

## ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ГИДРОФОБНОСТИ И ИЗВЛЕКАЕМОСТИ АЛМАЗОВ ТРУБКИ «БОТУОБИНСКАЯ»

*Е. Г. Коваленко, Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», г. Мирный, Россия;  
Г. П. Двойченкова, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия,  
Мирнинский политехнический институт — филиал Северо-Восточного федерального университета  
им. М. К. Аммосова, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия;  
В. В. Морозов, И. В. Пестряк, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва, Россия;  
В. А. Чуть-Ды, Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», г. Мирный, Россия*

**Аннотация:** Перспективным направлением решения задачи производства мелких алмазов является расширение диапазона обогащаемых классов и снижение потерь алмазов за счет применения современных технологий. Приведены результаты исследований причин сниженной гидрофобности алмазов трубки «Ботубобинская» и выбор параметров подготовки исходного питания к процессам липкостной и пенной сепарации, обеспечивающих восстановление поверхностных свойств и извлечение в концентрат гидрофиллизированных алмазов. Исследования показали, что минеральные покрытия на поверхности алмазов представляют собой прочно связанные с поверхностью алмазных кристаллов фрагменты первичных или измененных кимберлитов, а также шламы и пленки. Для алмазов из гипергенно измененных кимберлитов характерно преобладание карбонатных и алюмосиликатных минералов. Методом беспенной флотации алмазо-кимберлитовых проб показано, что применение механической оттирки достаточно эффективно для удаления шламовых покрытий, но не обеспечивает полного удаления прочно связанных с поверхности алмазов карбонатно-алюмосиликатных микробрешек. В результате проведенных исследований показано, что для более полного извлечения мелких алмазов из кимберлитов, обогащаемых на Нюрбинском ГОКе, целесообразно применение процессов механической оттирки и тепловой очистки алмазов от гидрофиллизующих покрытий для восстановления их гидрофобности. Показано, что применение сочетания этих методов обеспечивает повышение извлечения алмазов при липкостной сепарации на 14,1 % и при пенной сепарации на 20,4 %. Уровень извлечения гидрофильных алмазов (более 82 %), достигаемый при использовании технологии пенной сепарации, позволяет рекомендовать данный процесс для применения при совершенствовании технологии обогащения мелких классов алмазов.

**Ключевые слова:** алмазы, минеральные покрытия, гидрофобизация, оттирка, тепловая обработка, липкостная сепарация, пенная сепарация.

**Для цитирования:** Выбор технологии повышения гидрофобности и извлекаемости алмазов трубки «Ботубобинская» / Е. Г. Коваленко, Г. П. Двойченкова, В. В. Морозов [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 112-121. DOI: 10.56195/20793332\_2024\_3\_112\_121.

## THE CHOICE OF TECHNOLOGY TO INCREASE THE HYDROPHOBICITY AND RECOVERABILITY OF DIAMONDS OF THE BOTUOBINSKAYA TUBE

*E. G. Kovalenko, Yakutniproalmaz Institute JSK «ALROSA», Mirny, Russia;  
G. P. Dvoichenkova, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow,  
Mirny Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, Republic of Sakha  
(Yakutia), Russia;  
V. V. Morozov, I. V. Pestryak, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia;  
V. A. Chut-Dy, Yakutniproalmaz Institute JSK «ALROSA», Mirny, Russia*

**Abstract:** A promising direction for solving the problem of producing small diamonds is to expand the range of enriched classes and reduce diamond losses through the use of modern technologies. The article presents the results of research on the causes of reduced hydrophobicity of Botuobinskaya tube diamonds and the choice of parameters for preparing the feedstock for the processes of sticky and foam separation, ensuring the restoration of surface properties and extraction of hydrophilized diamonds into concentrate. Studies have shown that the mineral coatings on the surface of diamonds are fragments of primary or modified kimberlites, as well as slurries and films, firmly connected to the surface of diamond crystals. Diamonds from hypergenically altered kimberlites are characterized by the predominance of carbonate and aluminosilicate minerals. It has been shown by the method of unrestricted flotation of diamond-kimberlite samples that the use of mechanical scrubbing is effective enough to remove slurry coatings, but does not provide complete removal of car-

bonate-aluminosilicate microbreccias firmly bound to the surface of diamonds. As a result of the conducted research, it is shown that for a more complete recovery of small diamonds from kimberlites enriched at the Nyurbinsky GOK, it is advisable to use the processes of mechanical stripping and thermal cleaning of diamonds from hydrophilizing coatings to restore their hydrophobicity. It is shown that the use of a combination of these methods provides an increase in diamond recovery during sticky separation by 14.1 % and during foam separation by 20.4 %. The level of recovery of hydrophilic diamonds (more than 82 %) achieved using foam separation technology allows us to recommend this process for use in improving the technology of enrichment of small classes of diamonds.

**Keywords:** diamonds, mineral coatings, hydrophobization, scrubbing, heat treatment, sticky separation, foam separation.

**For citation:** Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Morozov V. V., et al. The choice of technology to increase the hydrophobicity and recoverability of diamonds of the Botuobinskaya tube. Surveying and subsoil use. 2024;(3):112-121. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332\_2024\_3\_112\_121.

**П**ерспективным направлением повышения эффективности алмазобогащательных предприятий является увеличение производства мелких алмазов [1]. В АК «Алроса» нашла широкое применение технология пенной сепарации алмазов, позволяющая снизить границу обогащаемого класса до 0,5 мм. Перспективным резервом увеличения производства мелких алмазов на новых и действующих обогащательных фабриках является процесс пенной сепарации [2, 3]. На сегодня нижняя граница обогащаемого класса на Нюрбинском ГОКе (методом липкостной сепарации) составляет 1 мм. Алмазы крупностью менее 1 мм не извлекаются, причиной чего является их недостаточно высокая гидрофобность и флотируемость. По той же причине не достигает плановых показателей извлечение алмазов в процессе липкостной сепарации.

С учетом исследований, проведенных на обогащательных фабриках Мирнинского и Айхальского ГОКов, вероятной причиной сниженной флотируемости алмазов является покрытие их поверхности гидрофильными минеральными образованиями различного происхождения [4, 5]. На поверхности алмазов присутствуют изначально или формируются в ходе технологического процесса рельефные и пленочные минеральные образования, которые снижают гидрофобность кристаллов алмазов и снижают их извлечение при липкостной и пенной сепарации [6].

Восстановление природной гидрофобности алмазов достигается путем тепловой обработки, а также приданием водной среде растворяющих свойств путем ее электрохимической обработки [7, 8]. Выбор технологии восстановления природной гидрофобности алмазов определяется характером гидрофильных покрытий и в первую очередь прочностью связи минералов с поверхностью алмаза, которая существенно различается для покрытий, прочно связанных с поверхностью кристаллов алмазов через промежуточные кристаллические соединения и покрытий, связанных с поверхностью алмазов силами адгезии [7, 9].

