



## ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-454>

УДК 622.775.4:549.211.2:661.183



### Регулирование олеофильности поверхности алмазов и минералов кимберлита добавками реагентов-регуляторов различных классов

В.А. Чантуря , В.В. Морозов , Е.Л. Чантуря , А.Л. Самусев

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,  
г. Москва, Российская Федерация

[dchmgu@mail.ru](mailto:dchmgu@mail.ru)

#### Аннотация

Цель проведенных исследований – обоснованный выбор реагентов для регулирования олеофильности поверхности алмазов и минералов кимберлита в процессах кондиционирования алмазо-кимберлитовых продуктов перед их обогащением пенной сепарацией, флотацией и рентгенолюминесцентной сепарацией с применением люминофорсодержащих реагентов-модификаторов и собирателей, основой состава которых являются аполярные коллекторы. В работе представлены результаты комплексных физико-химических исследований влияния реагентов-регуляторов различных классов на закрепление аполярных коллекторов на поверхности алмазов и минералов кимберлита (визиометрический анализ, измерение краевых углов смачивания в системе минерал – органический коллектор – водная фаза, измерение поверхностного натяжения на границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза – беспенная флотация). На основе анализа полученных данных обоснованы и выбраны эффективные реагенты-регуляторы, обеспечивающие селективность обогащения алмазов. Исследованы реагенты-регуляторы, принадлежащие к классам алкиларилфосфонатов (НТФК, ОЭДФ), аминополикарбоновых кислот (ЭДТА), катионактивных полимеров (ПЭГ-1500, Неонол АФ-9-6), полифосфатов (ТПФ), бифункционально модифицированных производных карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ 75-В и Камцел-600), смеси алкилфосфатов, алкилфосфонатов и анионных полимеров (ИС-3), ионогенных и неионогенных азотсодержащих полимеров (Эмульгатор ОП-4, Оксипав А1218.30), аминоспиртов (ТЭА), гидроксикислот (молочная кислота), четвертичных аммониевых оснований (сульфат аммония). В качестве основных минералов кимберлита, склонных к адгезии аполярных коллекторов, выбраны тальк, пирит, кальцит, мусковит, флогопит, серпентин, доломит. Установлено, что в наибольшей мере краевой угол смачивания снижают реагенты Неонол АФ-9-6, Эмульгатор ОП-4, Оксипав А1218.30, что связано с существенным снижением поверхностного натяжения границы раздела фаз органический коллектор – водная фаза. Термодинамическая оценка олеофильности минералов кимберлита, проведенная по уравнению Дюпре–Юнга с использованием результатов измерения краевых углов смачивания и поверхностного натяжения, показала, что энергия адгезии органического коллектора на минералах кимберлита при добавках реагентов-регуляторов снижается в 2–6 раз и достигает значений 6–17 Дж/м<sup>2</sup>, приближающихся к энергии адгезии воды (5 Дж/м<sup>2</sup>). На алмазах энергия адгезии аполярного коллектора при максимальных концентрациях снижается только до 17–27,5 Дж/м<sup>2</sup>, что и обуславливает его устойчивое закрепление. Результаты флотационных опытов подтвердили депрессирующую способность исследованных реагентов-регуляторов по отношению к флотоактивным минералам кимберлита. На основе анализа полученных данных выбраны и рекомендованы для апробации в промышленных режимах пенной сепарации эффективные реагенты-регуляторы, обеспечивающие повышение селективности закрепления аполярного коллектора на поверхности алмазов и минералов кимберлита: НТФК, ОЭДФ, ИС-3, ОП-4.

#### Ключевые слова

алмазы, кимберлит, минералы, коллектор, олеофильность, реагенты, поверхностно-активные вещества, работа адгезии, флотация, селективность

#### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25–17–00009, <https://rscf.ru/project/25-17-00009/>

#### Для цитирования

Chanturiya V.A., Morozov V.V., Chanturiya E.L., Samusev A.L. Regulation of the oil receptivity of the surface of diamonds and kimberlite minerals using various classes of regulating agents. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):379–392. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-454>



## BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

**Regulation of the oil receptivity of the surface of diamonds and kimberlite minerals using various classes of regulating agents**V.A. Chanturiya  , V.V. Morozov   , E.L. Chanturiya  , A.L. Samusev  

Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

 [dchmgu@mail.ru](mailto:dchmgu@mail.ru)**Abstract**

The purpose of the research is to select appropriate agents for regulating the oil receptivity of diamond and kimberlite mineral surfaces in the conditioning of diamond-kimberlite products prior to their beneficiation by froth flotation and X-ray luminescence separation using phosphor-containing modifying agents and collecting agents, the basis of which is apolar collecting agents. The paper presents the results of comprehensive physicochemical studies of the influence of various classes of regulating agents on the attachment of apolar collecting agents on the surface of diamonds and kimberlite minerals (visiometric analysis, measurement of limiting wetting angles in a mineral-organic collecting agent-aqueous phase system, measurement of surface tension at the organic collecting agent-aqueous phase-frothless flotation phase boundary). Based on the analysis of the data obtained, effective regulating agents have been identified and selected to ensure the selectivity of diamond beneficiation. Regulating agents belonging to the classes of alkylarylpophosphonates (NTPA, OEDPA), aminopolycarboxylic acids (EDTA), cationic polymers (PEG-1500, Neonol AF-9-6), polyphosphates (STPP), bifunctionally modified carboxymethylcellulose derivatives (CMC 75-V and Kamcel-600), mixtures of alkyl phosphates, alkyl phosphonates, and anionic polymers (IS-3), ionogenic and non-ionogenic nitrogen-containing polymers (Emulsifier OP-4, Oxypav A1218.30), amino alcohols (TEA), hydroxy acids (lactic acid), and quaternary ammonium bases (ammonium sulfate) were tested. Talc, pyrite, calcite, muscovite, phlogopite, serpentine, and dolomite were selected as the main minerals of kimberlite prone to adhesion of apolar collecting agents. It has been established that the limiting wetting angle is reduced most significantly by the agents Neonol AF-9-6, Emulsifier OP-4, and Oxypav A1218.30 that is associated with a significant decrease in the surface tension of the interface between an organic collecting agent and the aqueous phase. A thermodynamic assessment of the oil receptivity of kimberlite minerals conducted using the Dupré-Young equation and based on measurements of limiting wetting angles and surface tension showed that the energy of adhesion of an organic collecting agent on kimberlite minerals with the addition of regulating agents decreases by 2–6 times and reaches values of 6–17 J/m<sup>2</sup>, approaching the adhesion energy of water (5 J/m<sup>2</sup>). On diamonds, the energy of adhesion of an apolar collecting agent at maximum concentrations decreases only to 17–27.5 J/m<sup>2</sup> that determines its stable attachment. The results of flotation tests confirmed the depressing ability of the studied regulating agents in relation to the flotation-responding minerals of kimberlite. Based on the analysis of the data obtained, effective regulating agents have been selected and recommended for testing in industrial froth separation modes, ensuring increased selectivity of apolar collecting agent attachment on the surface of diamonds and kimberlite minerals: NTPA, OEDPA, IS-3, OP-4.

