elements of silicate (b) and carbonate (c) areas, respectively

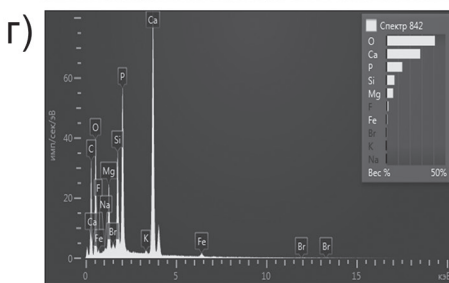
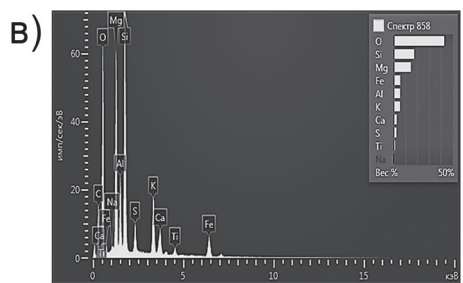
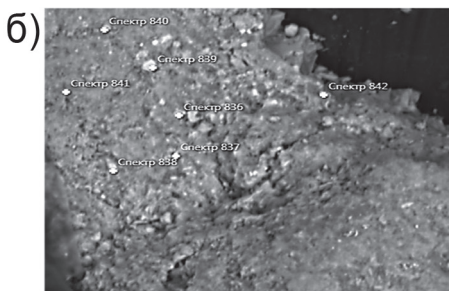
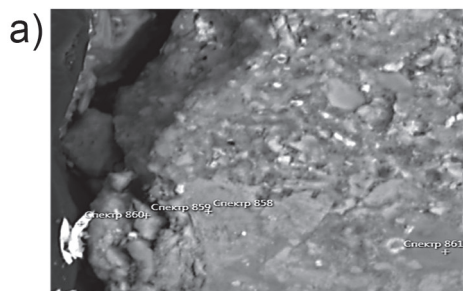


Рис. 6. Изображения (а, б) и спектрограммы (в, г) алюмосиликатной (а, в) и кальциевой (б, г) примазок на поверхности алмаза
 Fig. 6. Images (a, b) and spectrograms (c, d) of aluminosilicate (a, c) and calcium (b, d) smudges on the diamond surface

став минеральных алюмосиликатных (рис. 6, а) и кальциевых (рис. 6, б) образований:

- образования, в которых не диагностированы карбонаты (см. рис. 5, е), содержат в основном: SiO_2 (39,1%); MgO (25,4%); Al_2O_3 (12,2%); FeO (12,1%); в присутствии: K_2O (3,1%); TiO_2 (1,8%); CaO (1%); SO_2 (2,4%). Диагностировано содержание хлоритизированной слюды. Установлено содержание воды около 7%;

- образования, в которых диагностированы кальциевые соединения, (рис. 5, з), содержат в основном: CaO (50,8%); P_2O_5 (40,4%); в присутствии SiO_2 (3,2%); MgO (2,8%); FeO (0,7%); SO_2 (1,4%). Минеральные образования диагностированы как апатит. Установлено содержание воды около 7%.

Результатами анализа всего массива полученных данных установлено, что для поверхности исследуемых алмазов месторождений Накынского рудного поля характерно присутствие шламовых конгломератов силикат-карбонатно-фос-

фатного и тальк-сметитового составов, 59,1 и 60,4% соответственно (табл. 1).

Массивные и пленочные образования составляют в среднем 18,6 – 22% (табл. 1) и представлены карбонат-фосфатными минералами в присутствии до 15% железных минералов. Установленные минеральные образования фиксируются в трещинах и на неоднородных участках поверхности алмазного кристалла.

Пленочные образования присутствуют на большинстве исследуемых кристаллов и диагностированы как карбонатные в присутствии оксидов и карбонатов железа от 2,3 до 4,0% (см. табл. 1). Данный факт послужил обоснованием для рассмотрения электрохимических воздействий на оборотную воду с целью модифицирования ее параметров до значений, обуславливающих установленную ранее выполненными исследованиями возможность разрушения и удаления пленочных образований аналогичного состава с поверхности алмазных кристаллов.