**Цель исследования:** оценка возможности применения различных способов подготовки исходного питания к процессам липкостной и пенной сепарации.

**Задачи исследования:** определение состава поверхностных соединений и выбор способов и параметров процессов восстановления гидрофобности алмазов и повышения их флотируемости.

**Объект исследований:** алмазы крупностью  $-2 + 0,5$  мм, извлеченные из алмазо-кимберлитовых проб эксплоразведочных скважин горизонтов +175 - +85 м трубки «Ботуобинская».

### Методики исследований

Исследования минерального состава образований на поверхности алмазов выполнялись путем применения метода растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа в лаборатории научно-исследовательского геологоразведочного предприятия АК «АЛРОСА» с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Mira 3 LMU. Для проведения рентгеноспектрального микроанализа применяли энергодисперсионный спектрометр Advanced Aztec Energy IE350 на базе детектора X-MAXN (компании Oxford Instruments, Ltd) [10]. Особенностью применяемой методики является возможность прецизионного анализа тонкого поверхностного слоя на алмазах толщиной 2-3 нм, а также возможность диагностировать различные химические вещества в выбранных участках исследуемых образцов [11].

Для прямого анализа минерального состава гидрофилизирующих покрытий на алмазах была применена методика ИК-спектроскопии в диапазоне 600-4500 см<sup>-1</sup> с использованием Фурье-спектрометра Nicolett 6700 (фирмы Thermo Fisher Scientific). Применение ИК-Фурье-спектроскопии является действенным методом определения состава минеральных объектов на поверхности алмаза [12].

Для анализа влияния условий подготовки пробы на изменение гидрофобности алмазов использовалась методика флотации в трубке Халлимонда [13]. Предварительная обработка алмазо-кимберлитовой смеси (исходной пробы) проводилась в термостатированной ячейке с вертикальной мешалкой с регулируемым числом оборотов. Обесшламливание пробы проводилось путем декантации водной фазы со шламами через 20 с отстаивания.

Для проведения лабораторных исследований процесса липкостной и пенной сепарации алмазосодержащих проб были применены лабораторный барабанный липкостной сепаратор и пенный сепаратор с объемом камеры 1 л, а также специальное технологическое оборудование: оттирочная машина роторного типа, парогенератор, термостатированная ячейка-кондиционер. Методики лабораторных исследований с применением пенной сепарации подробно описаны в работах [7-9].

### Разработка методики количественной оценки минерального состава образований на поверхности алмазов по данным рентгеноэлектронного микроанализа

Основным недостатком известных методов анализа минерального состава поверхностных образований на алмазах является затрудненность дифференцированного определения состава отдельных микрообразований, что необходимо

для идентификации их генезиса и выбора методов удаления с поверхности алмазов. С учетом высокой точности и поверхностного разрешения метода рентгеноэлектронной сканирующей микроскопии было предложено использовать получаемые этим методом данные об элементном составе отдельных участков покрытий для определения их минерального состава. Для оценки минерального состава покрытий на поверхности алмазов было предложено использование методики расчета, определяющей схожесть химического состава анализируемых объектов к составу представительных групп минералов (метод базовых минеральных групп).

Технологические характеристики базовых минеральных групп, представленные в *таблице 1*, с одной стороны, позволяют учесть генезис покрытий, приводящих к гидрофилизации алмазов, с другой — определить рациональные технологии восстановления природной гидрофобности алмазов и способов предотвращения повторной гидрофилизации. Именно этим отличается предложенная классификация от других, предполагающих формирование групп только по генезису [14].

Группа карбонатных минералов характеризуется прочным срастанием с поверхностью алмазов и наибольшей склонностью к кристаллизации в пересыщенных растворах [8, 15]. Группа алюмосиликатов характеризуется участием в микробрекчиях, прочно связанных с поверхностью алмаза, так и склонностью к налипанию шламовых классов на поверхности алмазов [7, 16]. Группа оливинов и пироксенов в меньшей степени склонна к налипанию на поверхность алмазов. Группа минеральных солей (преимущественно хлоридов и сульфатов) характеризуется способностью кристаллизоваться в поровых пространствах поверхностных образований из водных сред с предельно высокой концентрацией солей.

Для выбора параметров идентификации выбранных минеральных групп были учтены известные данные о химическом составе основных минералов, а также характерных соотношений между этими параметрами. Согласно данным работы [17], в кимберлитах прослеживается как положитель-

ная, так и отрицательная корреляция MgO и CaO в их составах. В последнем случае концентрация MgO проявляет положительную корреляцию с SiO<sub>2</sub>, а CaO — с CO<sub>2</sub>. На основе этих фактов кимберлиты часто рассматриваются как смесь двух составляющих: ультраосновной оливин-ортопироксеновой (гарцбургитовой) и карбонатной (кальцитовой или доломитовой). Поэтому при выборе комбинированных параметров состава покрытий для их использования в качестве критериев принадлежности были выбраны сумма кальция и магния (характерных карбонатным минералам) и сумма алюминия и кремния (характерных алюмосиликатным минералам). Для определения солеобразных хлоридов рассчитывалась сумма массовых долей калия, натрия и хлора. Для более четкого определения оливинов и пироксенов использовался критерий разности содержаний кальция и магния.

Массовая доля железа и серы была использована в качестве критерия самостоятельной минеральной фазы, несмотря на малую представительность (единичные образования). Значения содержаний серы и железа также были использованы в качестве вспомогательных при определении основных минеральных групп.

Средние значения указанных параметров по пяти минеральным группам, полученные экспериментальным путем, использовались в качестве базовых при оценке минерального состава методом минеральных групп (*табл. 2*).

Системный анализ минерального состава отдельных образований и усредненных данных на поверхности алмазов проводился по данным анализа элементного состава с использованием метода принадлежностей [18], адаптированного для конкретных условий. Этот метод позволяет использовать данные, которые характеризуют пробу как совокупность (смесь) пяти минеральных групп с определением доли каждой минеральной группы в пробе.