**Keywords**

diamonds, kimberlite, minerals, collecting agent, oil receptivity, agents, surfactants, work of adhesion, flotation, selectivity

**Financing**

This research was funded by a grant No. 25-17-00009 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-17-00009/>

**For citation**

Chanturiya V.A., Morozov V.V., Chanturiya E.L., Samusev A.L. Regulation of the oil receptivity of the surface of diamonds and kimberlite minerals using various classes of regulating agents. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):379–392. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-454>

**Введение**

Актуальной задачей при разработке технологии извлечения слабо и аномально люминесцирующих алмазов в процессах рентгенолюминесцентной сепарации является повышение селективности закрепления люминофорсодержащих реагентов-модификаторов на поверхности алмазов и обоснованный выбор реагентов-регуляторов, обеспечивающих уменьшение закрепления на гидрофобных минералах кимберлита

аполярных коллекторов, входящих в состав применяемых реагентов-модификаторов [1, 2]. Аналогичная задача – повышение селективности закрепления аполярных собирателей на поверхности алмазов – является условием повышения эффективности процессов флотации и пенной сепарации [3, 4]. В обоих случаях для выбора эффективных реагентных режимов необходимо установление закономерностей закрепления органических коллекторов и реагентов-регуляторов



гидрофобности и олеофильности на алмазах и минералах кимберлита [1, 5].

Цель проведенных исследований – обоснованный выбор реагентов для регулирования олеофильности поверхности алмазов и минералов кимберлита в процессах кондиционирования алмазо-кимберлитовых продуктов перед их обогащением пенной сепарацией, флотацией и рентгенолюминесцентной сепарацией с применением люминофорсодержащих реагентов-модификаторов и собирателей, основой состава которых являются аполярные коллекторы.

Задачами исследований являются:

– определение минералов кимберлита, в наибольшей степени склонных к адгезии на них капель органического коллектора;

– определение влияния реагентов-регуляторов на энергию адгезии аполярного коллектора на поверхности алмазов и олеофильных минералов кимберлита;

– выбор реагентов регуляторов, в наибольшей степени повышающих контрастность флотационной активности алмазов и минералов кимберлита.

Основой для выбора методик исследований и подходов к решению поставленной задачи является анализ современных научно-технических разработок и исследований в области регулирования поверхностных процессов в водоминеральных дисперсных системах [6, 7].

Значительное количество исследований в данном направлении было проведено применительно к процессам пенной сепарации и флотации алмазов из кимберлитов<sup>1</sup> [8, 9]. Наряду с выбором собирателей в представленных работах был рекомендован определенный круг реагентов-регуляторов, задачей которых было подавление флотируемости кимберлита.

Для обоснованного выбора реагентов-регуляторов также были использованы результаты исследований в смежных областях. Близкими по характеру решаемой задачи являются исследования, связанные применением минералов класса слоистых алюмосиликатов в качестве сорбентов тяжелых металлов и нефтепродуктов из сточных вод [10]. Однако в силу обратной конечной задачи (увеличения сорбции загрязнителей) большая часть теоретических и экспериментальных положений этих работ лишь частично описывает процессы гидрофилизации.

Также представляют интерес исследования, изучающие способы повышения нефтеотдачи нефтяных пластов, особенно в части применения реагентов-регуляторов, способствующих снижению гидрофобности пластовых минералов, в т.ч. минералов класса слоистых алюмосиликатов [11]. Однако в силу отличающегося минерального состава вмещающих пород, особенностей органической фазы – нефти, температуры и давления, большая часть теоретических положений и экспериментальных данных лишь ограниченно применима для описания процессов гидрофилизации минералов кимберлитов.

<sup>1</sup> Юн Р.-Х., Кузнецов Д. Способ выделения алмазов из жильных минералов. Патент РФ 2412901, С2, опубл. 27.02.2011 Бюл. № 6.

Другим направлением, в котором решается схожая задача уменьшения застарания рабочих поверхностей солями жесткости, является процесс реагентного кондиционирования водных сред в тепловых агрегатах и установках обратного осмоса [12].

Несмотря на отличия рассмотренных процессов от процессов, протекающих при обработке алмазосодержащих продуктов перед процессами рентгенолюминесцентной и пенной сепарации, схожесть решаемых задач – повышение гидрофильности породных минералов и очистка поверхности рабочих элементов от гидрофилизирующих покрытий – является основанием для выбора номенклатуры реагентов-регуляторов для проводимых исследований.

Для обоснованного выбора реагентов-регуляторов селективности закрепления модификаторов рентгеноспектральных характеристик и собирателей на поверхности алмазов в процессах рентгенолюминесцентной и пенной сепарации использовали комплекс методов физико-химических исследований и термодинамическое моделирование действия реагентов-регуляторов на закрепление органического коллектора на гидрофобных минералах кимберлита в сильноминерализованных водных средах.

## Методики исследований

В качестве объектов исследований были выбраны: кристаллы алмаза с полированной поверхностью, кимберлиты различной степени метаморфизма, а также шлифы и пластиинки наиболее значимых минералов кимберлита. В качестве коллектора использовали тяжелый газойль каталитического крекинга с добавками дизельной технической фракции (ТГКК и ДТФ) и люминола. Исследования проводили с использованием растворов двенадцати реагентов-регуляторов разных классов в модельной сильноминерализованной воде, близкой по составу к оборотным водам обогатительных фабрик, перерабатывающих алмазосодержащие кимберлиты.

Для предварительной оценки интенсивности закрепления органического коллектора на минералах кимберлита использовали визиометрическую методику [2], которая включала обработку пробы эмульсией люминофорсодержащего органического коллектора, получение и анализ изображений поверхности минералов в ультрафиолетовом освещении. Интенсивность закрепления органического коллектора на поверхности алмазов, отдельных минералов и зерен кимберлита определяли методом анализа изображений по доле поверхности, занимаемой органическим коллектором после обработки минеральных проб. Для измерения доли поверхности, занимаемой коллектором (степени покрытия), фиксировались участки с характерным свечением ( $\lambda = 500$  нм), соответствующим излучению смеси ТГКК с ДТФ и люминолом.

Для оценки влияния реагентов-регуляторов на олеофильность минералов кимберлита измеряли краевые углы смачивания в системе минерал – органический коллектор – водная фаза [13]. Методики измерения краевых углов смачивания ранее использовали для оценки восстановления гидрофобности

природных алмазов различными видами физических и физико-химических воздействий [14]. Для измерений краевых углов смачивания использовали прибор DSA25, оснащенный программным обеспечением для обработки изображений<sup>2</sup>.

Встроенная программа определяла краевой угол смачивания в момент времени стабилизации системы минерал – капля органического коллектора – водная фаза (рис. 1, *a*).

Поверхность алмаза после каждого измерения очищали с использованием толуола и 1Н раствора соляной кислоты. Для измерений краевого угла смачивания на минералах кимберлита использовали шлифы или пластинки минерала, полученные расщеплением природного образца.