Таблица 1

Характеристика диагностированных поверхностных образований

на алмазах месторождений Накынского рудного поля

Characteristics of mineral formations on the surface of diamond deposits of the Nakyn ore field

Тип минерального образования	Содержание, %	Минеральный состав, %				
		Карбонаты	Фосфаты	Гидроксиды железа	Слоистые алюмосиликаты	Глины
Проба 1						
1. Силикат-карбонат-фосфатный	50,5	3 – 27	12 – 25	0,4 – 1,8	16 – 31	15 – 44
2. Тальк-сметитовый	20,6	2 – 7	2 – 7	0,4 – 2,5	32 – 72	15 – 27
3. Рельефные сростки	17,9	22 – 43	12 – 32	1,6 – 5,7	11 – 23,3	7 – 19
4. Пленки	21,0	52 – 81	2 – 15	1,6 – 5,2	2 – 13	4 – 13
Проба 2						
1. Силикат-карбонат-фосфатный	44,2	1 – 19	11 – 27	0,7 – 1,4	11 – 26	12 – 35
2. Тальк-сметитовый	15,1	2 – 10	3 – 10	0,6 – 1,9	32 – 62	17 – 23
3. Рельефные сростки	16,4	24 – 42	13 – 33	1,9 – 7,5	11 – 24,5	9 – 20
4. Пленки	22,7	47 – 65	2 – 13	1,9 – 3,6	4 – 15	4 – 15

Характером изменения ИК-спектров исследуемых минеральных образований установлено содержание воды от 7% до 37% в порах минеральных шламовых образований. Данный факт послужил обоснованием для рассмотрения ультразвуковых воздействий в качестве одного из методов разрушения поверхностных гидрофилизирующих примесей на кристаллах, так как алмаз обладает акустическим сопротивлением, значения которого превышают значения воды в 7–10 раз, (52,5 у алмаза против 1,5 кг/(м²·с)·10⁶ у воды).

Результатами выполненных экспериментов по исследованию влияния диагностированных поверхностных образований на гидрофобность алмазов из проб различных месторождений Накынского рудного поля установлено следующее:

- значения краевого угла смачивания чистого кристалла алмаза составили 89,0–92,1°, что подтвердило гидрофобность его поверхности;
- присутствие на алмазах примесей приводит к гидрофилизации его поверхности, что подтверждается уменьшением значений краевого угла смачивания до 57,0–59,1° при наличии пленочных образований и до 48,8–49,6° при наличии рельефных образований.

Выявленные на поверхности алмазов из месторождений Накынского рудного поля минеральные образования являются по своему строению характерными для кристаллов, отличающихся высокой степенью гидрофильности и не извлекаемых в процессах липкостной сепарации.

Анализ состава примесей, вскрытых по глубине минеральных образований, показал, что подложкой для верхних слоев примазок на поверхности алмаза служит железосодержащий минерал (гетит).

Верхние силикатно-карбонатные примеси закрепляются на железосодержащей подложке в определенной последо-

вательности, соответствующей установленному ранее исследованиями ИПКОН РАН механизму кристаллизации, согласно которому основным условием для закрепления минеральных примесей на кристаллах является соответствие кристаллографических параметров поверхности алмаза и параметров кристаллизующегося на ней вещества [18].

В ИПКОН РАН на основании ранее выполненных исследований впервые разработана классификация минеральных соединений на природных алмазах кимберлитов Мирнинского рудного поля. В настоящей работе приведены результаты аналогичных экспериментов, данными обработки которых подтверждена идентичность разработанной классификации для рассматриваемых месторождений Накынского рудного поля (табл. 1).

Результатами выполненных в ИПКОН РАН экспериментальных работ также были обоснованы и апробированы в определенной последовательности электрохимические, ультразвуковые методы удаления диагностированных примесей с поверхности алмазных кристаллов в циклах липкостной сепарации [19, 20].