Согласно алгоритму, первоначально определяется отклонение параметров пробы и базовых минеральных групп по основным параметрам диагностики (*табл. 2*). Уравнение для расчета отклонения S1 параметров пробы от параметров

Таблица 1 / Table 1

**Основные технологические характеристики базовых минеральных групп, заложенные в модель при анализе минеральных образований на алмазах**

**The main technological characteristics of the basic mineral groups incorporated into the model in the analysis of mineral formations on diamonds**

| № п/п | Минеральная группа                                  | Кимберлиты             | Форма присутствия на алмазах | Склонность к адгезии на алмазах | Удаление образований с алмазов  | Склонность к кристаллизации на алмазах |
|-------|-----------------------------------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|
| 1     | Карбонаты / Carbonates                              | Измененные             | РПО, пленки                  | Средняя                         | Термическое и электрохимическое | Высокая                                |
| 2     | Алюмосиликаты / Aluminosilicates                    | Первичные              | РПО, шламы                   | Высокая                         | Термическое и механическое      | Средняя                                |
| 3     | Минеральные соли / Mineral salts                    | Первичные и измененные | Поровый материал в покрытиях | Низкая                          | Термическое                     | Средняя                                |
| 4     | Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes        | Первичные              | РПО и шламы                  | Средняя                         | Механическое                    | Нет                                    |
| 5     | Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides | Первичные и измененные | РПО и шламы                  | Средняя                         | Механическое                    | Низкая                                 |

РПО – рельефные поверхностные образования

Основные технологические характеристики базовых минеральных групп, заложенные в модель при анализе минеральных образований на алмазах

The main technological characteristics of the basic mineral groups incorporated into the model in the analysis of mineral formations on diamonds

| № п/п | Минеральная группа / Mineral group                  | $\alpha_{Ca+Mg}$ – сумма содержаний кальция и магния / the sum of the calcium and magnesium contents, % | $\alpha_{Al+Si}$ – сумма содержаний алюминия и кремния / the sum of aluminum and silicon contents, % | $\alpha_{Fe}$ – содержание железа / iron content, % | $\alpha_S$ – содержание серы / sulfur content, % | $\alpha_{Na+Cl}$ – сумма содержаний натрия и хлора / the sum of the sodium and chlorine contents, % | $\alpha_{Mg-Ca}$ – разность содержаний магния и кальция / the difference in the contents of magnesium and calcium, % |
|-------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Карбонаты / Carbonates                              | 40                                                                                                      | 0,1                                                                                                  | 0,3                                                 | 0,2                                              | 0,1                                                                                                 | 2,3                                                                                                                  |
| 2     | Алюмосиликаты / Aluminosilicates                    | 5                                                                                                       | 33                                                                                                   | 1,3                                                 | 0,2                                              | 0,3                                                                                                 | 5,0                                                                                                                  |
| 3     | Минеральные соли / Mineral salts                    | 5,0                                                                                                     | 2,0                                                                                                  | 0,2                                                 | 1,0                                              | 60,0                                                                                                | 0,4                                                                                                                  |
| 4     | Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes        | 50,5                                                                                                    | 13,5                                                                                                 | 5,2                                                 | 0,3                                              | 0,5                                                                                                 | 40,0                                                                                                                 |
| 5     | Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides | 3                                                                                                       | 0,1                                                                                                  | 65                                                  | 9                                                | 0,1                                                                                                 | 0                                                                                                                    |

минеральной группы 1 в выбранном шестипараметрическом пространстве имеет вид

$$S1 = \sqrt{\begin{aligned} & (k_1(\alpha_{Ca+Mg} - \alpha_{Ca+Mg}^1)/\alpha_{Ca+Mg}^1)^2 + \\ & (k_2(\alpha_{Si+Al} - \alpha_{Si+Al}^1)/\alpha_{Si+Al}^1)^2 + \\ & (k_3(\alpha_{Fe} - \alpha_{Fe}^1)/\alpha_{Fe}^1)^2 + \\ & (k_4(\alpha_S - \alpha_S^1)/\alpha_S^1)^2 + \\ & (k_5(\alpha_{Na+Cl} - \alpha_{Na+Cl}^1)/\alpha_{Na+Cl}^1)^2 + \\ & (k_6(\alpha_{Mg-Ca} - \alpha_{Mg-Ca}^1)/\alpha_{Mg-Ca}^1)^2 \end{aligned}} \quad (1)$$

где  $\alpha^1$  (Ca+Mg, Al+Si, Fe, S, Na+Cl, Mg-Ca) – содержания в минеральной группе 1 кальция и магния, алюминия и кремния, железа; содержания серы, натрия и хлора, разность содержаний магния и кальция;  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния содержания определенного компонента на общий результат.

С использованием значения отклонений параметров пробы и пяти минеральных групп (S1-S5) рассчитываются доли принадлежности анализируемой пробы к минеральной группе каждого типа (расчетное уравнение 2), где доля принадлежности поступившей пробы к минеральной группе 1 обозначается  $d_1^P$ , минеральной группе 2 –  $d_2^P$ , минеральной группе 3 –  $d_3^P$ , минеральной группе 4 –  $d_4^P$ , минеральной группе 5 –  $d_5^P$ :

$$\begin{aligned} d_1^P &= \frac{S2 \times S3 \times S4 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_2^P &= \frac{S1 \times S3 \times S4 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_3^P &= \frac{S1 \times S2 \times S4 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_4^P &= \frac{S1 \times S2 \times S3 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_5^P &= \frac{S1 \times S2 \times S3 \times S4}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4} \end{aligned}$$

Принадлежность к минеральной группе  $d_i^P$  в используемой методике расчета отождествляется с массовой долей минеральной группы  $\gamma_i^P$  в исследуемой пробе.

#### Анализ поверхностных минеральных образований на алмазах

Методом рентгеновской микроскопии показано, что на алмазах исследуемых проб гидрофилизующие покрытия представлены образованиями различной площади, формы, структуры и толщины. Гидрофилизующие покрытия представлены как распространенными по поверхности алмаза преимущественно тонкими покрытиями, так и рельефными образованиями высотой до 400 мкм, которые сконцентрированы в трещинах, впадинах и также в смежных поверхностях в области нарушения кристаллической решетки алмаза.

Элементный и минеральный состав отдельных участков покрытий на алмазах существенно различается (рис. 1, табл. 3).

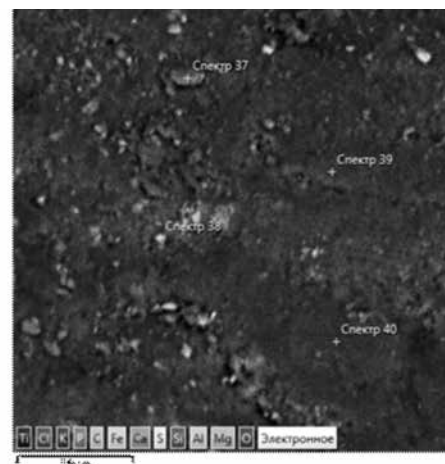


Рис. 1. Многослойная карта энерго-дисперсионной спектроскопии гидрофильного алмаза трубки «Ботуобинская»  
Fig. 1. Multilayer map of energy dispersion spectroscopy of hydrophilic diamond of the Botuobinskaya tube