Краевой угол смачивания в системе аполярная жидкость – минерал – водная фаза является информативной количественной характеристикой олеофильности и широко применяется для описания процесса смачивания различных поверхностей в технологических процессах [15]. Для исследования закрепления коллектора на минералах в водной фазе использовали динамическую методику измерения трехфазных краевых углов смачивания [4, 16]. Согласно используемой методике поверхность образца минерала предварительно выдерживали в водной фазе заданного состава, затем снижали уровень водной фазы в кювете до уровня поверхности образца и наносили каплю органического коллектора заданного объема. После нанесения капли коллектора на поверхность образца в кювете увеличивали уровень жидкости. При этом часть капли отрывалась от поверхности образца и распо-

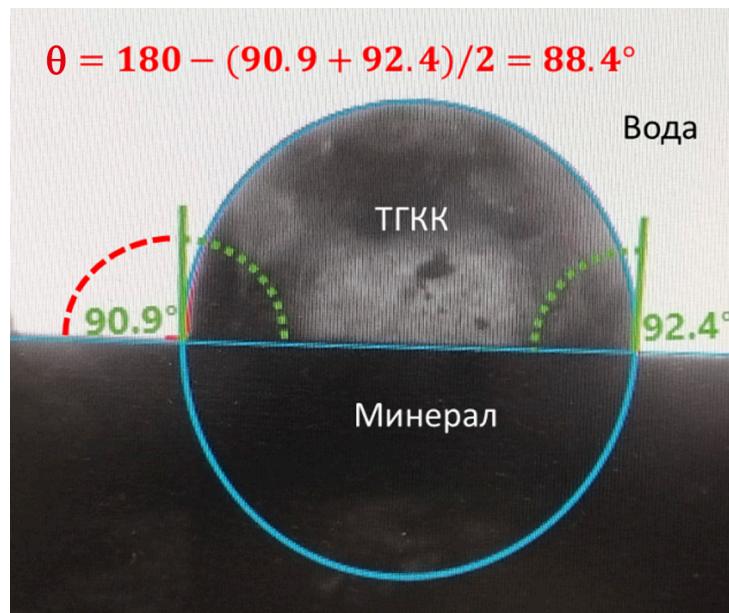
лагалась на границе раздела водная фаза – воздух. Краевые углы на трехфазном периметре смачивания измерялись после установления равновесия без удаления водной фазы. Используемая методика моделирует процесс закрепления аполярного собирателя на минерале в условиях турбулентной внешней среды, характерной для процессов кондиционирования алмазо-кимберлитовых продуктов перед процессами рентгенолюминесцентной и пенной сепарации.

Для расчета энергии адгезии аполярного коллектора на поверхности минералов по уравнению Дюпре–Юнга определяли поверхностное натяжение границы раздела фаз органический коллектор – водная фаза. Измерения проводили с использованием сталагмометра СТ-1 путем определения объема всплывающих капель коллектора, отрывающихся от изогнутого капилляра (рис. 1, *b*), в соответствии со стандартной методикой<sup>3</sup>. Поверхностное натяжение на границе раздела фаз водная фаза – воздух измеряли путем определения объема падающих капель от прямого капилляра в соответствии с методикой.

Флотацию алмазов, минералов и зерен кимберлита проводили методом беспенной флотации в трубке Халлимонда. Методика эксперимента включала операции подготовки пробы минерала, подготовки жидкой фазы (сильноминерализованной воды), кондиционирования воды с реагентом-регулятором, кондиционирования пробы минерала с собирателем в воде, содержащей реагент-регулятор олеофильности, флотации алмазов, кимберлита или минералов кимберлита, обезвоживания, сушки и взвешивания продуктов флотации [4].

<sup>2</sup> Drop Shape Analyzer DSA25 Specifications. URL: <https://www.kruss-scientific.com/files/kruss-techdata-dsa25-en.pdf/>

<sup>3</sup> ГОСТ Р 50097–92 «Вещества поверхностно-активные. Определение межфазного натяжения. Метод объема капли».

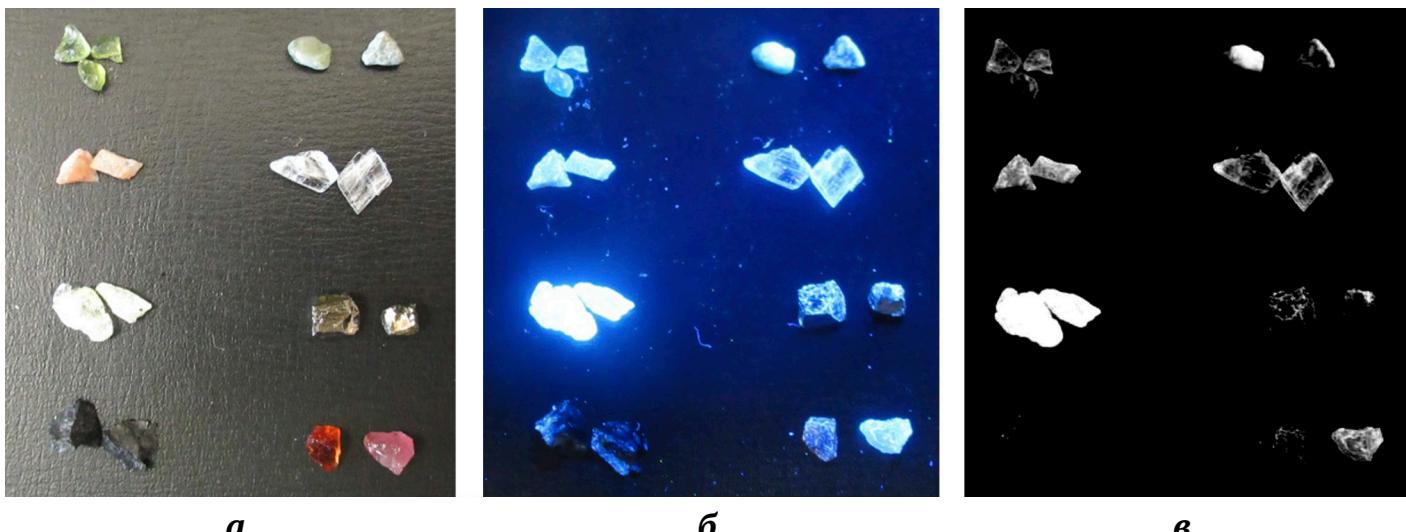


*a*



*b*

Рис. 1. Изображение капли органического коллектора – тяжелого газойля каталитического крекинга (ТГКК): *a* – на поверхности минерального шлифа с результатами измерения краевого угла смачивания на приборе DSA25; *b* – на изогнутом капилляре сталагмометра СТ-1



**Рис. 2.** Изображение и результаты визиометрического анализа закрепления органического коллектора с растворенным люминофором на поверхности минералов кимберлита и попутных минералов: *а* – в дневном освещении; *б* – в УФ-освещении после обработки коллектором; *в* – распределение органического коллектора по образцам минералов.