С учетом рекомендаций, приведенных в разработанной в ИПКОН РАН классификации, для разрушения на поверхности алмазов из месторождений Накынского рудного поля диагностированных образований в настоящих исследованиях в доводочных операциях алмазосодержащих продуктов, использующих ЛС, рекомендовано совместное применение ультразвуковых и электрохимических воздействий, обеспечивающих гидрофобизацию алмазных кристаллов и, соответственно, повышение их извлечения в соответствующий концентрат.

Апробация предложенной последовательности ЭХ- и УЗ-воздействий для восстановления гидрофобных свойств алмазов выполнена в условиях опытных

Таблица 2

Степень очистки поверхности алмазов от минеральных образований с применением УЗ- и ЭХ-воздействий
The degree of cleaning the surface of diamonds from mineral formations using ultrasonic and electrochemical effects

Условия	Удаление, %	
	силикатов	карбонатов
Без применения обработки	0	0
Использование электрохимически обработанной воды (ЭХ)	26,5	41,7
Использование ультразвуковых воздействий (УЗ)	92,2	65,2
Совместное использование УЗ и ЭХ	95,3	93,7

лабораторных и стендовых испытаний на алмазосодержащих продуктах переработки кимберлитового материала Накынского рудного поля, поступающих в доводочный цикл липкостной сепарации.

Эффективность удаления с поверхности алмазов минеральных примесей различного состава в условиях использования рассматриваемых видов обработки определена в условиях как совместного применения ультразвуковых и электрохимических воздействий, так и их самостоятельного использования (табл. 2).

Результатами исследований с применением количественной ИК-спектроскопии установлено:

- применение электрохимических воздействий на оборотную воду в процессе липкостной сепарации обеспечивает очистку поверхности алмазов на 26,5% от силикатных минералов и на 41,7% от карбонатных минералов. Эффективность применения электрохимически обработанной воды для удаления указанных минеральных образований обусловлена ее растворяющим действием на минеральные пленки карбонатного состава;

- применение ультразвуковых воздействий в процессе липкостной сепарации способствует очистке поверхности алмазов от силикатных минералов на 92,2% и на 65,2% от карбонатных минералов. Эффективность применения

ультразвуковых воздействий для удаления силикатных минералов обусловлена возможностью разрушения на поверхности кристалла шламовых гидрофилизирующих покрытий установленного состава;

- синергетический эффект от совместного применения электрохимически обработанной оборотной воды и ультразвуковых воздействий позволяет практически полностью удалить с поверхности алмазов силикатные (на 95,3%) и карбонатные (на 93,7%) минералы.

Эффективность совместного применения УЗ-воздействий и электрохимической обработки оборотной воды подтверждается увеличением значений краевых углов смачивания алмазной поверхности в среднем до 93,8°. Для сравнения, краевые углы смачивания, достигаемые при использовании электрохимически обработанной оборотной воды и ультразвуковых воздействий, не превышали в условиях эксперимента значений 68,8° и 77,3° соответственно.

Полученные данные лабораторных экспериментов подтверждены в условиях стендовых испытаний, для которых отдельным циклом исследований обоснован и установлен режим подготовки рудной алмазосодержащей пульпы к процессу извлечения из нее алмазных кристаллов методом липкостной сепарации. Основные параметры режима опытных

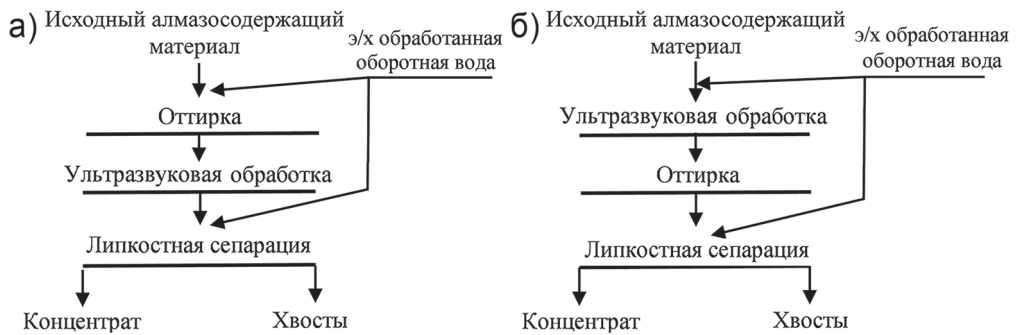


Рис. 7. Принципиальные схемы стендовой апробации процесса липкостной сепарации: оттирка, потом ультразвуковая обработка (а); ультразвуковая обработка, потом оттирка (б)