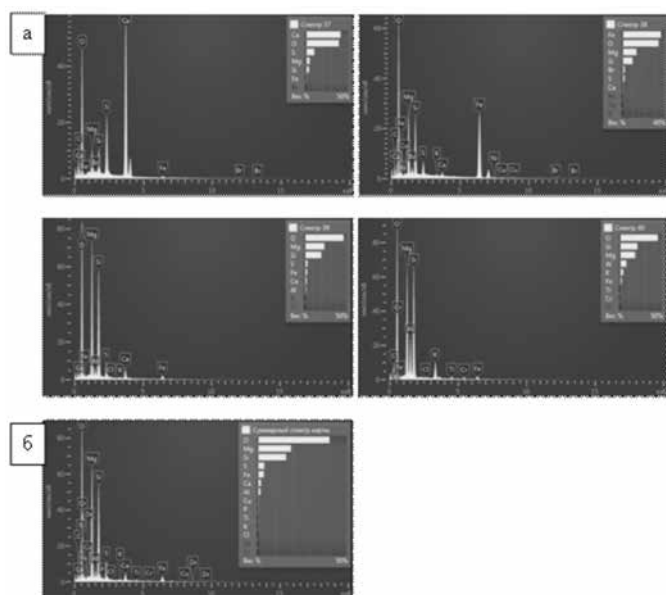


Рис. 2. Рентгеноэлектронные спектры отдельных минеральных образований (а) суммарный спектр поверхности гидрофильного алмаза (б) трубки «Ботуобинская»

Fig. 2. X-ray electron spectra of individual mineral formations (a) the total spectrum of the surface of a hydrophilic diamond (b) the Botuobinskaya tube

Таблица 3 / Table 3

**Минеральный состав участков покрытий на гидрофильном алмазе**  
**Mineral composition of coating sites on hydrophilic diamond**

| Минеральная группа / Mineral groups                 | Спектр / Spectra |      |      |      |
|-----------------------------------------------------|------------------|------|------|------|
|                                                     | 37               | 38   | 39   | 40   |
| Карбонаты / Carbonates                              | 40,6             | 13,6 | 4,9  | 4    |
| Алюмосиликаты / Aluminosilicates                    | 47,8             | 19,4 | 35,6 | 19,6 |
| Минеральные соли / Mineral salts                    | 3,3              | 1,6  | 5,1  | 5,8  |
| Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes        | 5,1              | 20,2 | 45,2 | 64,2 |
| Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides | 3,2              | 45,2 | 9,2  | 6,4  |

По результатам трансформации результатов рентгено-электронной спектроскопии анализа можно диагностировать, что рельефное образование на поверхности алмаза (спектр 37) имеет преимущественно кальций-магний карбонатный состав. Другое рельефное поверхностное образование (спектр 38) представлено окисленными минералами железа и кремнезема. В ровном участке покрытия диагностируются оливины, пироксены (спектр 39), в мелкозернистом шламовом покрытии — алюмосиликаты, оливины и пироксены (спектр 40).

Анализ суммарного состава покрытий на алмазах, извлеченных из зоны первичных кимберлитов, показал, что на них в наибольшей мере распространены оливины и пироксены, в меньшей мере — алюмосиликатные и кальциево-карбонатные минералы (табл. 3).

На поверхности гидрофильных алмазов, извлеченных из хвостового продукта, полученного при переработке гипергенно измененных кимберлитов, диагностируется существенно большее количество рельефных поверхностных образований с высотой до 300 мкм. Рельефные покрытия постороннего материала на алмазах сложены микрокристаллическим материалом микробрекчиевой структуры. Химический состав характерных поверхностных минеральных образований на алмазах из зоны интенсивных гипергенных изменений весьма неоднороден (табл. 4).

Результаты трансформации данных элементного анализа в оценку состава методом минеральных групп показывает неравномерное распределение минеральных групп (табл. 5) по поверхности алмаза. Такая неоднородность в основном обусловлена одновременным присутствием рельефных образований, представляющих собой прочно связанные с поверхностью алмазных кристаллов фрагменты первичных или измененных кимберлитов, а также шламовых и пленочных покрытий.

Анализ результатов оценки минерального состава покрытий показал, что основным минералом на поверхности алмазов, извлеченных из первичных кимберлитов, являются оливины, пироксены, алюмосиликаты и силикаты, а на алмазах, извлеченных из измененных кимберлитов, — карбонаты кальция и магния и алюмосиликаты.

Для проверки данных оценки минералогического состава покрытий на алмазах был применен метод ИК-спектроскопии. Интегральные ИК-спектры алмазов были получены

Таблица 4 / Table 4

**Химический состав поверхностных образований на поверхности алмазов (из первичных и измененных кимберлитов), %**  
**Chemical composition of surface formations on the surface of diamonds (from primary and modified kimberlites), %**

| Содержание / Content                                                         | Ca    | Mg    | Al    | Si    | S     | K+Na | Cl   | Ti    | Fe    |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| <b>Алмазы из первичных кимберлитов / Diamonds from primary kimberlites</b>   |       |       |       |       |       |      |      |       |       |
| Максимальное / Maximum                                                       | 57,3  | 38,74 | 14,82 | 44,73 | 54,20 | 4,93 | 5,66 | 1,31  | 46,91 |
| Минимальное / Minimum                                                        | 0,99  | 7,79  | 3,07  | 8,11  | 0,55  | 0,1  | 0,1  | 0,1   | 1,36  |
| Среднее / Average                                                            | 29,23 | 24,76 | <0,1  | 28,95 | 4,12  | 0,27 | 0,37 | 1,31  | 13,67 |
| <b>Алмазы из измененных кимберлитов / Diamonds from modified kimberlites</b> |       |       |       |       |       |      |      |       |       |
| Максимальное / Maximum                                                       | 50,82 | 31,32 | 13,08 | 42,68 | 70,45 | 8,21 | 6,33 | 43,36 | 67,15 |
| Минимальное / Minimum                                                        | 0,34  | 2,86  | 1,16  | 0,97  | 0,71  | 0,22 | 0,1  | 0,23  | 0,73  |
| Среднее / Average                                                            | 36,34 | 14,5  | 3,54  | 17,76 | 4,81  | 0,57 | 0,34 | 1,23  | 8,79  |