Здесь (справа налево, сверху вниз): оливин, кальцит, целестин, мусковит, тальк, пирит, хромит, пироп

### Визиометрический анализ закрепления органического коллектора на образцах минералов-компонентов кимберлита

На начальном этапе исследований был произведен выбор минералов кимберлита, характеризующихся заметной адгезией аполярного коллектора (ТГКК с ДТФ и люминолом) из водных эмульсий. Для исследований были выбраны минералы, наиболее часто встречающиеся в кимберлитах различной степени метаморфизма. Для получения эмульсии коллектора использовали модельную сильноминерализованную воду. Концентрация люминофора содержащего коллектора в эмульсии составляла 200 мг/л. Время обработки – 1 мин. После обработки и удаления избытка эмульсии пробу минерала промывали обратной водой в течение 30 с.

Таблица 1

#### Результаты визиометрического анализа закрепления аполярного коллектора на минералах кимберлита

№	Минерал	Распространенность в кимберлитах, %	Доля покрытия поверхности органическим коллектором, %
1	Алмаз	2–10 карат/т	56–95
<b>Минералы кимберлита</b>			
2	Кальцит	1–40	22–65
3	Мусковит	0,1–5	25–50
4	Тальк	0,1–5	80–93
5	Пирит	0,05–1	35–55
6	Флогопит	0,1–5	15–25
7	Серпентин	1–10	7–10
8	Доломит	0,5–15	7–12

Анализ изображений минеральных образцов в ультрафиолетовом освещении показал существенные различия в интенсивности закрепления на их поверхности органического коллектора: от практически полного заполнения (тальк, см. рис. 1) до полного отсутствия закрепления (хромит, рис. 2).

Полученные результаты визиометрических исследований позволили выбрать для дальнейших исследований 7 минералов кимберлита с высокой и средней степенью покрытия аполярным коллектором (табл. 1).

Минералы-спутники алмазов с относительно высокой склонностью к адгезии органического коллектора (целестин, пироп и др.) не исследовали, поскольку их содержание в кимберлите весьма незначительно.

#### Выбор реагентов-регуляторов олеофильности минералов кимберлита

При выборе начальной номенклатуры реагентов-регуляторов олеофильности минералов кимберлита рассматривались и традиционные, и новые классы органических соединений, применяемых для регулирования свойств минералов при флотации: фосфорсодержащих комплексонов, бифункциональных катионо- и анионактивных полимеров, гидроксикислот, аминоспиртов, бифункционально модифицированных производных карбоксиметилцеллюлозы, катионоактивных азотсодержащих олефинов, алифатических аминов, четвертичных аммониевых соединений, катионных полимеров<sup>4</sup> [8]. Изначально в список для исследования были включены реагенты, используемые в смежных отраслях промышленности. Так, реагенты классов алкиларилфосфонатов, азотсодержащих олефинов, алифатических аминов

<sup>4</sup> Юн Р.-Х., Кузнецов Д. Способ выделения алмазов из жильных минералов. Патент РФ 2412901, С2, опубл. 27.02.2011 Бюл. № 6.



эффективно применяют в нефтедобыче для повышения нефтеотдачи за счет снижения гидрофобности пластовых минералов [17, 18]. Критериями отбора являлись требования промышленного производства реагентов перечисленных классов и апробации в процессах флотации и смежных отраслях. В соответствии с этими требованиями для исследований были выбраны 14 реагентов, представленных в табл. 2.

Предварительную оценку эффективности рассматриваемых реагентов-регуляторов проводили путем определения «критической» концентрации, при которой прекращается закрепление органического коллектора. Критерием эффективности реагентов-регуляторов являлась их способность максимально снижать краевой угол смачивания вплоть до удаления капли органического коллектора с поверхности образца минерала при его обработке в растворах реагентов-регуляторов в диапазоне концентраций от 10 до 1000 мг/л. В качестве индикаторного минерала выбран флогопит.

Результаты исследований показали, что существенное снижение краевого угла смачивания и отрыв капли органического коллектора от поверхности флогопита в указанном диапазоне концентраций достигается при применении 13 реагентов-регуляторов (за исключением сульфата аммония), поэтому все эти реагенты были отобраны для последующих экспериментов (табл. 2).

## Исследования и термодинамический анализ влияния реагентов-регуляторов на олеофильность минералов кимберлита

Термодинамически обоснованным параметром смачивающей способности органического коллектора и одновременно олеофильности минеральной поверхности является работа (энергия) адгезии. Работа адгезии аполярного коллектора на минеральной поверхности может быть рассчитана по уравнению Дюпре–Юнга [19]:

$$W_{\text{ок-м}} = \sigma_{\text{ок-в}} (1 - \cos \theta), \quad (1)$$

где  $W_{\text{ок-м}}$  – работа адгезии коллектора на минерале, Дж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{\text{ок-в}}$  – межфазное натяжение на границе раздела «органический коллектор – водная фаза», Н/м;  $\theta$  – трехфазный краевой угол смачивания для капли органического коллектора на минеральной поверхности в водной фазе, град.

Для расчета работы адгезии аполярного коллектора на минеральной поверхности на приборе DSA25 были измерены краевые углы смачивания на алмазе и минералах кимберлита (см. табл. 1) в водной фазе (модельной сильноминерализованной воде) с растворенными в ней реагентами-регуляторами в диапазоне концентраций 0–500 мг/л. В качестве органического коллектора использовали смесь ТГКК и ДТФ

Таблица 2

Критические концентрации реагентов-регуляторов для закрепления органического коллектора на флогопите

№	Реагент-регулятор (техническая марка)	Класс органических соединений	«Критическая» концентрация реагента-регулятора, мг/л	
			при частичном отрыве капли коллектора	при полном отрыве капли коллектора
1	Цинковый комплексонат нитрилоритметилфос-фоновой кислоты (НТФК)	Нитриллалкиларифосфонат	130	166
2	Оксиэтилендифосфоновая кислота (ОЭДФ)	Алкилдифосфонат	90	130
3	Этилендиаминетрауксусная кислота (ЭДТА)	Аминополикарбоновая кислота	130	166
4	Полиэтиленгликоль (ПЭГ-1500)	Катионоактивный полимер	90	130
5	Триполифосфат натрия (ТПФ)	Полифосфат	90	130
6	Полиэтиленгликолевый эфирmonoалкилфенолов (Неонол АФ-9-6)	Катионоактивный азотсодержащий полимер	50	70
7	Модифицированная карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ 75-В)	Бифункционально модифицированные производные КМЦ	70	90
8	Антискалант комплексного действия (АКВА-ИС3)	Смесь алкилфосфатов, алкилфосфонатов и анионных полимеров	130	170
9	Натрий-карбоксиметилцеллюлоза техническая глиоксилированная (Камцел-600)	Бифункционально модифицированные производные КМЦ	50	70
10	Алкил C8-12-фенол этоксилированный (Эмульгатор ОП-4)	Короткоцепочечный алифатический амин	50	70
11	Алкилдиметиламиноксид C <sub>12</sub> –C <sub>18</sub> (Оксипав А1218.30)	Неионогенный азотсодержащий полимер	70	90
12	Триэтаноламин (ТЭА)	Аминоспирт	500	1000
13	2-гидроксипропановая кислота (Молочная кислота)	Гидроксикислота	330	500
14	Сульфат аммония	Четвертичное аммониевое соединение	–	–

(85 и 15 %). При предварительном смачивании шлифов также использовали сильноминерализованную модельную воду с добавками реагентов-регуляторов. На поверхность смоченного минерального образца шприцом-дозатором установки DSA25 наносили каплю органического коллектора, после чего повышали уровень водной фазы в кювете и получали изображения капли коллектора, закрепившейся на поверхности минерального образца (см. рис. 1, *a*).