Fig. 7. Schematic diagrams of bench testing of the sticky separation process: scrubbing followed by ultrasonic treatment (a); ultrasonic treatment then scrubbing (b)

испытаний: длительность УЗ-воздействия — 1 мин, мощность — $7,5 \text{ Вт/см}^3$; электрохимическая обработка оборотной воды проведена при плотности тока 100 А/м^2 и расходе электроэнергии $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$.

Испытания выполнены на стендовой установке, включающей электролизер бездиафрагменного типа, липкостной стендовый сепаратор и ультразвуковой генератор, обеспечивающий требуемые параметры УЗ для обработки проб алмазосодержащего материала.

В период испытаний выполнены циклы контрольного и разработанного вариантов опытной липкостной сепарации.

В первом цикле испытаний технологический процесс проведен в соответствии с действующим регламентом без дополнительных воздействий.

Во втором цикле испытаний использовано электрохимическое кондиционирование оборотной воды совместно с УЗ-воздействиями на алмазосодержащий материал. Экспериментально апробированы два варианта использования электрохимически обработанной воды и ультразвуковых воздействий на алмазосодержащий материал в цикле липкостной сепарации (рис. 7).

Первая схема обеспечивала подачу алмазосодержащего сырья в процесс ЛС

последовательно через стадию оттирки в электрохимически обработанной воде и стадию ультразвуковой обработки, после которых проводился цикл липкостной сепарации (рис. 7, а).

Вторая схема обеспечивала одновременное использование стадии ультразвуковой обработки в объеме электрохимически обработанной воды, затем стадию оттирки, после которой проводился цикл липкостной сепарации (см. рис. 7, б).

Анализом полученных данных установлено, что предложенная по второму варианту схема с использованием ультразвуковых воздействий непосредственно в электрохимически обработанной воде обеспечивает максимальный прирост извлечения алмазов крупностью -6 мм в концентрат липкостной сепарации (на $6,3\%$).

Полученные в условиях стендовых испытаний данные подтвердили эффективность применения технологии совместного применения электрохимических и ультразвуковых воздействий для подготовки алмазосодержащего материала к процессу липкостной сепарации и дали основание для рекомендации ее апробации в схемах обогащения фабриках АК «АЛРОСА».

Выводы

1. Результатами выполненных аналитических исследований установлено, что минеральные примеси, присутствующие на алмазах, извлеченных из кимберлитов и россыпных месторождений Накынского рудного поля, представлены силикатно-карбонатными образованиями в присутствии значительного количества пор, заполненных водой.

2. Сравнительным анализом результатов аналогичных экспериментов, выполненных ранее на алмазах Мирнинского рудного поля, и результатов проведенных настоящих исследований на алмазах Накынского рудного поля установлена идентичность состава гидрофилизирующих минеральных образований на поверхности исследуемых кристаллов, что позволило, с учетом ранее

полученных результатов, рекомендовать к апробации совместное использование электрохимических и ультразвуковых воздействий для восстановления гидрофобных свойств поверхности алмазных кристаллов в цикле липкостной сепарации продуктов обогащения алмазосодержащего сырья Накынского рудного поля.

3. Комбинированное применение ЭХ- и УЗ-воздействий в условиях липкостной сепарации продуктов обогащения алмазосодержащего сырья Накынского рудного поля позволяет удалить с поверхности алмазов 94% гидрофилизирующих минеральных образований, что обеспечивает увеличение угла смачиваемости поверхности алмазных кристаллов на 40° и, соответственно, прирост извлечения алмазов в концентрат на 6,3%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А. Исследование минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов и условий их деструкции в процессах переработки текущих и отвальных хвостов алмазоизвлекающих фабрик // Горный журнал. — 2019. — № 2. — С. 61–65.

