

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ АПОЛЯРНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ НА АЛМАЗАХ

В.В. Морозов<sup>1</sup>, Е.Г. Коваленко<sup>2</sup>, И.В. Пестряк<sup>1</sup>, С.П. Лезова<sup>1</sup>, В.В. Поливанская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: dchmggu@mail.ru

<sup>2</sup> Институт «Якутнипроалмаз», Республика Саха (Якутия), Мирный

**Аннотация:** Перспективным путем повышения извлечения технических алмазов из кимберлитовых месторождений является выбор состава собирателей и определение температурных режимов их применения. С использованием разработанной методики определения эффективности закрепления апольярного собирателя показано, что определяющими факторами при флотации алмазов являются как адгезионная активность собирателя, характеризующаяся величиной краевого угла смачивания, так и устойчивость закрепления, характеризующаяся диаметром периметра смачивания капель собирателя, удерживаемой минеральной поверхностью при подъеме уровня жидкости. Показано, что важным условием устойчивого закрепления является достаточная вязкость собирателя. С использованием экстракционно-спектральной методики оценки распределения и форм закрепления собирателя определена важная роль фракции асфальтенов и нефтяных смол для устойчивого закрепления компаундного собирателя на поверхности алмазов и их флотируемости. Показано, что асфальтен-смолистая фракция концентрируется и закрепляется на поверхности алмаза, обеспечивая ее устойчивую гидрофобизацию и устойчивое закрепление компаундного собирателя. Даны рекомендации по применению системы подогрева оборотной воды и собирателя для поддержания температуры среды в операциях кондиционирования и пенной сепарации в оптимальном диапазоне 14–24 °С. Предложены собиратели на основе мазута М-40 с добавками дизельной технологической фракции и алифатических кетонов, обеспечивающие эффективную флотацию алмазов из алмазо-содержащих продуктов при низких температурах. Испытаниями разработанных собирателей КСМ-1 и КСМ-2 на автоматизированной установке пенной сепарации показана возможность увеличения извлечения алмазов в концентрат на 7,5% и сокращения расхода собирателя на 20%.

**Ключевые слова:** алмазы, пенная сепарация, компаундные собиратели, мазут, дизельная фракция, кетоны, оптическая спектроскопия, УФ-спектроскопия, ИК-спектроскопия, температура среды.

**Для цитирования:** Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Пестряк И. В., Лезова С. П., Поливанская В. В. Повышение эффективности закрепления апольярных собирателей на алмазах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 130–143. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_130.

### Enhancement of attachment efficiency of apolar collectors at diamonds

V.V. Morozov<sup>1</sup>, E.G. Kovalenko<sup>2</sup>, I.V. Pestryak<sup>1</sup>, S.P. Lezova<sup>1</sup>, V.V. Polivanskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: dchmggu@mail.ru

<sup>2</sup> «Yakutnioproalmaz» Institute, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russia

---

**Abstract:** A promising way to enhance extraction of commercial diamonds from kimberlite deposits is selecting compositions of collectors and regimes of their application temperatures. Using the procedure developed to determine attachment efficiency of an apolar collector, it is shown that the determinants of diamond flotation are both adhesion ability of the collector, defined by the value of a wetting angle, and attachment stability, characterizes by a diameter of a wetted perimeter of the collector drop held by the mineral surface at the build-up of fluid level. It is shown that the stable attachment condition is the sufficient viscosity of collectors. Using the spectrum procedure of estimating distribution and attachment of collector, the critical function of fraction of asphaltenes and petroleum resins in stable attachment of a compound collector at diamond surface and in floatability of diamonds is determined. Asphaltene–resin fraction concentrates and attaches to diamond surface, ensuring thereby steady hydrophobization of this surface and stable attachment of the compound collector. The recommendations are given for heating recycling water and collectors to maintain ambient temperature in operations of water conditioning and froth separation within an optimal range of 14–24 °C. Collectors are proposed to be based on mazut M-40 with addition of diesel process fraction and aliphatic ketones, to ensure efficient flotation of diamonds from diamond-bearing products under low temperatures. Testing of developed collectors KSM-1 and KSM-2 on an automated froth separator proves the expansibility of diamond extraction to concentrate by 7.5% and the possibility of reducing collector consumption by 20%.

**Key words:** diamonds, froth separation, compound collectors, mazut, diesel fraction, ketones, optical spectroscopy, UV spectroscopy, IR spectroscopy, ambient temperature.

**For citation:** Morozov V. V., Kovalenko E. G., Pestryak I. V., Lezova S. P., Polivanskaya V. V., Enhancement of attachment efficiency of apolar collectors at diamonds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):130-143. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_130.

---

## Введение

В процессе пенной сепарации мелких алмазов в качестве реагентов-собирателей используются нефть, водонефтяные эмульсии и темные нефтепродукты, такие как мазут флотский Ф5 [1, 2]. Нестабильность состава и связанное с этим изменение свойств применяемых собирателей на основе нефти и нефтепродуктов приводят к затруднениям при их диспергировании и закреплении на поверхности алмазов, как в режиме пенной сепарации, так и в режиме флотации, что ухудшает показатели обогащения [3, 4]. Важным условием повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов является повышение прочности и избирательности закрепления собирателя на поверхности алмазов

путем изменения их фракционного и фазового состава и, одновременно, за счет выбора и поддержания рационального температурного режима операций кондиционирования и пенной сепарации [5, 6].

Цель данного исследования — разработка модифицированных собирателей с улучшенными технологическими свойствами, достигаемыми за счет применения специальных добавок, изменяющих фазовый состав и структуру собирателя и, в конечном итоге, его адгезионную способность и устойчивость закрепления на поверхности флотируемых алмазов при пониженных температурах. Также были определены температурные режимы операций кондиционирования питания пенной сепарации с флотаци-

онными реагентами и непосредственно технологического процесса.