Далее с использованием сталагмометра СТ-1 по методике, изложенной в ГОСТ Р 50097–92<sup>5</sup>, были измерены масса и объем десяти капель органического коллектора, отрывающихся от изогнутого капилляра в водной среде. По полученным данным была установлена постоянная ячейки *K* (по измерениям на керосине) и определено поверхностное натяжение на

<sup>5</sup> ГОСТ Р 50097–92 (ИСО 9101–87) «Вещества поверхностно-активные. Определение межфазного натяжения. Метод объема капли».

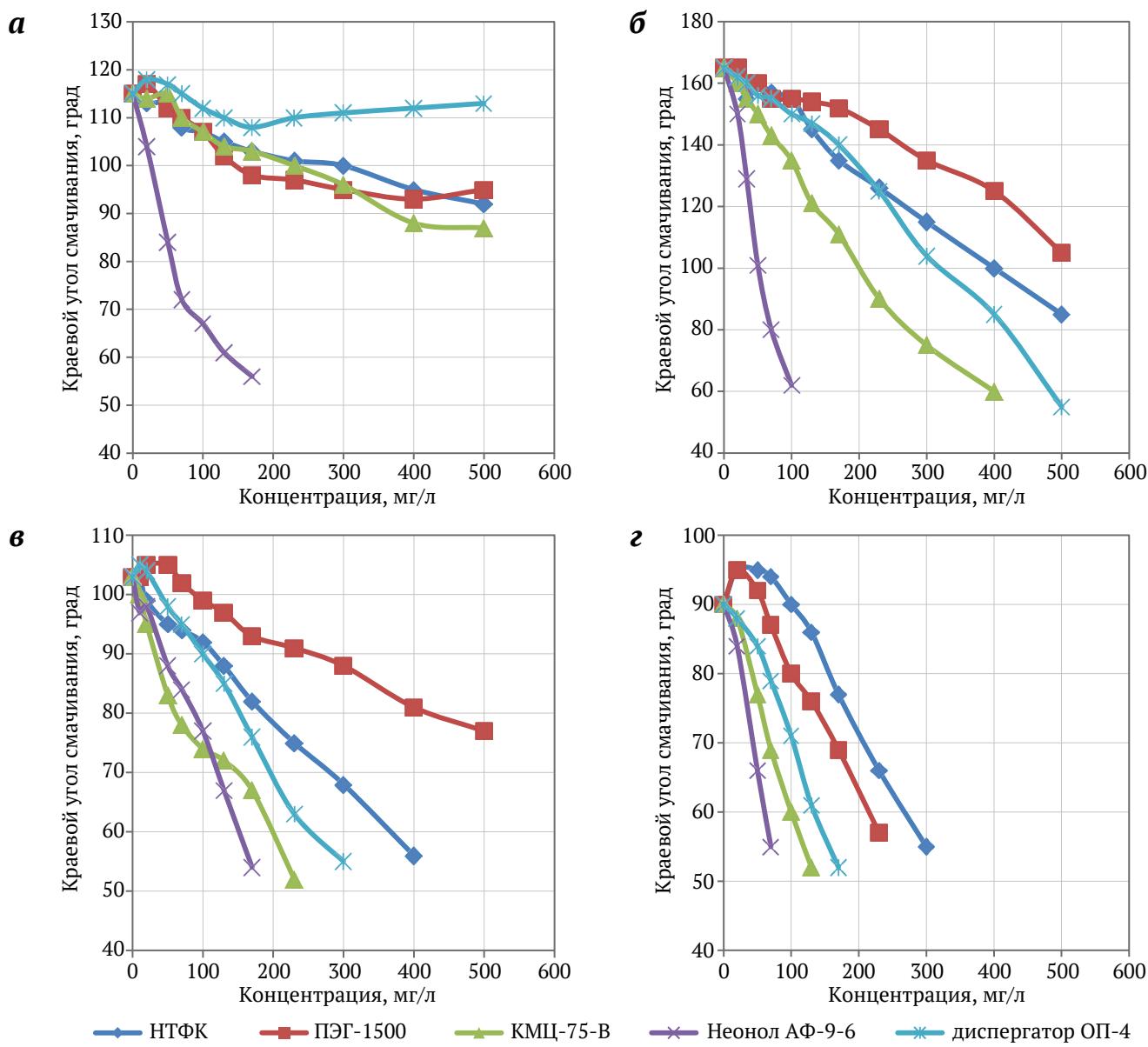
границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза ( $\sigma_{\text{ок-в}}$ ) для различных реагентов в интервале концентраций 0–500 мг/л:

$$K = \frac{47,5}{V(\rho_{\text{вода}} - \rho_{\text{керосин}})}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{ок-в}} = KV(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{ок}}), \quad (3)$$

где  $V$  – объем капли, м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{вода}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{керосин}}$  – плотность керосина, кг/м<sup>3</sup>; 47,5 – поверхностное натяжение границы раздела керосин – вода, мН/м;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность водной фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ок}}$  – плотность органического коллектора, кг/м<sup>3</sup>.

Результаты измерения краевого угла смачивания показали, что выбранные реагенты в различной степени влияют на смачиваемость поверхности алмаза, талька, кальцита и мусковита (рис. 3, *a*, *б*, *в*) аполярным коллектором. Установлено, что в наибольшей степени



**Рис. 3.** Влияние реагентов-регуляторов на изменение краевого угла смачивания для трехфазного периметра смачивания минерал – органический коллектор – водная фаза для алмаза (*а*), талька (*б*), кальцита (*в*) и мусковита (*г*)



снижает краевой угол смачивания минералов кимберлита реагент Неонол АФ-9-6. Однако при использовании этого реагента снижается краевой угол смачивания и на поверхности алмазов. Отличающийся от других реагентов эффект на алмазе отмечается при добавлении эмульгатора ОП-4: после первоначального снижения краевого угла смачивания в диапазоне концентраций 0–130 мг/л наблюдается заметное возрастание измеряемой величины при больших концентрациях (см. рис. 3, а).

Наименьшее снижение краевого угла смачивания на минералах кимберлита наблюдается при добавках алкиларилфосфонатов (на примере НТФК) и алифатических спиртов (на примере ПЭГ-1500). Однако, надо отметить, что уровень снижения величины краевого угла смачивания при использовании этих реагентов существенно выше, чем на алмазах, что говорит о перспективности их применения. Органические полимеры на основе карбоксиметилцеллюлозы обладают свойством эффективного снижения олеофильности минералов кимберлита, однако схожее действие (в меньшем объеме) они оказывают и на закрепление аполярного коллектора на алмазе (см. рис. 3), что допускает возможность их применения при весьма малых концентрациях.