2. Богданович А. В., Васильев А. М., Урнышева С. А. Влияние рудоподготовки алмазосодержащих руд на технологию их обогащения // Обогащение руд. — 2017. — № 2. — С. 10–15. DOI: 10.17580/or.2017.02.02.

3. Двойченкова Г. П., Коваленко Е. Г., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А. Повышение эффективности пенной сепарации алмазосодержащего материала за счет комбинированной очистки поверхности алмазов от шламовых гидрофилизирующих покрытий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10. — С. 20–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_20.

4. Горячев Б. Е., Чекушина Т. В. Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов // Цветные металлы. — 2005. — № 1. — С. 20–23.

5. Мязин В. П., Наркелюн Л. Ф., Трубачев А. И. К проблеме геолого-технического изучения руд и критериев их обогатимости / Обогащение руд. — Иркутск: ИрГТУ, 2002. — С. 150–155.

6. Смольников В. А., Бычкова Г. М., Специус З. В. Перспективные способы повышения флотуемости алмазов // Горный журнал. — 1999. — № 5. — С. 33–36.

7. Чантурия В. А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Обогащение руд. — 2000. — № 6. — С. 3–8.

8. Tolstov A. V., Minin V. A., Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Razumov A. N. A new body of highly diamondiferous kimberlites in the Nakyn field of the Yakutian kimberlite province // Russian Geology and Geophysics. 2009, vol. 50, no. 3, pp. 162–173. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.09.001.

9. Afanasiev V. P., Pokhilenko N. P. Approaches to the diamond potential of the Siberian craton. A new paradigm // *Ore Geology Reviews*. 2022, vol. 147, no. 3, article 104980. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104980.

10. Заскевич М. В., Смольников В. Т. Технология переработки алмазосодержащего сырья в компании «Алмазы Россия – Саха» // *Горный журнал*. – 1994. – № 9. – С. 45 – 47.

11. Злобин М. Н. Состояние и некоторые пути развития технологии обогащения алмазосодержащих руд на предприятиях АК «АЛРОСА». – М.: Алмазы, 2002. – С. 59 – 63.

12. Макаровский И. В. Контроль качества очистки алмазов с помощью спектрофотометра Lambda 950 // *Горный журнал*. – 2012. – № 12. – С. 74 – 78.

13. Островская Л. Ю., Пашинин А. С., Ральченко В. Г., Бойнович Л. Б., Ашкинази Е. Е., Большаков А. П. Смачивание низкоиндексных граней алмаза: динамические измерения // *Журнал физической химии*. – 2014. – Т. 88. – № 5. – С. 822 – 829. DOI: 10.7868/S0044453714050252.

14. Wu R., Tauhiduzzaman M., Selvaganapathy P. R. Anisotropic wetting surfaces machined by diamond tool with tips microstructured by focused ion beam // *Materials & Design*. 2021, vol. 210, no. 1, article 110014. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110014.

15. Perchuk A. L., Sapagina A. V., Safonov O. G., Yapaskurt V. O., Shatsky V. S., Mal'kovets V. G. Reduced amphibolite facies conditions in the Precambrian continental crust of the Siberian craton recorded by mafic granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia // *Precambrian Research*. 2021, vol. 357, no. 4, article 106122. DOI: 10.1016/j.precamres.2021.106122.

16. Khmel'nitsky R. A., Kovalchuk O. E., Gulina Y. S., Nastulyavichus A. A., Kriulina G. Y., Boldyrev N. Y., Kudryashov S. I., Levchenko A. O., Shiryayev V. S. Optimal direction and propagation of mid-IR light inside rough and polished diamonds for highly-sensitive transmission measurements of nitrogen content // *Diamond and Related Materials*. 2022, vol. 128, article 109278. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.109278.

17. Spetsius Z. V., Bogush I. N., Kovalchuk O. E. FTIR mapping of diamond plates of eclogitic and peridotitic xenoliths from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia: genetic implications // *Russian Geology and Geophysics*. 2015, vol. 56, no. 1 – 2, pp. 344 – 353. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.01.025.