Таблица 5 / Table 5

**Характеристики варьирования параметров группового минерального состава покрытий на исследованных алмазах, %**  
**Characteristics of variation of parameters of the group mineral composition of coatings on the studied diamonds, %**

| Минеральная группа / Mineral groups                                          | Массовая доля минеральной группы / Mass fraction of the mineral group |                        |                   |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|
|                                                                              | Минимальная / Minimum                                                 | Максимальная / Maximum | Среднее / Average |
| <b>Алмазы из первичных кимберлитов / Diamonds from primary kimberlites</b>   |                                                                       |                        |                   |
| Карбонаты / Carbonates                                                       | 1,5                                                                   | 67,6                   | 18,6              |
| Алюмосиликаты / Aluminosilicates                                             | 3,9                                                                   | 87,4                   | 33,1              |
| Минеральные соли / Mineral salts                                             | 0,1                                                                   | 21,8                   | 2,2               |
| Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes                                 | 2,9                                                                   | 84,0                   | 41,8              |
| Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides                          | 0,1                                                                   | 60,2                   | 4,3               |
| <b>Алмазы из измененных кимберлитов / Diamonds from modified kimberlites</b> |                                                                       |                        |                   |
| Карбонаты / Carbonates                                                       | 4,2                                                                   | 77,8                   | 30,6              |
| Алюмосиликаты / Aluminosilicates                                             | 3,8                                                                   | 85,8                   | 36,5              |
| Минеральные соли / Mineral salts                                             | 0,1                                                                   | 12,5                   | 2,1               |
| Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes                                 | 0,1                                                                   | 64,3                   | 24,8              |
| Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides                          | 0,1                                                                   | 63,5                   | 5,9               |

на Фурье-спектрометре Nicolet 6700 (фирмы Thermo Fisher Scientific). Методика подготовки проб включала запрессовывание 20-25 кристаллов алмаза крупностью 0,4-0,5 мм в порошок KBr и последующее спектрофотометрирование образца в диапазоне 400-4500 см<sup>-1</sup> [19]. Результаты ИК-спектроскопии подтвердили результаты оценки минерального состава по данным рентгеноэлектронной спектроскопии и показали, что в покрытиях гидрофильных алмазов, извлеченных из первичных кимберлитов, характерно преобладание минеральных групп оливинов и пироксенов над другими минеральными группами, а для алмазов из гипергенно измененных кимберлитов характерно существенное преобладание карбонатных и алюмосиликатных минералов, что обусловлено изменяющимся составом вмещающих кимберлитов.

#### **Повышение гидрофобности алмазов за счет удаления гидрофильных минеральных покрытий**

В качестве перспективных способов очистки поверхности алмазов были рассмотрены процессы интенсивной механической оттирки в высокоскоростном активаторе с применением реагентов-диспергаторов, а также теплового кондиционирования питания пенной сепарации.

Применение механической оттирки для очистки поверхности минералов хорошо зарекомендовало себя при подготовке кварцевого сырья [20]. Были получены положительные результаты и при использовании механической активации (оттирки) для алмазосодержащего сырья [5, 16]. В процессе оттирки дезинтегрируются малопрочные полиминеральные агрегаты и могут разрушаться зерна малой прочности. При-

менение теплового кондиционирования питания пенной сепарации было изучено и апробировано на обогатительной фабрике № 3 Мирнинского ГОКа. Обнаруженное повышение флотуемости алмазов связывается в основном с удалением рельефных поверхностных образований вследствие проявления термомеханического разрушающего эффекта. Отмечается также возможность увеличения растворимости карбонатных пленок на поверхности алмазов при электрохимической обработке оборотной воды [8]. Очистка алмазов и восстановление их природной гидрофобности в процессах липкостной сепарации достигаются также с применением виброакустической обработки исходного питания в сочетании с электрохимическим кондиционированием оборотной воды [16].

Для оценки влияния выбранных способов и режимов обработки на гидрофобность алмазов использовалась методика флотации в трубке Халлимонда [13]. В данной методике флотуемость алмазов отождествляется с их гидрофобностью, которая проявляется, как в технологических процессах пенной и липкостной сепарации. Особенностью выбранной методики является возможность использования представительных проб алмазов (более 50 кристаллов в одном опыте) в смеси с кимберлитом и получение результатов в приближенных к реальным технологическим процессам показателях (извлечении в концентрат). Перед проведением экспериментов алмазо-кимберлитовая проба с крупностью алмазов 0,5-0,65 мм и кимберлита крупностью 0,7-1 мм выдерживалась в течение 1 часа в оборотной воде с высокой концентрацией кимберлитовых шламов (5 %). Такие условия принципиально соответствовали режиму подготовки исходного продукта в промышленных условиях [4, 5].

Предварительная тепловая и механическая обработка исходной алмазо-кимберлитовой пробы проводилась в термостатированной ячейке с вертикальной роторной мешалкой с регулируемым числом оборотов. Обесшламливание обработанной пробы проводилось путем декантации водной фазы через 30 с отстаивания.

Результаты экспериментов показали, что очищающее действие тепловой обработки относительно поверхности алмазов от шламов проявляется при нагревании выше 40°C как без использования механической оттирки, так и с ее применением (рис. 3). Наибольший эффект наблюдается при температуре 80-90°C. Извлечение кимберлита в концентрат в проведенных экспериментах составляло около 1,5 % и не изменялось более чем на 0,2 %, что не позволяло считать данные по влиянию механической и тепловой обработки на флотуемость кимберлита достоверными ( $R^2 = 0,23-0,38$ ).

Результаты экспериментов также показали, что очищающее действие оттирки проявляется при продолжительности обработки 40-60 с как без использования тепловой обработки, так и при одновременном использовании оттирки и тепловой обработки (рис. 4). Необходимо отметить, что при более продолжительном применении оттирки наблюдается некоторое снижение гидрофобности алмазов и их флотуемости, что ставит задачу определения оптимального диапазона продолжительности оттирки.

Таким образом, результаты опытов по беспенной флотации показали возможность увеличения гидрофобности алмазов при использовании выбранных видов обработки. Мак-

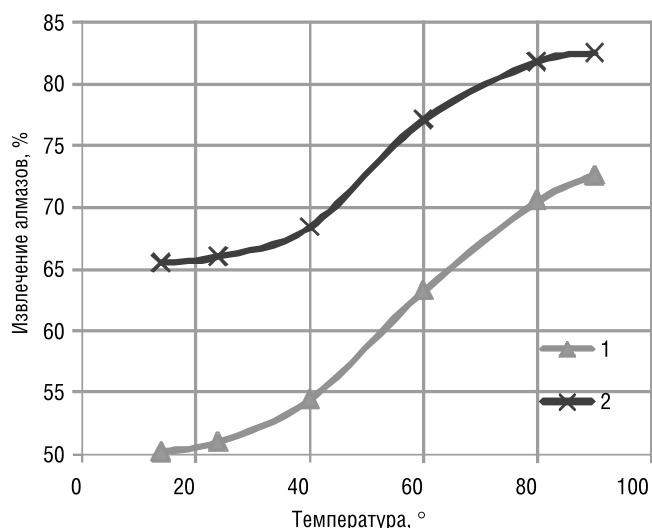


Рис. 3. Влияние температуры тепловой обработки на флотуемость гидрофилизованных алмазов: 1 - без применения оттирки; 2 - при применении оттирки в течение 60 с

Fig. 3. The effect of heat treatment temperature on the floatability of hydrophilized diamonds: 1 - without the use of a scrubbing; 2 - when applying a scrubbing for 60 seconds