Результаты измерений поверхностного натяжения на границе раздела коллектор – водная фаза, частично представленные в табл. 3, указывают на различия в действии исследуемых реагентов-регуляторов. Реагенты, представляющие классы ионогенных и неионогенных азотсодержащих полимеров (Неонол АФ 9-6 и Оксипав А1218.30) и короткоцепочечный алифатический амин (ОП-4), проявляют свойства ПАВ, снижая поверхностное натяжение на границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза в 2,8–3 раза (см. табл. 3).

Реагенты других классов в существенно меньшей мере проявляют свойства ПАВ, снижая величину поверхностного натяжения при концентрации 300–500 мг/л на 10–25%. Результаты измерений поверхностного натяжения на границе раздела органический коллектор – водная фаза в присутствии реагентов-регуляторов были использованы для расчета энергии адгезии по уравнению (1).

Результаты расчетов энергии адгезии на алмазе, тальке, кальците и мусковите, представленные на рис. 4, показывают, что исследованные реагенты в различной мере снижают энергию адгезии аполярного коллектора на минералах кимберлита.

Энергия адгезии органического коллектора на алмазе при добавках реагентов-регуляторов (за исключением Неонола АФ-9-6) снижается в 1,5–2 раза до значений 17–27,5 Дж/м<sup>2</sup> (см. рис. 4, а). На минералах кимберлита энергия адгезии органического коллектора снижается в 2,5–6 раз и достигает значений 6–17 кДм<sup>2</sup> (см. рис. 4, б, в, г). Неонол АФ-9-6 обладает аномальной способностью резкого снижения энергии адгезии органического коллектора на всех образцах, включая алмаз.

Для обоснования гидрофилизации минералов при воздействии реагентов-регуляторов представляется целесообразным сравнить энергию адгезии органического коллектора при «предкритических» (перед отрывом капли коллектора) концентрациях реагентов-регуляторов и энергию адгезии водной фазы. Результаты измерений показали, что для мусковита измеренное значение краевого угла смачивания каплей модельной воды в воздухе составило 38 град и, соответственно, расчетной энергии адгезии водной фазы – 5,7 Дж/м<sup>2</sup>. Полученная величина близка к энергии адгезии при «предкритических» концентрациях реагентов-регуляторов, находясь в диапазоне от 7 до

Таблица 3

Результаты измерения и расчета поверхностного натяжения на границе раздела органический коллектор – водная фаза (модельная сильноминерализованная вода)

Реагенты-регуляторы	Концентрация, мг/л						
	0	50	100	170	230	300	500
	Поверхностное натяжение, мН/м						
НТФК	30,43	30,08	28,04	27,44	27,04	26,56	26,08
ОЭДФ	30,43	27,43	25,34	22,99	21,65	20,34	20,17
ЭДТА	30,43	30,13	30,01	29,60	29,14	26,33	22,08
ПЭГ-1500	30,43	28,45	27,05	24,83	24,00	24,45	24,60
ТПФ	30,43	26,20	25,24	25,01	24,78	25,12	22,50
Неонол АФ 9-6	30,43	24,21	20,14	16,32	15,91	14,23	12,33
КМЦ 75-В	30,43	28,34	27,77	27,22	26,95	25,45	23,47
ИС-3	30,43	30,01	29,07	28,56	28,34	27,77	27,40
КАМЦЕЛ-600	30,43	28,56	28,13	27,89	27,73	27,10	27,30
ОП-4	30,43	23,11	19,10	16,24	15,22	13,56	11,65
ОКСИПАВ А1218.30	30,43	20,66	14,34	11,01	9,52	9,45	9,04
Триэтаноламин	30,43	28,33	27,40	26,22	26,00	26,04	25,91
Молочная кислота	30,43	28,00	27,25	27,02	26,86	25,34	23,30

10,5 Дж/м<sup>2</sup> (см. рис. 4, г). Экстраполяция зависимости энергии адгезии от концентрации на «критическую» концентрацию даёт значение энергии адгезии в момент отрыва капли 5–7,5 Дж/м<sup>2</sup>. Такой результат позволяет заключить, что отрыв капли органического коллектора от минеральной поверхности, т.е. её гидрофилизация, происходит при равенстве или близких значениях энергий адгезии на минерале воды и аполярного коллектора.

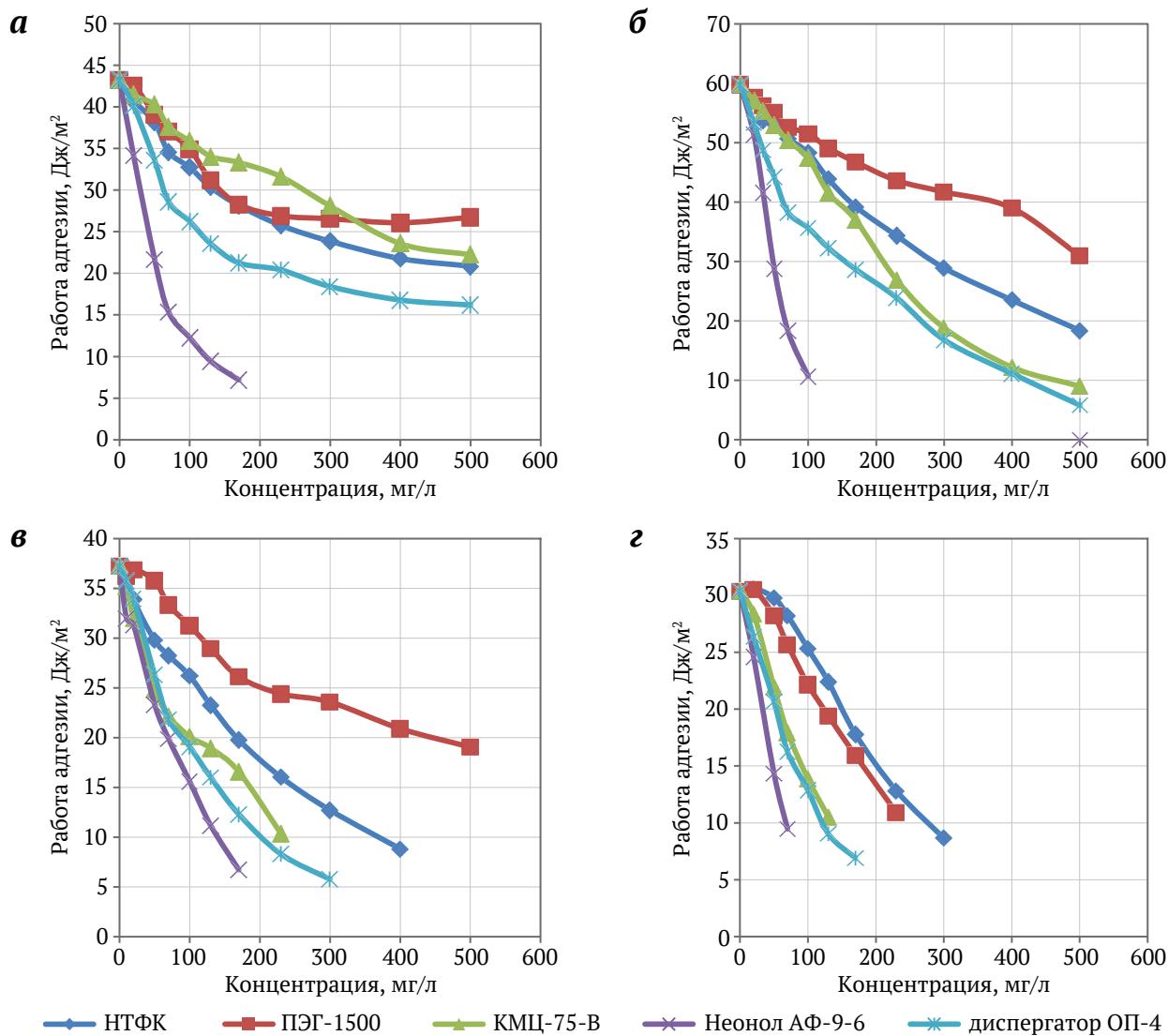
### Исследования влияния реагентов-регуляторов на флотируемость минералов кимберлита аполярным собираителем

Описанные выше общие закономерности влияния реагентов-регуляторов на закрепление органического коллектора подтверждены результатами изучения флотируемости минералов кимберлита и алмазов.