### Методика эксперимента

В разработанной динамической методике исследования закрепления аполярных собирателей рассматривалась система «капля собирателя – минерал – водная фаза», которая, по сути, имитирует фактический механизм процесса закрепления собирателя на поверхности алмаза в операции кондиционирования и флотации. Параметрами, определяющими прочность закрепления собирателей, в методике являлись краевой угол и диаметр периметра смачивания капли аполярного собирателя на поверхности алмаза. Измерение краевых углов с применением кювет, заполняемых водной фазой, определяет гидрофобность и олеофильность поверхности [7, 8], а измерение диаметра периметра смачивания – устойчивость закрепления капли собирателя на минеральной поверхности.

Для исследования совокупности процессов адгезии собирателя на минерале при кондиционировании (в водной фазе) и устойчивости его закрепления при воздействии внешних факторов (влияние разности плотности собирателя и ми-

нералов или силы гидродинамического отрыва в турбулентной среде) использовали специальную методику. Перед подачей капли собирателя поверхность исследуемого минерала предварительно смачивали тонким слоем воды. После нанесения капли собирателя в кювете с образцом увеличивали уровень жидкости. Часть собирателя покидала поверхность минерала и концентрировалась на границе раздела «водная фаза – воздух» (рис. 1).

Величина краевого угла характеризует адгезионную активность собирателя. Диаметр капли собирателя на поверхности минерала, коррелирующий с количеством собирателя, сохранившегося на поверхности минерала, характеризует устойчивость закрепления собирателя.

Динамическую вязкость собирателей измеряли на вибрационном вискозиметре SV-100 (A&D Company).

Для выявления количественного распределения применяемого собирателя между фазами флотационного опыта (концентратом, хвостами и водной фазой) использовали экстракционно-спектрофотометрический метод, описанный в работе [9]. Методика включала экстракцию собирателя с поверхности концен-

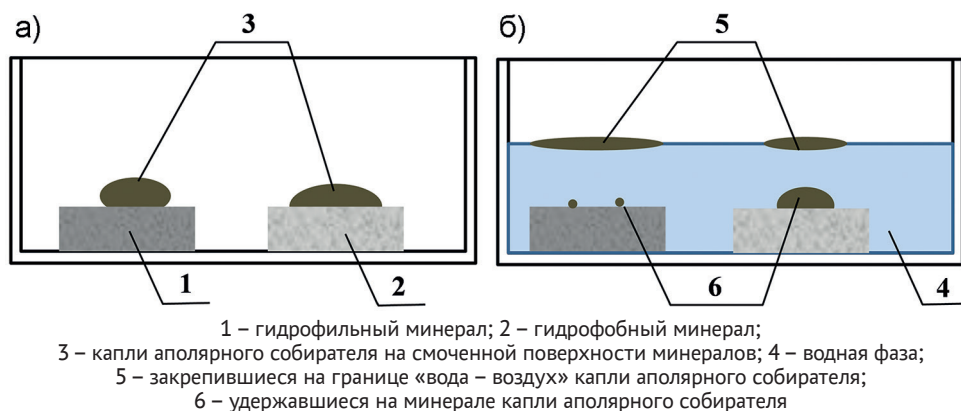


Рис. 1. Схематическое изображение минеральных образцов с собирателем при применении динамической методики измерения краевых углов:

Fig. 1. Schematic representation of mineral samples with a collector using a dynamic technique for measuring edge angles

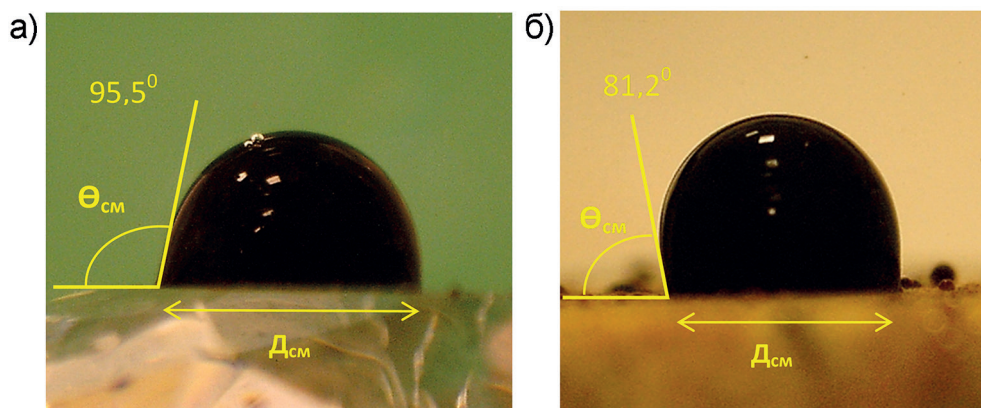


Рис. 2. Изображения капли мазута на алмазе (а) и тальке (б) в кювете, заполненной водной фазой, с результатами измерения краевого угла смачивания ( $\Theta$ ) и диаметра периметра смачивания ( $D_{см}$ )

Fig. 2. Images of a drop of fuel oil on diamond (a) and talc (b) in a cuvette filled with an aqueous phase with the results of measuring the wetting edge angle ( $\Theta$ ) and the diameter of the wetting perimeter ( $D_{вр}$ )

трата и хвостов, а также водной фазы, отфильтрованной специальным органическим растворителем (толуолом, четыреххлористым углеродом), и определение количества извлеченного реагента с помощью ультрафиолетовой (УФ) спектрофотометрии. После проведения флотационного опыта сфлотированные кристаллы алмазов подсушивали при температуре 50 °С и обрабатывали в течение 4 мин в закрытой колбе органическим экстрагентом. Из экстракта отбирали аликвоту и переносили в кювету спектрофотометра ПЭ-5400 УФ. Измеренная величина сигнала прямо пропорциональна концентрации адгезионно-активных фракций собирателя. Концентрацию собирателя получали расчетным путем по интенсивности поглощения УФ-излучения при длине волны  $\lambda = 315$  нм с использованием калибровочного графика. Для определения фракционного состава закрепившегося на алмазах собирателя использовали метод инфракрасной (ИК) спектрофотометрии навески сфлотированных кристаллов алмазов и извлеченных экстрагентом компонентов исследуемого собирателя [10].