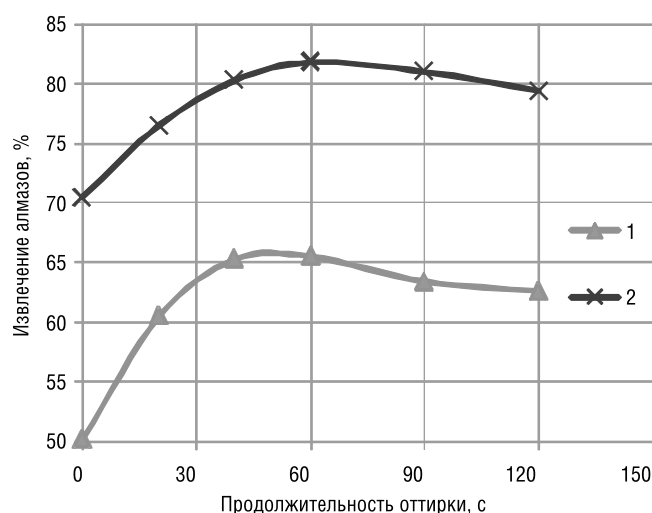


Рис. 4. Влияние продолжительности механической активации (оттирки) на флотуемость гидрофилизованных алмазов: 1 - без использования тепловой обработки; 2 - с использованием тепловой обработки при 83°C

симальный прирост флотуемости алмазов наблюдается при сочетании нагрева пробы до 60-90°C и механической оттирки в течение 40-60 с (рис. 3, 4). Такой эффект, по-видимому, связан с одновременным удалением шламов и тонких карбонатных пленок [5, 7, 9].

Выбранные режимы подготовки алмазов к флотации были проверены на установках липкостной и пенной сепарации на алмазосодержащих пробах кимберлитов. Методика приготовления пробы включала операцию механического обесшламливания, проводимую в роторном активаторе в течение 20-120 с. Перед оттиркой пробу нагревали до температуры 60-85°C и выдерживали в течение 60 с. После оттирки

водную фазу со шламами удаляли декантированием. Для процесса липкостной сепарации использовали алмазо-кимберлитовую смесь крупностью от 1,4 до 2 мм. При проведении процесса липкостной сепарации сгущенную обесшламленную пробу подавали на барабанный сепаратор, покрытый липким составом, состоящим из петролатума (59 %), октола (12 %) и индустриального масла И-40 (29 %).

При проведении процесса пенной сепарации сгущенную обесшламленную алмазо-кимберлитовую пробу крупностью 1,4-1,7 мм обрабатывали собирателем – мазутом флотским Ф-5 при расходе 1000 г/т исходного питания. В водную фазу пульпы добавляли вспениватель – ОПСБ при концентрации 50 мг/л. Результаты опытов показали эффективность выбранных режимов подготовки алмазосодержащих проб к операциям липкостной и пенной сепарации. Сочетание механической оттирки и тепловой обработки при добавках реагентов – диспергаторов шламов является эффективным способом подготовки алмазосодержащих продуктов к пенной сепарации, обеспечивающим заметный прирост извлечения алмазов (табл. 6).

Таблица 6 / Table 6

**Влияние механической оттирки и тепловой обработки на результаты липкостной и пенной сепарации**

**The effect of mechanical scrubbing and heat treatment on the results of sticky and foam separation**

| № | Продолжительность оттирки, с / The duration of the scrubbing, s | Температура обработки / Processing temperature, °C | Извлечение в концентрат ЛС / Recovery into a concentrate SS, % |                         | Извлечение в концентрат ПС / Recovery into a concentrate FS, % |                         |
|---|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------|
|   |                                                                 |                                                    | алмазов / diamonds                                             | кимберлита / kimberlite | алмазов / diamonds                                             | кимберлита / kimberlite |
| 1 | -                                                               | 14                                                 | 78,4                                                           | 1,13                    | 62,3                                                           | 1,33                    |
| 2 | 60                                                              | 14                                                 | 87,5                                                           | 0,98                    | 69,1                                                           | 1,35                    |
| 3 | -                                                               | 85                                                 | 86,4                                                           | 1,63                    | 72,4                                                           | 1,39                    |
| 4 | 40                                                              | 60                                                 | 92,5                                                           | 0,99                    | 77,3                                                           | 1,35                    |
| 5 | 40                                                              | 85                                                 | 93,8                                                           | 1,45                    | 82,7                                                           | 1,49                    |
| 6 | 60                                                              | 60                                                 | 91,4                                                           | 0,94                    | 77,6                                                           | 1,39                    |
| 7 | 60                                                              | 85                                                 | 92,2                                                           | 1,40                    | 82,0                                                           | 1,40                    |

Наилучшие результаты липкостной сепарации (прирост извлечения алмазов на 14,1 % при уменьшении выхода кимберлита на 0,24 %) достигаются при сочетании тепловой обработки питания липкостной сепарации при температуре 60°C и механического диспергирования в течение 40 с (табл. 6, опыт 4). Увеличение температуры обработки до 85°C (опыты 3, 5, 7) заметно увеличивает выход в концентрат кимберлита и одновременно снижает эффективность процесса за счет нагревания и деструкции липкостной мази.

Наилучшие результаты пенной сепарации (прирост извлечения алмазов на 20,4 %) достигаются при сочетании механического диспергирования в течение 40 с с тепловой обработкой питания пенной сепарации при температуре 85°C. Выход кимберлита в концентрат остается практически неизменным. Повышение температуры кимберлитового продукта до 85°C не сказывается отрицательно на процессе пенной сепарации. Напротив, повышение температуры среды в операции кондиционирования с собирателем до 30-35°C и тем-

пературы в операции пенной сепарации до 18–21°C является одной из причин улучшения показателей пенной сепарации.

Анализ энергозатрат показывает, что дополнительный расход энергии на тепловую обработку в осенне-зимне-весенний период компенсируется снижением расхода на отопление корпуса и не приводит к существенному увеличению себестоимости продукции. Оценка конечной рентабельности применения рассматриваемых технологий существенно зависит от содержания мелких алмазов в перерабатываемой руде, которое для трубки «Ботуобинская» весьма значительно.

Полученные результаты обосновывают возможность и целесообразность применения комбинированной технологии механической и тепловой обработки перед процессами липкостной и пенной сепарации с целью повышения технологических показателей обогащения мелких классов алмазов трубки «Ботуобинская» на Нюрбинском ГОКе.