Флотация в лабораторных условиях может быть использована для моделирования промышленного процесса пенной сепарации. При исследовании взаимодействия аполярных собираителей с поверхностью флотируемых минералов наблюдается тесная корреля-

ция уровня закрепления собираителя на минералах с их флотируемостью [20]. Методика мономинеральной флотации в трубке Халлимонда является общепризнанной методикой оценки гидрофобности поверхности минералов и оценки перспективности применения коллекторов в промышленном процессе [21].

Для флотации от измельченной мономинеральной массы методом рассева выделяли фракцию крупностью  $-250 + 75$  мкм, из которой отбирали пробу минерала массой 150 мг. Пробу выдерживали в водной фазе объемом 35 мл в течение 60 мин. Затем в водную фазу добавляли реагент-регулятор, пробу выдерживали 5 мин и добавляли собираитель – мазут флотский Ф-5, операцию кондиционирования с собираителем проводили в течение 1 мин. Расход собираителя составлял 2 мкл (около 1,86 мг) на 35 мл водной фазы, концентрация собираителя при кондиционировании – 52 мг/л. После кондиционирования пробу с водной фазой загружали во флотационную установку, доливали водной фазой и флотировали 4 мин при общем расходе воздуха 50 мл. Температура водной фазы в операциях кондиционирования и флотации составляла 24 °C.



**Рис. 4. Влияние реагентов-регуляторов на изменение энергии адгезии аполярного коллектора на алмазе (а), тальке (б), кальциите (в) и мусковите (г)**

Результаты флотационных опытов показали, что добавки реагентов-регуляторов различных классов по-разному влияют на флотируемость алмазов и минералов кимберлита (рис. 5).

Заметное снижение извлечения алмазов и минералов кимберлита при добавках реагента-регулятора наблюдается для КМЦ-75-В и Неонола АФ-9-6. Характер зависимостей извлечения алмазов и минералов кимберлита от расхода других реагентов-регуляторов заметно отличается. Так, при добавках НТФК извлечение алмаза практически не изменяется, тогда как флотируемость минералов кимберлита заметно снижается. Реагент ПЭГ-1500 не снижает флотируемость алмаза и относительно слабо снижает флотируемость минералов кимберлита. Диспергатор ОП-4 повышает флотируемость алмаза и снижает флотируемость минералов кимберлита.

Дальнейшие исследования проводили на кимберлитах, отличающихся степенью метаморфизма и минеральным составом: кимберлит пробы 1 представлен в большей степени первичными минералами: оливином (55 %), флогопитом и мусковитом (8 %), пироксеном (7 %), кальцитом (арагонитом) (6 %), доломитом (2,2 %), хромитом (2 %), сульфидами железа

(1,2 %), титаномагнетитом (1,0 %), пиропом (0,3 %) и др.; кимберлит пробы 2 представлен кальцитом (арагонитом) (34 %), оливином (22 %), флогопитом и мусковитом (6,5 %), доломитом (6,4 %), пироксеном (4,4 %), хромитом (2 %), тальком (2 %), сульфидами железа (1,1 %), титаномагнетитом (1,0 %), пиропом (0,2 %) и др.

Перед флотацией пробу кимберлита обесшламливали и на флотацию направляли материал класса крупности  $-400 +180$  мм. Методика подготовки и флотации кимберлита соответствовала методике флотации алмазов и отдельных минералов.

Исходя из анализа данных, полученных при флотации алмаза и отдельных минералов кимберлита, для экспериментов по флотации кимберлита была выбрана концентрация реагентов-регуляторов 200 мг/л (для Неонола АФ-9-6 и Оксипав А1218.30 дополнительно 50 мг/л).

Результаты исследований показали возможность подавления флотируемости кимберлитов при использовании исследованных реагентов-регуляторов. Наиболее интенсивно снижают флотируемость (выход) кимберлитов реагенты Неонол АФ-9-6, Оксипав А1218.30, ИС-3 и Камцелл 600 (табл. 4).