Для исследования характера закрепления аполярного собирателя на поверх-

ности алмазов применяли метод оптической микроскопии. Снимки кристаллов алмаза с собирателем получали на микроскопе Микромед-3-ЛЮМ в комбинированном режиме освещения (в видимом и ультрафиолетовом диапазонах). Применение УФ-микроскопии позволяет диагностировать на минералах фракции асфальтенов и нефтяных смол.

Определение собирательных свойств и селективности собирателей проводилось на установке беспенной флотации (трубке Халлимонда) [11]. Для экспериментов использовались природные алмазы заданной крупности, полученные при обогащении алмазосодержащих кимберлитов. Для удаления химических реагентов с поверхности алмазов проводили комбинированную очистку их поверхности, которая включала отмычку кристаллов алмазов от органических компонентов в четыреххлористом углеводе, спирте, дистиллированной воде и последующую их химическую очистку в концентрированной соляной кислоте.

Согласно выбранной схеме эксперимента [9] проводили экстракцию собирателя с минеральной и из водной фазы флотационного процесса на установке беспенной флотации.

Оценка собирательной способности модифицированных собирателей осуществлялась на установке пенной сепарации ЛФМ-001С в институте «Якутнипроалмаз» с использованием промышленной оборотной воды в заданном интервале температур.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

#### *Определение влияния высокомолекулярных фракций на эффективность закрепления собирателя на алмазах*

Применяемые при флотации алмазов мазуты по своему составу не являются оптимальными собирателями, поэтому для повышения технологических показателей процесса пенной сепарации целесообразно модифицирование их состава и, как следствие, изменение их свойств. Ранее проведенными исследованиями было показано, что значительная часть асфальтено-смолистой фракции (АСФ), содержащейся в мазуте, находится в твердом состоянии и не принимает участия в закреплении капель мазута на алмазах [3]. В соответствии с полученными ранее результатами для повышения собирательной способности мазутов М-40 и Ф-5 было предложено перевести асфальтены из грубодисперсного состояния в коллоидную форму добавками легких фракций нефтепереработки или повышением температуры среды [5]. Перспективным направлением решения поставленной задачи является модифицирование базового собирателя добавлением в его состав бирастворимых органических соединений, например, ряда кетонов, обеспечивающих протекание процесса автодиспергирования [3].

Фракционный состав собирателя, под которым в данном случае мы понимаем соотношение фракций легких дистиллятов, нефтяных масел и асфальтенов и нефтяных смол, определяет его физи-

ко-химические свойства и, в конечном итоге, эффективность процесса пенной сепарации. Основным физико-химическим свойством аполярного собирателя в данном контексте является его адгезионная способность по отношению к поверхности алмаза, определяемая силами взаимодействия структурных единиц, находящихся в поверхностных слоях контактирующих тел, и устойчивостью закрепления собирателя на алмазах в условиях флотации и пенной сепарации [12].

Фракция асфальтенов и нефтяных смол состоит из соединений, проявляющих различные свойства. Асфальтены обычно имеют высокую полярность и не могут быть гомогенизированы или солюбилизированы в сырой нефти. Нефтяные смолы характеризуются наличием как полярной, так и неполярной части и функционируют как связующий материал, который соединяет неполярные углеводородные фракции с высокополярным асфальтеном [13]. Согласно модели Йена–Муллинза, в тяжелых нефтях формируются кластеры кристаллов асфальтена со средним диаметром 5 нм. Кластеры образуются из комбинации нескольких наноагрегатов асфальтена, связанных нефтяными смолами. Тонкодисперсные АСФ концентрируются на границе раздела фаз «нефтепродукт — минерал» и закрепляются на поверхности минералов. Зерна минералов, окруженные асфальтеном, становятся олеофильными [14]. Такой эффект является негативным при нефтедобыче, но необходимым при флотации алмазов.

Для проверки гипотезы внесения решающего вклада тонкодисперсного АСФ в процесс флотации алмазов были проведены исследования закрепления собирателя различного состава на поверхности алмазов. Закрепление и удерживание собирателя на поверхности алмазов проводили с применением разработанной динамической методики, описанной

в предыдущем разделе. В качестве базовых собирателей были выбраны мазут М-40, дизельная технологическая фракция и модифицированные собиратели, полученные разбавлением мазута М-40 дизельной технологической фракцией (ДТФ) и растворителями группы кетон — диэтилкетона (ДЭК), этилметилкетона (ЭМК) и диметилкетона (ДМК). Выбор добавок в базовые реагенты был проведен с учетом полученных ранее результатов исследований [3, 6].

Флотационные исследования проводились на навеске алмазов крупностью  $-1+0,5$  мм массой 200 мг. Время флотации составляло 4 мин, общий расход воздуха — 50 мл. Перед флотацией проводили обработку алмазов эмульсией собирателя с концентрацией 200 мг/л.