#### Выводы

1. Результатами электронно-зондового рентгеноспектрального анализа и ИК-Фурье-спектроскопии показано, что основной причиной снижения гидрофобности мелких алмазов трубки «Ботуобинская» в процессе обогащения является их гидрофилизация закрепившимися минеральными покрытиями, представляющими собой прочно связанные с поверхностью алмазных кристаллов фрагменты первичных или измененных кимберлитов, а также шламовые и пленоч-

ные покрытия. Показано, что в покрытиях гидрофильных алмазов, извлеченных из первичных кимберлитов, характерно преобладание минеральных групп оливинов и пироксенов над другими минеральными группами, а для алмазов из гипергенно измененных кимберлитов характерно существенное преобладание карбонатных и алюмосиликатных минералов, что обусловлено изменяющимся составом вмещающих кимберлитов.

2. Показано, что применение механической оттирки достаточно эффективно для удаления шламовых покрытий, но не обеспечивает полного удаления прочно связанных с поверхности алмазов карбонатно-алюмосиликатных микробрекций. Установлена наибольшая эффективность одновременного применения процессов механической оттирки и тепловой очистки от гидрофилизирующих покрытий для восстановления гидрофобности алмазов. Показано, что применение сочетания этих методов обеспечивает повышение извлечения алмазов при липкостной сепарации на 14,1 % и при пенной сепарации – на 20,4 %. Уровень извлечения гидрофильных алмазов (более 82 %), достигаемый при использовании комбинированной подготовки исходного питания, позволяет рассматривать данный процесс как перспективный при обогащении алмазосодержащих кимберлитов трубки «Ботуобинская» с применением технологии липкостной и пенной сепарации на Нюрбинском ГОКе. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chanturiya, V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia / V. A. Chanturiya // Proceedings of the 29th International Mineral Processing Congress. - Moscow, 2019. - P. 3–12.
2. Краткий отчет независимых экспертов о запасах и ресурсах месторождений алмазов группы компаний «Алроса» (2018 г.) [Электронный ресурс]. - URL: [http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa\\_Independent\\_Expert\\_Report-2013.pdf](http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf) (дата обращения: 03.08.2020).
3. Отчет независимых экспертов о запасах и ресурсах месторождений алмазов группы компаний «Алроса» [Электронный ресурс]. - URL: [http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa\\_Independent\\_Expert\\_Report-2013.pdf](http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf) (дата обращения: 14.09.2023).
4. Авдохин, В. М. Современные технологии обогащения алмазосодержащих кимберлитов / В. М. Авдохин, Е. Н. Чернышева // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - № 1. - С. 465–477.
5. Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная» / В. А. Верхотурова, И. В. Елшин, А. А. Немаров [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2014. - № 8 (91). - С. 50–56.
6. Махрачев, А. Ф. Новые направления в технологии обогащения алмазосодержащего сырья на предприятиях АК «АЛРОСА» / А. Ф. Махрачев, Н. П. Ларионов, В. Б. Савицкий // Горный журнал. - 2005. - № 7. - С. 99–101.
7. Экспериментальное обоснование применения ультразвуковых и электрохимических воздействий в цикле липкостной сепарации алмазосодержащего сырья месторождений Накынского рудного поля / Г. П. Двойченкова, Ю. А. Подкаменный, А. С. Тимофеев, Ю. Н. Никитина // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 10. - С. 74–88.
8. 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 / V. Chanturiya, G. Dvoichenkova, V. Morozov, Y. Podkamenny // Journal of the Polish Mineral Engineering Society. - 2019. - Vol. 1, № 43. - P. 53–57.
9. Современные направления повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов / В. В. Морозов, Е. Г. Коваленко, Г. П. Двойченкова [и др.] // Горные науки и технологии. - 2024. - Т. 9, № 1.
10. Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Interpreting the carbon 1s spectrum / T. Gengenbach, G. Major, M. Linford, C. Easton // J. Vac. Sci. Technol. - 2021. - A 39. - P. 013204.
11. Mahoney, J. Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy / J. Mahoney, C. Monroe, A. M. Swartley // Spectroscopy Letters An International Journal for Rapid Communication. - 2020. - Vol. 53, № 10. - P. 726–736.
12. Chukanov, N. V. Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds / N. V. Chukanov, A. D. Chervonnyi. Springer International Publishing Switzerland, 2016. - 1120 p.
13. Батушкин, А. Н. Оценка собирательных свойств аполярных реагентов в аппарате беспенной флотации / А. Н. Батушкин, А. А. Байченко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2005. - № 6 (51). - С. 73–75.
14. Вторичные минералы кимберлитов / Н. Н. Зинчук, А. Д. Харьков, Ю. М. Мельник, Н. П. Мовчан. - Киев: Наукова думка, 1993. - 282 с.
15. Co-Deposition Mechanisms of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Scale in Produced Water / Y. Yan, T. Yu, H. Zhang [et al.] // Crystals. - 2021. - Vol. 11. - P. 1494.

16. Подкаменный, Ю. А. Повышение извлечения алмазов в условиях липкостной сепарации на основе комбинированного электрохимического и ультразвукового воздействия: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. А. Подкаменный. - М., 2019. - 23 с.
17. Хмельков, А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции) / А. М. Хмельков. - Новосибирск: АРТА, 2008. - 252 с.
18. Hero, A. O. Pareto-optimal methods of gene ranking / A. O. Hero, G. Fleury // VLSI Signal Processing Log. - 2004. - Vol. 38, № 3. - P. 259-275.
19. Новые применения Фурье-спектрометров / Г. Г. Горбунов, Л. В. Егорова, Д. Н. Еськов [и др.] // Оптический журнал. - 2001. - Т. 68, № 8. - С. 81-85.
20. Малуко, О. П. Обогащение кварцевых песков / О. П. Малуко, В. А. Рафийенко. - М.: Горная книга, 2014. - 55 с.