18. Chanturiya V. A., Dvoichenkova G. P., Morozov V. V. The mechanism of formation of finely dispersed minerals on the surface of diamonds and the application of electrolysis products of water systems for their destruction // *Inzynieria Mineralna*. 2019, vol. 1, no. 43, pp. 53 – 57. DOI: 10.29227/IM-2019-01-09.

19. Кириллов О. Д. К вопросу о возможности применения ультразвука в процессах обогащения полезных ископаемых // *Физика и физико-химический анализ: Сборник трудов МИЦМИЗ*. – 1957. – № 30 (1). – С. 45 – 65.

20. Faseeva G. R., Nafikov R. M., Lapuk S. E., Zakharov Yu. A., Novik A. A., Vjuginova A. A., Kabirov R. R., Garipov L. N. Ultrasound-assisted extrusion of construction ceramic samples // *Ceramics International*. 2017, vol. 43, no. 9, pp. 7202 – 7210. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.03.008. **PLAB**

REFERENCES

1. Chanturia V. A., Dvoychenkova G. P., Timofeev A. S., Podkamenny Yu. A. Investigation of mineral formations on the surface of diamond crystals and the conditions of their destruction in the processing of current and dump tailings of diamond extraction factories. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 2, pp. 61 – 65. [In Russ].

2. Bogdanovich A. V., Vasiliev A. M., Urnysheva S. A. Influence of ore preparation of diamond-bearing ores on the technology of their enrichment. *Obogashchenie Rud*. 2017, no. 2, pp. 10 – 15. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2017.02.02.

3. Dvoichenkova G. P., Kovalenko E. G., Timofeev A. S., Podkamenny Yu. A. Enhanced efficiency of diamond foam separation after complex removal of hydrophilic slime coats from

diamond surface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10, pp. 20–38. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_20.

4. Goryachev B. E., Chekushina T. V. Modern methods for assessing the technological properties of refractory and non-traditional mineral raw materials of noble metals and diamonds. *Tsvetnye Metally*. 2005, no. 1, pp. 20–23. [In Russ].

5. Myazin V. P., Narkelyun L. F., Trubachev A. I. To the problem of geological and technical study of ores and criteria for their enrichment. *Obogashcheniye rud* [Ore dressing], Irkutsk, IrGTU, 2002, pp. 150–155.

6. Smolnikov V. A., Bychkova G. M., Spetsius Z. V. Promising ways to increase the floatability of diamonds. *Gornyi Zhurnal*. 1999, no. 5, pp. 33–36. [In Russ].

7. Chanturiya V. A. Modern problems of enrichment of mineral raw materials in Russia. *Obogashchenie Rud*. 2000, no. 6, pp. 3–8. [In Russ].

8. Tolstov A. V., Minin V. A., Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Razumov A. N. A new body of highly diamondiferous kimberlites in the Nakyn field of the Yakutian kimberlite province. *Russian Geology and Geophysics*. 2009, vol. 50, no. 3, pp. 162–173. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.09.001.

9. Afanasiev V. P., Pokhilenko N. P. Approaches to the diamond potential of the Siberian craton. A new paradigm. *Ore Geology Reviews*. 2022, vol. 147, no. 3, article 104980. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104980.

10. Zaskevich M. V., Smolnikov V. T. Processing technology of diamond-containing raw materials in the Almazy Rossiya-Sakha company. *Gornyi Zhurnal*. 1994, no. 9, pp. 45–47. [In Russ].

11. Zlobin M. N. *Sostoyanie i nekotorye puti razvitiya tekhnologii obogashcheniyaalmazosoderzhashchikh rud na predpriyatiyakh AK «ALROSA»* [Status and some ways of development of technology for beneficiation of diamond-bearing ores at the enterprises of JSC «ALROSA»], Moscow, Almazy, 2002, pp. 59–63.

12. Makarsky I. V. Quality control of diamond cleaning using a Lambda 950 spectrophotometer. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 12, pp. 74–78. [In Russ].

13. Ostrovskaya L. Yu., Pashinin A. S., Ralchenko V. G., Boinovich L. B., Ashkinazi E. E., Bolshakov A. P. Wetting of low-index diamond faces: dynamic measurements. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 2014, vol. 88, no. 5, pp. 822–829. [In Russ]. DOI: 10.7868/S0044453714050252.