Результаты исследований показали, что использование вышеперечисленных добавок к мазуту приводит к различному изменению краевого угла и диаметра периметра смачивания капли аполярного собирателя на поверхности алмаза в водной среде. Наибольший краевой угол смачивания был зафиксирован для капли ДТФ (табл. 1, опыт 1). Для модифи-

цированного мазута М-40 краевой угол смачивания, характеризующий адгезионную способность собирателя, на  $3,5-9,6^\circ$  меньше (табл. 1, опыты 3–6).

Однако капельно закрепившийся собиратель, состоящий из ДТФ, несмотря на хорошую смачивающую способность, не демонстрирует лучшие показатели по параметрам «Доля собирателя на алмазах» и «Извлечение алмазов» (см. табл. 1). Такой результат обусловлен склонностью капель низковязкой ДТФ к переходу с границы раздела «минерал — вода» на границу раздела «воздух — вода» при подъеме уровня жидкости в кювете (см. рис. 1, б) и, как следствие, существенно меньшим значением диаметра периметра смачивания устойчиво закрепившейся на алмазе капли (см. табл. 1). Применение таких собирателей неэффективно по принципу «гистерезисного смачивания», обоснованному М.Н. Злобиным для флотации и пенной сепарации алмазов [15, 16]. Действительно, низкая вязкость собирателей на основе легких дистиллятов и нефтяных масел, в данном случае ДТФ, приводит к разрушению флотокомплексов: кристалл алма-

Таблица 1

**Параметры закрепления собирателя и процесса беспенной флотации алмазов**  
**Parameters of the collector's fixation and the foam-free diamond flotation process**

Опыт, №	Применяемый собиратель, состав	Краевой угол смачивания, град	Динамическая вязкость, мПа·с	Диаметр периметра смачивания, мм	Доля собирателя на алмазах, %	Извлечение алмазов, %
1	ДТФ	101,1	3,4–4,0 (25°C)	2,5	34	48,3
2	Мазут М-40	84,5	59,1–78,0 (80°C)	4,4	45	68,4
3	М-40-20 – мазут М-40 + 20% ДТФ	91,5	18,6–22,3 (25°C)	4,0	61	78,6
4	КСМ-1 – мазут М-40 + + 20% ДТФ + 15%ДЭК	93,4	12,5–14 (25°C)	3,9	82	92,2
5	КСМ-2 – мазут М-40 + + 20% ДТФ + 15% ЭМК	97,9	10,5–12,5 (25°C)	3,5	87	92,5
6	КСМ-3 – мазут М-40 + + 20% ДТФ + 15% ДМК	98,6	8,1–10,0 (25°C)	2,9	80	88,7

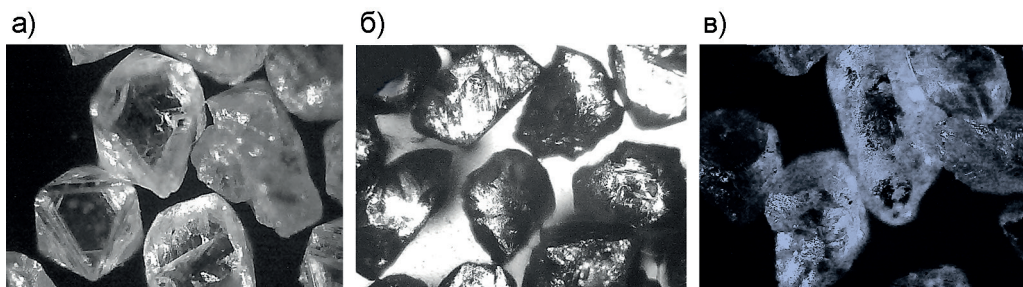


Рис. 3. Фотографии кристаллов алмазов до и после обработки собирателем (соответственно а, б) и после отмывки четыреххлористым углеродом (в) в видимом свете

Fig. 3. Photographs of diamond crystals before and after processing by the collector (a, b), respectively, and after washing with carbon tetrachloride (c) in visible light

за — воздушный пузырек в турбулентной среде, причем аполярный собиратель концентрируется на границе раздела фаз «воздух — вода» (на воздушных пузырьках) по механизму пенной экстракции и выносится из рабочей зоны флотационного аппарата.

Для определения вклада тонкодисперсного АСФ в эффективность закрепления аполярного собирателя был применен метод комбинированной оптической микроскопии. На микроскопе Микромед-3-ЛЮМ были получены изображения алмазов до и после процессов кондиционирования и флотации (рис. 3, а, б). Особенностью применяемого метода является возможность диагностирования наличия на алмазах нефтепродуктов, например, фракции нефтяных смол и ас-

фальтенов. В результате взаимодействия с собирателем, как видно на рис. 3, б, сфлотированные алмазы покрыты почти сплошным слоем собирателя. После отмывки четыреххлористым углеродом на поверхности алмазов сохраняются участки с темными по цвету покрытиями, характерными для АСФ (рис. 3, в).

В ультрафиолетовом освещении АСФ отчетливо диагностируются благодаря свечению в желтой области спектра (рис. 4).