## REFERENCES

1. Chanturiya VA. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia / Proceedings of the 29th International Mineral Processing Congress. Moscow, 2019:3-12.
2. Summary report of independent experts on reserves and resources of diamond deposits of the Alrosa Group of companies (2018). Available from: [http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa\\_Independent\\_Expert\\_Report-2013.pdf](http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf) (In Russ.).
3. Report of independent experts on reserves and resources of diamond deposits of the Alrosa Group of Companies. Available from: [http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa\\_Independent\\_Expert\\_Report-2013.pdf](http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf). (In Russ.).
4. Avdokhin VM, Chernysheva EN. Modern technologies for the enrichment of diamond-containing kimberlites. *Mining information and analytical bulletin*. 2010;1:465-77.
5. Verkhoturova VA, Elshin IV, Nemarov AA, et al. Scientific substantiation and selection of the optimal option for restoring the hydrophobic properties of the surface of diamonds from the ore of the Internatsionalnaya tube. *The Bulletin of Irkutsk State University*. 2014;8(91):50-6. (In Russ.).
6. Makhachev AF, Larionov NP, Savitsky VB. New directions in the technology of enrichment of diamond-containing raw materials at ALROSA enterprises. *Mining Journal*. 2005;7:99-101. (In Russ.).
7. Dvoichenkova GP, Podkamenny YuA, Timofeev AS, et al. Experimental substantiation of the use of ultrasonic and electrochemical effects in the cycle of sticky separation of diamond-containing raw materials from deposits of the Nakynsky ore field. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;10:74-88. (In Russ.).
8. Chanturiya V, Dvoichenkova G, Morozov V, et al. 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. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*. 2019;1(43):53-7. (In Russ.).
9. Morozov VV, Kovalenko EG, Dvoichenkova GP, et al. Modern directions for improving the efficiency of foam separation of diamond-containing kimberlites // *Mining sciences and technologies*. 2024;9(1) (In Russ.).
10. Gengenbach T, Major G, Linford M, et al. Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Interpreting the carbon 1s spectrum. *J. Vac. Sci. Technol. A* 39, 013204, 2021. <https://doi.org/10.1116/6.0000682>
11. Mahoney J, Monroe C, Swartley AM. Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy. *Spectroscopy Letters An International Journal for Rapid Communication*, 2020;53(10):726-36.
12. Chukanov NV, Chervonnyi AD. Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds. Springer International Publishing Switzerland, 2016.
13. Batushkin AN, Baichenko AA. Assessment of the collective properties of apolar reagents in a non-foam flotation apparatus. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005;6(51):73-5. (In Russ.).
14. Zinchuk NN, Kharkiv AD, Melnik YuM, et al. Secondary minerals of kimberlites. Kiev: Naukova Dumka, 1993. (In Russ.).
15. Yan Y, Yu T, Zhang H, et al. Co-Deposition Mechanisms of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Scale in Produced Water. *Crystals*. 2021;11:1494.
16. Podkamenny YuA. Increasing diamond extraction under conditions of sticky separation based on combined electrochemical and ultrasonic effects. Moscow, 2019 (In Russ.).
17. Khmelkov AM. The main minerals of kimberlites and their evolution in the process of halo formation (on the example of the Yakut diamond-bearing province). Novosibirsk: ARTA, 2008 (In Russ.).
18. Hero AO, Fleury G. Pareto-optimal methods of gene ranking. *VLSI Signal Processing Log*. 2004;38(3):259-75.
19. Gorbunov GG, Egorova LV, Eskov DN, et al. New applications of Fourier spectrometers. *Optical magazine*. 2001;68(8):81-5 (In Russ.).
20. Malyuk OP, Rafiyenko VA. Enrichment of quartz sands. Moscow, 2014 (In Russ.).

## КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Коваленко Е. Г. — разработка методик, проведение испытаний, написание текста статьи; Двойченкова Г. П. — генерация идеи исследования, написание текста статьи; Морозов В. В. — разработка программы исследований, систематизация материала; написание текста статьи. Пестряк И. В. — проведение и анализ результатов спектральных исследований; Чуть-Ды В. А. — проведение экспериментальных исследований, обработка данных / Kovalenko E. G. — Development of methods, conducting tests, writing the text of the article; Dvoichenkova G. P. — Generation of the research idea, writing the text of the article; Morozov V. V. — Development of the research program, systematization of the material; writing the text of the article; Pestryak I. V. — conducting and analyzing the results of spectral studies; Chut-Dy V. A. — conducting experimental studies, data processing.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Коваленко Евгений Геннадьевич:**

кандидат технических наук,  
главный инженер института «Якутнипроалмаз»  
АК «АЛРОСА»,  
доцент.  
Мирнинский политехнический институт –  
филиал Северо-Восточного федерального университета  
им. М. К. Аммосова (МПТИ (ф) СВФУ),  
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация,  
ORCID ID 0000-0002-0320-0839,  
Scopus ID 57200340844,  
e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, kovalenkoeg@gmail.ru

**Двойченкова Галина Петровна:**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник.  
Институт проблем комплексного освоения недр РАН,  
г. Москва, Российская Федерация.  
Профессор.  
Мирнинский Политехнический институт – филиал Северо-  
Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова  
(МПТИ (ф) СВФУ),  
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация,  
ORCID 0000-0003-3637-7929,  
Scopus ID 8837172700,  
e-mail: dvoigp@mail.ru

**Морозов Валерий Валентинович:**

доктор технических наук,  
профессор,  
кафедра общей и неорганической химии.  
Университет науки и технологий МИСИС,  
г. Москва, Российская Федерация,  
ORCID 0000-0003-4105-944X,  
Scopus ID 7402759618;  
e-mail: dchmggu@mail.ru

**Пестряк Ирина Васильевна:**

доктор технических наук,  
заведующий,  
кафедра общей и неорганической химии,  
доцент.  
Университет науки и технологий МИСИС,  
Москва, Россия,  
Scopus ID 55577597700,  
ORCID 0000-0002-1745-6579,  
e-mail: spestryak@mail.ru

**Чуть-Ды Валентина Анатольевна:**

аспирант ИПКОН РАН,  
ведущий инженер-технолог,  
институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА»,  
г. Мирный, Российская Федерация,  
Scopus ID 58037854600,  
e-mail: verhoturova-vale@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kovalenko Evgeny Gennadievich:**

Candidate of Technical Sciences,  
Chief Engineer,  
«Yakutniproalmaz» Institute AC «ALROSA»,  
Associate Professor,  
Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University  
named after M. K. Ammosov,  
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation,  
ORCID ID 0000-0002-0320-0839,  
Scopus ID 57200340844,  
e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, kovalenkoeg@gmail.ru

**Dvoichenkova Galina Petrovna:**

Doctor of Technical Sciences,  
Leading Researcher,  
Institute of Problems of Integrated Development of Mineral  
Resources of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation,  
Professor,  
Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University  
named after M. K. Ammosov,  
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation,  
ORCID 0000-0003-3637-7929,  
Scopus ID 8837172700,  
e-mail: dvoigp@mail.ru

**Morozov Valery Valentinovich:**

Dr. Sci. (Eng.),  
Professor,  
Department General and Inorganic Chemistry,  
National University of Science and Technology MISIS,  
Moscow, Russian Federation,  
ORCID 0000-0003-4105-944X,  
Scopus ID 7402759618;  
e-mail: dchmggu@mail.ru

**Pestryak Irina Vasilevna:**

Doctor of Technical Sciences,  
Head of the Department of General and Inorganic Chemistry,  
Associate Professor,  
National University of Science and Technology MISIS,  
Moscow, Russia,  
Scopus ID 55577597700,  
ORCID 0000-0002-1745-6579,  
e-mail: spestryak@mail.ru

**Chut-Dy Valentina Anatolievna:**

postgraduate student of IPCON RAS.  
Leading Process Engineer,  
Yakutniproalmaz Institute AC ALROSA,  
Mirny, Russian Federation,  
Scopus ID 58037854600,  
e-mail: verhoturova-vale@mail.ru