14. Wu R., Tauhiduzzaman M., Selvaganapathy P. R. Anisotropic wetting surfaces machined by diamond tool with tips microstructured by focused ion beam. *Materials & Design*. 2021, vol. 210, no. 1, article 110014. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110014.

15. Perchuk A. L., Sapagina A. V., Safonov O. G., Yapaskurt V. O., Shatsky V. S., Malkovets V. G. Reduced amphibolite facies conditions in the Precambrian continental crust of the Siberian craton recorded by mafic granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia. *Precambrian Research*. 2021, vol. 357, no. 4, article 106122. DOI: 10.1016/j.precamres.2021.106122.

16. Khmelnskiy R. A., Kovalchuk O. E., Gulina Y. S., Nastulyavichus A. A., Kriulina G. Y., Boldyrev N. Y., Kudryashov S. I., Levchenko A. O., Shiryayev V. S. Optimal direction and propagation of mid-IR light inside rough and polished diamonds for highly-sensitive transmission measurements of nitrogen content. *Diamond and Related Materials*. 2022, vol. 128, article 109278. DOI: 10.1016/j.diamond.2022.109278.

17. Spetsius Z. V., Bogush I. N., Kovalchuk O. E. FTIR mapping of diamond plates of eclogitic and peridotitic xenoliths from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia: genetic implications. *Russian Geology and Geophysics*. 2015, vol. 56, no. 1–2, pp. 344–353. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.01.025.

18. Chanturiya V. A., Dvoichenkova G. P., Morozov V. V. The mechanism of formation of finely dispersed minerals on the surface of diamonds and the application of electrolysis products of water systems for their destruction. *Inzynieria Mineralna*. 2019, vol. 1, no. 43, pp. 53–57. DOI: 10.29227/IM-2019-01-09.

19. Kirillov O. D. On the possibility of using ultrasound in mineral processing processes. *Fizika i fiziko-khimicheskiy analiz: Sbornik trudov MITSMIZ*, 1957, no. 30 (1), pp. 45–65. [In Russ].

20. Faseeva G. R., Nafikov R. M., Lapuk S. E., Zakharov Yu. A., Novik A. A., Vjuginova A. A., Kabirov R. R., Garipov L. N. Ultrasound-assisted extrusion of construction ceramic samples. *Ceramics International*. 2017, vol. 43, no. 9, pp. 7202 – 7210. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.03.008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Двойченкова Галина Петровна^{1,2} – д-р техн. наук,
доцент, главный научный сотрудник;

профессор, e-mail: dvoigp@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0940-3880,

Подкаменный Юрий Александрович^{1,2} – канд. техн. наук,
научный сотрудник;

доцент, e-mail: mirniy.yuriy@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4104-9113,

*Тимофеев Александр Сергеевич*¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,

e-mail: Timofeev_ac@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3382-6007,

Никитина Юлия Николаевна – ведущий инженер,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН,

² Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного
федерального университета имени М.К. Аммосова.

Для контактов: Двойченкова Г.П., e-mail: dvoigp@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.P. Dvoichenkova^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Chief Researcher;

Professor, e-mail: dvoigp@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0940-3880,

Yu.A. Podkamenny^{1,2}, Cand. Sci. (Eng.),

Researcher;

Assistant Professor,

e-mail: mirniy.yuriy@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4104-9113,

*A.S. Timofeev*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,

e-mail: Timofeev_ac@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3382-6007,

Yu.N. Nikitina, Leading Engineer,

Yakutnioproalmaz Institute of PJSC ALROSA,

678174, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia,

² Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov
North-Eastern Federal University, 678170, Mirny,
Republic of Sakha (Yakutia), Russia.

Corresponding author: G.P. Dvoichenkova, e-mail: dvoigp@mail.ru.

Получена редакцией 20.07.2023; получена после рецензии 24.08.2023; принята к печати 10.09.2023.

Received by the editors 20.07.2023; received after the review 24.08.2023; accepted for printing 10.09.2023.