Количественные закономерности закрепления модифицированного собирателя на алмазах были определены с применением экстракционно-спектрофотометрической методики [9]. Результаты спектральных исследований показали, что из исследованных собирателей в

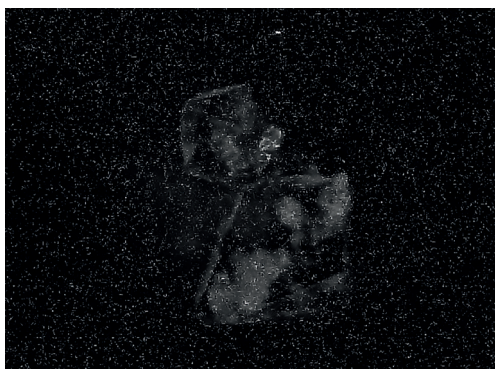


Рис. 4. Изображение кристаллов алмаза с закрепившейся асфальтено-смолистой фракцией в УФ-освещении

Fig. 4. Image of diamond crystals with a fixed asphaltene-resinous fraction in UV illumination

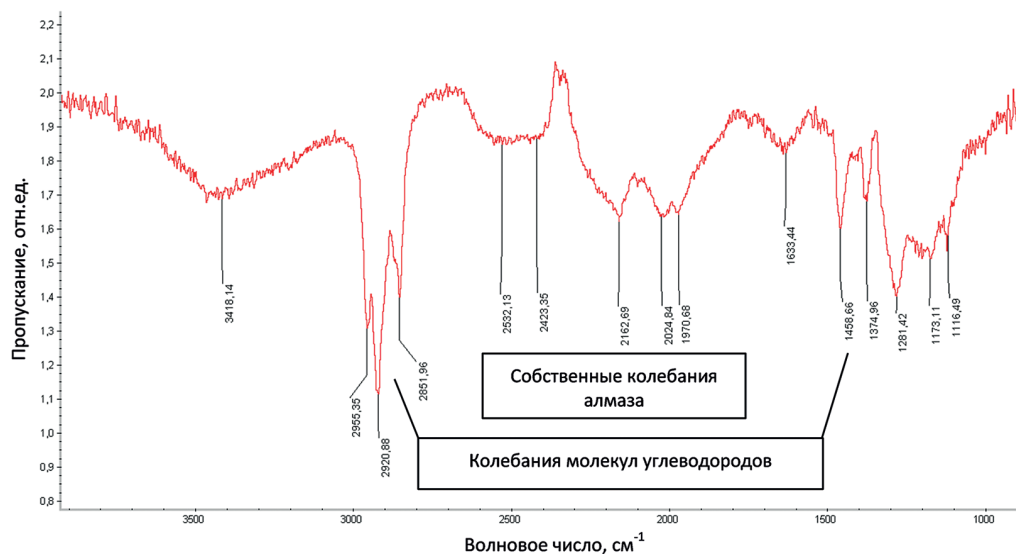


Рис. 5. ИК-спектры порошков алмазов после обработки собирателем

Fig. 5. IR spectra of diamond powders after collector treatment

наименьшей степени закрепляется на поверхности алмазов дизельная технологическая фракция (ДТФ). Так, доля ДТФ, закрепившейся на поверхности алмаза, рассчитанная по разности количества загруженного собирателя и измеренная методом УФ-спектроскопии по концентрации в экстрагенте, составляет 34% (см. табл. 1). Необходимо отметить, что после экстракции четыреххлористым углеродом ДТФ на поверхности алмаза не обнаруживается.

При использовании мазута и собирателей на его основе на поверхности алмазов закрепляется 45–87% от массы подаваемого собирателя. ИК-спектр обработанных алмазов содержит характеристические пики поглощения практически всех фракций используемого нефтепродукта (рис. 5).

После экстракции четыреххлористым углеродом на поверхности алмаза остаются высокомолекулярные смолистые вещества и асфальтены, обнаруживаемые по характеристическим пикам поглощения вблизи волновых чисел 1617, 1462 и 1377  $\text{см}^{-1}$  [10, 17]. Смолистые

вещества и асфальтены полностью не удаляются с поверхности алмазов даже при использовании в качестве экстрагентов сильных органических растворителей, например, толуола. Такой результат говорит о более сильном (чем межмолекулярное) взаимодействии АСФ с поверхностью алмаза. Данный вывод согласуется с практикой доводки алмазов после операции флотации, при которой удаление высокомолекулярных компонентов собирателя достигается только с применением высокотемпературной термической обработки [4].

Данные табл. 1 показывают, что при использовании в качестве собирателя ДТФ извлечение алмазов в концентрат было наименьшим. При применении модифицированного собирателя — смеси мазута М-40 с ДТФ и кетонами — извлечение алмазов существенно возрастает. Отчетливо видна корреляция между долей закрепившегося собирателя и извлечением алмазов (см. табл. 1). Сопоставление результатов флотационных опытов и данных физико-химических исследований позволяет сделать вывод, что



наилучшие результаты получают при использовании собирателей, характеризующихся как высоким краевым углом смачивания поверхности алмаза в водной фазе, так и относительно высокой динамической вязкостью. Именно эти параметры физико-химических характеристик собирателя обеспечивают его быстрое и устойчивое закрепление на алмазах.

*Оценка эффективности флотации и пенной сепарации модифицированными собирателями при варьировании температуры*

Важным параметром является температура среды в операциях кондиционирования алмазо-кимберлитового продукта с собирателем и в процессе пенной сепарации [5, 12]. В зависимости от климатических условий и особенностей применяемого режима, температура среды в этих операциях варьируется в интервале от 6 до 24 °С. С колебаниями температурного режима, особенно с понижением температуры в холодное время года, связывают уменьшение извлечения алмазов и увеличение расходов реагентов [18, 19].

Температура среды оказывает существенное влияние на структуру и свойства нефтепродуктов и, соответственно, модифицированных собирателей на их

основе. Общей закономерностью при повышении температуры в интервале 0–50 °С является увеличение растворимости и диспергирования твердых высокомолекулярных фракций в нефтяных маслах и низкомолекулярных фракциях [20].

Для выбора температурного режима процесса пенной сепарации были выполнены флотационные опыты при температуре 10–24 °С, что соответствует условиям пенной сепарации на промышленных предприятиях. При проведении исследований использовали базовый собиратель – мазут М-40, и модифицированные собиратели с добавками ДТФ и органических бирастворимых жидкостей.

Полученные результаты флотационных исследований показали, что при температуре 24 °С извлечение алмазов при использовании собирателей, полученных разбавлением мазута М-40 (табл. 2, опыты 2–5), выше по сравнению с опытом, где в качестве собирателя использовали мазут М-40 (табл. 2, опыт 1). При пониженных температурах (10 и 14 °С) наилучшие результаты при флотации алмазов фиксировали при применении собирателей КСМ-1, КСМ-2 и КСМ-3, полученных разбавлением мазута М-40 ДТФ (20%) и кетонами (15%).

Анализ результатов флотационных опытов показал необходимость подогре-

Таблица 2

**Извлечение алмазов при флотации с использованием модифицированных собирателей на основе мазута М-40 при различной температуре среды**  
**Recovery of diamonds during flotation using compound modified collectors based on M-40 fuel oil at different ambient temperatures**

Опыт, №	Собиратель	Извлечение алмазов в концентрат, %		
		10 °С	14 °С	24 °С
1	Мазут М-40	54,4	68,7	74,4
2	М-40-20 – мазут М-40 + 20% ДТФ	72,3	78,6	88,5
3	КСМ-1 – мазут М-40 + 20% ДТФ+ 15%ДЭК	86,3	92,2	88,4
4	КСМ-2 – мазут М-40 + 20% ДТФ+15% ЭМК	85,2	92,5	85,9
5	КСМ-3 – мазут М-40 + 20% ДТФ+15% ДМК	81,5	88,7	87,0

Таблица 3

**Извлечение алмазов при пенной сепарации алмазо-кимберлитовых продуктов при испытании модифицированных собирателей на установке ЛФМ-001С.**  
**Diamond recovery during foam separation of diamond-kimberlite products during testing of modified collectors at the LFM-001C device.**

Опыт, №	Реагент	Извлечение алмазов в концентрат, %
1	Мазут флотский Ф-5	79,4
2	ФМ-14 — мазут флотский Ф-5 +14% ДТФ	87,5
3	М-40-20 — мазут М-40 + 20% ДТФ	77,3
4	КСМ-1 — мазут М-40 + 20% ДТФ+15% ДЭК	90,2
5	КСМ-2 — мазут М-40 + 20% ДТФ+15% ЭМК	95,0

ва среды в операциях кондиционирования и пенной сепарации, а также применяемого собирателя. При отсутствии возможности повышения температуры в операциях кондиционирования, пенной сепарации целесообразно применять модифицированные собиратели КСМ-1 и КСМ-2.

Полученные результаты лабораторных исследований были проверены на установке пенной сепарации. При проведении укрупненных испытаний использовалась установка пенной сепарации ЛФМ-001С. Во время испытаний поддерживали расход собирателя от 500 до 1000 г/т, бутилового аэрофлота — 50 г/т, расход вспенивателя — 150 г/т. Осуществляли регулирование температуры оборотной воды путем ее охлаждения или подогрева до 14 °С. В качестве собирателя применяли флотский мазут Ф-5 (как базовый собиратель), модифицированный собиратель на его основе ФМ-14 и модифицированные собиратели на основе мазута М-40.

Результаты стендовых испытаний показали, что при использовании модифицированных собирателей на основе мазутов М-5 и М-40 при температуре 14 °С достигается приемлемое извлечение алмазов. Наилучшие показатели (увеличение извлечения алмазов на 7,5% относительно модифицированного собирателя

ФМ-14) достигаются при применении модифицированных собирателей вышеуказанного состава КСМ-1 и КСМ-2 (табл. 3).

Необходимо отметить, что эквивалентные показатели по извлечению алмазов достигаются в случае использования собирателей КСМ-1 и КСМ-2, при их существенно меньшем расходе (800 г/т), чем при использовании базового собирателя — флотского мазута Ф-5 (1000 г/т). Полученные результаты — повышение извлечения алмазов и сокращение расхода на 20% — подтвердили вывод, что модифицированные собиратели на основе мазута М-40 с добавками дизельной технологической фракции и алифатических кетонов наиболее эффективны для флотации алмазов из алмазосодержащих продуктов при низких температурах.

### Выводы

Предложена методика определения эффективности закрепления аполярного собирателя в условиях кондиционирования и флотации, в которой измеряемыми параметрами являются краевой угол смачивания и диаметр периметра смачивания капли собирателя, удерживаемой поверхностью минерала после увеличения уровня жидкости в кювете.

С использованием разработанной методики показано, что определяющими

факторами при флотации алмазов являются как адгезионная активность собирателя, характеризующаяся величиной краевого угла смачивания, так и устойчивость закрепления, характеризующаяся диаметром периметра смачивания каплей собирателя, удерживаемой минеральной поверхностью при подъеме уровня жидкости.

С использованием экстракционно-спектральной методики оценки распределения и форм закрепления собирателя определена важная роль фракции асфальтенов и нефтяных смол, необходимых для устойчивого закрепления собирателя на поверхности алмазов и их высокой флотируемости. Показано, что тонкодисперсная асфальтен-смолистая фракция концентрируется и закрепляется на поверхности кристаллов алмазов, обеспечивая их устойчивую гидрофобизацию и, тем самым, устойчивое закрепление собирателя.

Установлен оптимальный интервал температур среды (14–24 °С) для операций кондиционирования исходного рудного питания и пенной сепарации, обеспечивающий эффективное закрепление

собирателя и высокое извлечение алмазов в концентрат. При использовании модифицированных собирателей в выбранном температурном режиме достигнуто повышение извлечения алмазов на 2,8–6,7%, что позволило рекомендовать применение системы подогрева оборотной воды и реагентов в цикле пенной сепарации.

Предложены модифицированные собиратели для пенной сепарации алмазов, содержащие добавки регуляторов фазового состояния асфальтенов и процесса диспергирования собирателя в водной фазе. Показано, что применение мазутов с добавками дизельной технологической фракции и алифатических кетонов обеспечивает эффективное извлечение алмазов из алмазосодержащих продуктов. Испытаниями разработанных реагентных режимов, проведенными на автоматизированной установке пенной сепарации, показана возможность увеличения извлечения алмазов в концентрат на 7,5% и сокращения расходов собирателя на 20%. Положительный результат достигается также при ведении технологического процесса при низких температурах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злобин М. Н. Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 87–89.
2. Chanturiya V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia / Proceedings of 29th International Mineral Processing Congress. Moscow, 2019, pp. 3–12.
3. Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Пестряк И. В., Лезова С. П. Современные направления повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Горные науки и технологии. — 2024. — Т. 9. — № 2. — С. 134–145.
4. Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И. Обогащение алмазов // Международный журнал экспериментального образования. — 2012. — № 2. — С. 61.
5. Махрачев А. Ф. Разработка реагентов-собирателей на основе модифицированных водонефтяных эмульсий для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. 25.00.23. — М.: ИПКОН РАН, 2019. — 23 с.
6. Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Чуть-Ды В. А. Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателями // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 4. — С. 287–297.
7. Pattanaik A., Rayasam V. Application of colloids and its relevance in mineral engineering // Colloids — Types, Preparation and Applications, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95337.

8. Николаев А. А., Коньрова А., Горячев Б. Е. Исследование смачивания сфалерита, халькопирита и пирита при обработке сульфидрильными собирателями в солоноватой и морской воде // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 4. — С. 164–172.

9. Пестряк И. В., Лезова С. П., Морозов В. В. Разработка методики определения количественного содержания нефтепродуктов в процессах пенной сепарации / Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXVII Международной научно-технической конференции. — Екатеринбург, 2022. — С. 45–50.

10. Идрисов Т. С., Курбанов М. А., Кулиева У. А. Изучение воздействия УФ-излучения на смолы и асфальтеновые фракции сырой нефти методом ИК-спектроскопии // Оптика и спектроскопия. — 2020. — Т. 128. — № 12. — С. 1959–1972.

11. Ignatkina V. A., Kayumov A. A., Yergesheva N. D. Floatability and calculated reactivity of gold and sulfide minerals // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2022, vol. 63, pp. 473–481. DOI: 10.3103/S1067821222050054.

12. Кондратьев С. А. Подходы к выбору флотационных реагентов-собирателей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 5. — С. 109–124.

13. Kim S. T., Boudh-Hir M.-E., Ali M. G. The role of asphaltene in wettability reversal / Proceedings of 65th SPE Annual Technical Conference, New Orleans, LA, Sep. 23 – 26, 1990, pp. 799–809. DOI: 10.2118/20700-MS.

14. Fakher S., Ahdaya M., Elturki M., Imqam A. Critical review of asphaltene properties and factors impacting its stability in crude oil // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2020, vol. 10, pp. 1183–1200. DOI: 10.1007/s13202-019-00811-5.


15. Злобин М. Н. Разработка и промышленное освоение флотационной технологии и оборудования для извлечения алмазов из руд. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. 05.15.08. — Мирный: Якутнипроалмаз, 1995. — 50 с.

16. Мелик-Гайказян В. И., Емельянова Н. П., Козлов П. С., Юшина Т. И., Липная Е. Н. К исследованию процесса пенной флотации и подбору реагентов на основе механизма их действия. Сообщение 1. Обоснование выбранных методов исследования процесса // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. — 2009. — № 2. — С. 7–18.

17. Werkovits S., Hofer K., Schöberl T. R., Hofko B., Grothe H. How infrared and fluorescence spectroscopy can shed new light on the characterization of bitumen and its ageing processes // Road Materials and Pavement Design. 2023, vol. 25, S1, pp. 72–83. DOI: 10.1080/14680629.2023.2191730.

18. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Chanturia E. L., Timofeev A. S. Intensification of basic processes in separation of difficult diamond-bearing raw materials // Journal of Mining Science. 2023, vol. 59, no. 5, pp. 799–812.

19. Верхотурова В. А., Елшин И. В., Немаров А. А., Толстой М. Ю., Островская Г. Х., Федотов К. В., Шеломенцева Т. В. Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная» // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2014. — № 8. — С. 51–56.

20. Chandio Z., Marappa Gounder R., Mukhtar H. Temperature effects on solubility of asphaltenes in crude oils // Chemical Engineering Research and Design. 2014, vol. 94, pp. 573–583. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.09.018. 

## REFERENCES

1. Zlobin M. N. Technology of coarse-grained flotation in the processing of diamond-bearing ores. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp. 87–89. [In Russ].

2. Chanturiya V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia. *Proceedings of 29th International Mineral Processing Congress*. Moscow, 2019, pp. 3–12.

3. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Pestryak V., Lesova S. P. Modern methods of increasing the efficiency of foam separation of diamond-bearing kimberlites. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 2, pp. 134–145. [In Russ].

4. Verkhoturov M. V., Amelin S. A., Konnova N. I. Diamond enrichment. *International Journal of Experimental Education*. 2012, no. 2, pp. 61. [In Russ].

5. Makhachev A. F. *Razrabotka reagentov-sobirateley na osnove modifitsirovannykh vodonefty-nykh emul'siy dlya povysheniya effektivnosti pennoy separatsiialmazosoderzhashchego syr'ya*, [Development of collecting reagents based on modified water-oil emulsions to increase the efficiency of foam separation of diamond-containing raw materials], Candidate's thesis, Moscow, IPKON RAN, 2019, 23 p.

6. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Chut-Dy V. A. The choice of temperature conditions for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlites by compound collectors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 287–297. [In Russ].

7. Pattanaik A., Rayasam V. Application of colloids and its relevance in mineral engineering. *Colloids – Types, Preparation and Applications*, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95337.

8. Nikolaev A. A., Konyrova A., Goryachev B. E. Investigation of wetting of sphalerite, chalcopyrite and pyrite during treatment with sulphydryl collectors in brackish and seawater. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2020, no. 4, pp. 164–172. [In Russ].

9. Pestriak I. V., Lesova S. P., Morozov V. V. Development of a methodology for determining the petroleum community in foam separation processes. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya. Materialy XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Scientific foundations and practice of processing ores and man-made raw materials. Proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, 2022, pp. 45–50. [In Russ].

10. Idrisov T. S., Kurbanov M. A., Kuliyeva A. Investigation of RF radiation on resins and asphaltene fractions of crude oil by IR spectroscopy. *Optics and Spectroscopy*. 2020, vol. 128, no. 12, pp. 1959–1972. [In Russ].

11. Ignatkina V. A., Kayumov A. A., Yergesheva N. D. Floatability and calculated reactivity of gold and sulfide minerals. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2022, vol. 63, pp. 473–481. DOI: 10.3103/S1067821222050054.

12. Kondratiev S. A. Summing up the results for the selection of flotation reagents-collectors of Physico-technical problems of developing useful minerals. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 5, pp. 109–124. [In Russ].

13. Kim S. T., Boudh-Hir M.-E., Ali M. G. The role of asphaltene in wettability reversal. *Proceedings of 65th SPE Annual Technical Conference*, New Orleans, LA, Sep. 23 – 26, 1990, pp. 799–809. DOI: 10.2118/20700-MS.

14. Fakher S., Ahdaya M., Elturki M., Imqam A. Critical review of asphaltene properties and factors impacting its stability in crude oil. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020, vol. 10, pp. 1183–1200. DOI: 10.1007/s13202-019-00811-5.

15. Zlobin M. N. *Razrabotka i promyshlennoe osvoenie flotatsionnoy tekhnologii i oborudovaniya dlya izvlecheniyaalmazov iz rud* [Development and industrial development of flotation technology and improvements for extracting diamonds from ores], Doctor's thesis, Mirniy, Yakutniproalmaz, 1995, 50 p.

16. Melik-Gaikazyan V. I., Yemelyanova N. P., Kozlov P. S., Yushina T. I., Lipnaya E. N. On the study of the foam flotation process and the selection of reagents based on their mechanism of action. Message 1. Setting up the selected methods of process research. *Izvestiya. Non-Ferrous metallurgy*. 2009, no. 2, pp. 7–18. [In Russ].

17. Werkovits S., Hofer K., Schöberl T. R., Hofko B., Grothe H. How infrared and fluorescence spectroscopy can shed new light on the characterization of bitumen and its ageing processes. *Road Materials and Pavement Design*. 2023, vol. 25, S1, pp. 72–83. DOI: 10.1080/14680629.2023.2191730.

18. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Chanturia E. L., Timofeev A. S. Intensification of basic processes in separation of difficult diamond-bearing raw materials. *Journal of Mining Science*. 2023, vol. 59, no. 5, pp. 799–812.

19. Verkhoturova V. A., Elshin N. V., Nemarov A. A., Tolstoy M. Yu., Ostrovskaya G. Kh., Fedotov K. V., Shelomentseva T. V. Scientific development and selection of the optimal option for restoring the hydrophobic properties of diamonds from the ores of «Internatsionalnaya» pipes. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014, no. 8, pp. 51–56. [In Russ].

20. Chandio Z., Marappa Gounder R., Mukhtar H. Temperature effects on solubility of asphaltenes in crude oils. *Chemical Engineering Research and Design*. 2014, vol. 94, pp. 573–583. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.09.018.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Морозов Валерий Валентинович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, профессор, e-mail: dchmggu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4105-944X,

*Коваленко Евгений Геннадьевич* — канд. техн. наук, главный инженер, Институт «Якутнипроалмаз», e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, ORCID ID: 0000-0002-0320-0839,

*Пестряк Ирина Васильевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: spestryak@mail.ru,

*Лезова Светлана Павловна*<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: svlezova@mail.ru,

*Поливанская Валерия Владимировна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: vpolivaskaya@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1973-0914,

<sup>1</sup> НИТУ МИСИС.

**Для контактов:** Морозов В.В., e-mail: dchmggu@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.V. Morozov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

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

ORCID ID: 0000-0003-4105-944X,

*E.G. Kovalenko*, Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer,

«Yakutniproalmaz» Institute, 678174, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russia,

e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0320-0839,

*I.V. Pestryak*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: spestryak@mail.ru,

*S.P. Lezova*<sup>1</sup>, Senior Lecturer,

e-mail: svlezova@mail.ru,

*V.V. Polivanskaya*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: vpolivaskaya@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1973-0914,

<sup>1</sup> NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** V.V. Morozov, e-mail: dchmggu@mail.ru.

Получена редакцией 15.01.2025; получена после рецензии 19.02.2025; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 15.01.2025; received after the review 19.02.2025; accepted for printing 10.04.2025.