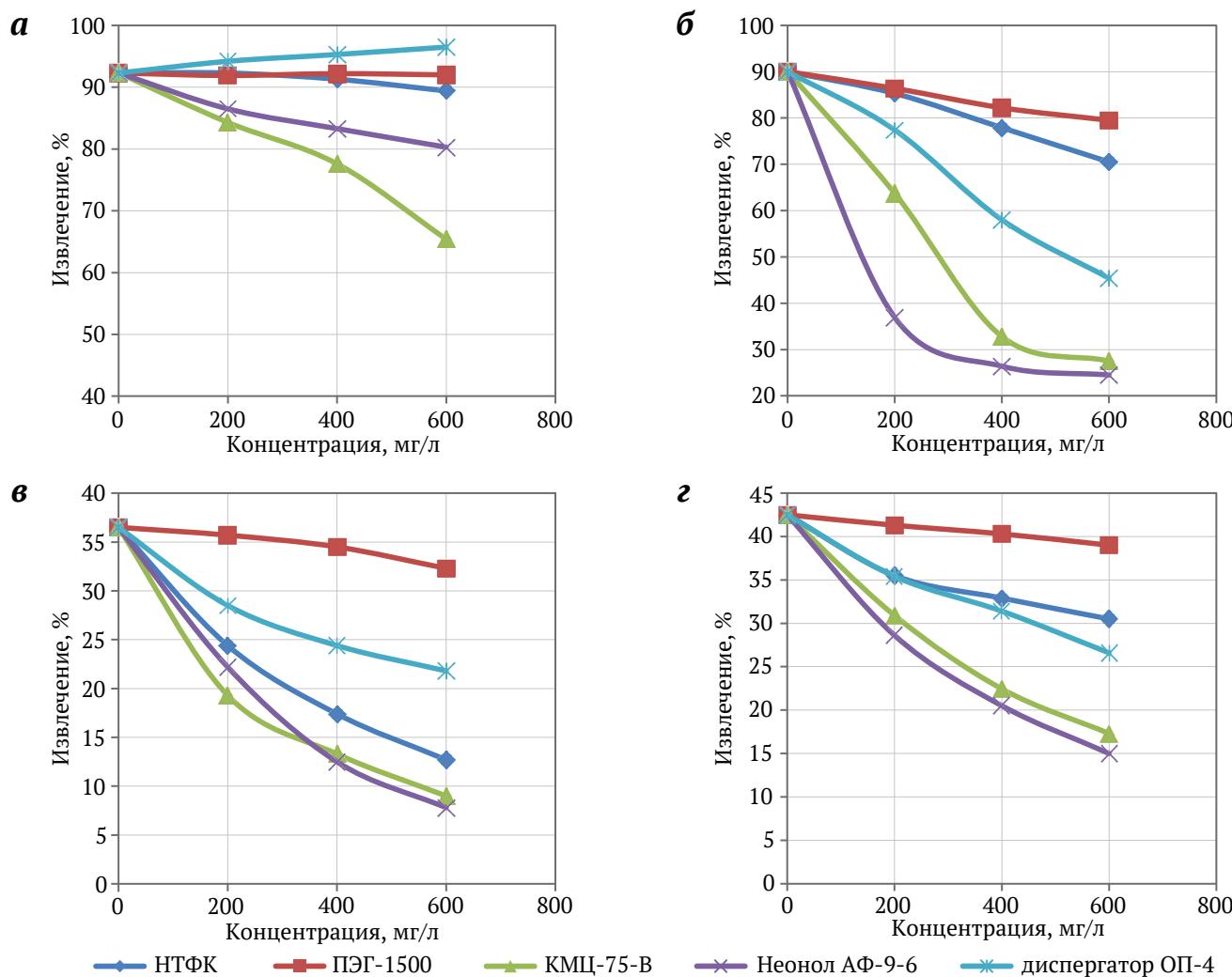


Рис. 5. Влияние реагентов-регуляторов на изменение флотируемости алмаза (а), талька (б), кальцита (в) и мусковита (г)



Таблица 4

## Влияние реагентов-регуляторов на селективность флотации алмазов и кимберлита

Реагент-регулятор	Извлечение алмазов, %	Выход кимберлита в пенный продукт, %		Критерий селективности $S$ , %	
		Проба 1	Проба 2	Проба 1	Проба 2
Без добавок	92,3	3,77	4,94	87,40	85,88
НТФК	92,5	2,04	2,51	89,85	89,24
ОЭДФ	92,3	2,57	2,56	88,96	88,97
ЭДТА	90,5	2,44	2,82	87,33	86,83
ПЭГ-1500	91,9	5,65	4,86	84,56	85,58
ТПФ	88,3	2,31	3,69	85,30	83,50
Неонол АФ 9-6	86,3	0,67	1,92	85,43	83,80
Неонол АФ 9-6 (50 мг/л)	90,5	2,12	2,66	87,74	87,04
КМЦ 75-В	88,5	2,16	1,79	85,69	86,17
ИС-3	90,4	1,36	2,44	88,63	87,23
КАМЦЕЛ-600	88,8	1,97	2,43	86,24	85,64
ОП-4	94,2	2,44	5,12	91,03	87,54
Оксипав А1218.30	84,3	1,33	1,48	82,57	82,38
Оксипав А1218.30 (50 мг/л)	88,3	1,15	1,22	86,81	86,71
Триэтаноламин	88,3	3,4	3,87	83,88	83,27
Молочная кислота	89,2	3,2	3,99	85,04	84,01

Однако, поскольку при использовании добавок некоторых реагентов наблюдается снижение извлечения алмазов, оценка их эффективности и возможности использования требует применения специализированных критерии, например, критерия селективности. Оценку селективности проводили с использованием уравнения, предложенного в работе [1] для процесса пенной сепарации:

$$S = \varepsilon - 1,3\gamma, \quad (4)$$

где  $S$  – критерий селективности;  $\varepsilon$  – извлечение алмазов;  $\gamma$  – выход (извлечение) кимберлита в концентрат.

Анализ данных расчета критерия селективности показал, что наиболее высокая селективность флотации алмазов достигнута при использовании реагентов-регуляторов НТФК, ОЭДФ, ИС-3, ОП-4 (см. табл. 4).

Тем не менее подтверждена возможность применения и некоторых других исследованных реагентов-регуляторов для повышения селективности флотационного извлечения алмазов из кимберлитов различного генезиса.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена возможность снижения флотируемости минералов кимберлита и частиц породы кимберлита и повышения технологических показателей флотации алмазосодержащих кимберлитов с использованием реагентов-регуляторов классов алкиларилфосфонатов, короткоцепочечных алифатических аминов, комплексных реагентов. Применение реагентов с сильным проявлением свойств ПАВ (ионогенных и неионогенных азотсодержащих короткоцепочечных полимеров) даст положительный результат при варьировании их расходов исходя из данных экспериментов со сниженным расходом реагентов-регуляторов Неонол АФ-9-8 и Оксипав А1218.30.

## Основные выводы

На основе анализа комплексных физико-химических исследований взаимодействия аполярных коллекторов и реагентов-регуляторов различных классов с поверхностью минералов алмазосодержащих кимберлитов и результатов флотационных исследований обоснованы и выбраны реагенты-регуляторы, обеспечивающие повышение селективности процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов пенной и рентгенолюминесцентной сепарацией.

Визиометрическим анализом определено, что из минералов кимберлита наибольшей адгезионной активностью по отношению к аполярному коллектору (олеофильностью) и флотоактивностью обладают тальк, кальцит, мусковит, пирит, флогопит.

По данным измерения краевого угла смачивания выявлена четкая тенденция снижения адгезионной активности флотоактивных минералов кимберлита по отношению к аполярному коллектору при использовании реагентов-регуляторов классов алкиларилфосфонатов (НТФК; ОЭДФ), алифатических спиртов (ПЭГ-1500); бифункционально модифицированных производных КМЦ (КМЦ-75-В; Камцел 600), ионогенных и неионогенных азотсодержащих полимеров (Неонол АФ-9-6, Оксипав А1218.30); короткоцепочечных алифатических аминов (диспергатор ОП-4), комплексных реагентов (реагент ИС-3),

Расчеты с использованием уравнения Дюпре–Юнга (на основе полученных экспериментально значений краевого угла смачивания и поверхностного натяжения на границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза) показали, что при добавлении реагентов-регуляторов энергия адгезии аполярного коллектора на минералах кимберлита, за исключением талька, снижается в 2,5–6 раз и достигает значений 6–15 Дж/м<sup>2</sup>, сопо-



ставимых с энергией адгезии водной фазы ( $5,7 \text{ Дж}/\text{м}^2$ ). При этом на алмазах энергия адгезии коллектора в аналогичных условиях снижается до значений  $17\text{--}27,5 \text{ Дж}/\text{м}^2$ , что обуславливает устойчивое закрепление на нем аполярного коллектора. Этот факт предопределяет усиление контрастности флотационной активности минералов кимберлита и алмазов реагентами-регуляторами и обосновывает возможность повышения селективности флотации алмазов из кимберлитов.

Результаты флотационных исследований на алмазах и кимберлитах различной степени метаморфизма подтвердили возможность повышения селективности флотации алмазов при использовании реагентов-регуляторов НТФК, ОЭДФ, ИС-3, ОП-4. Перечисленные реагенты-регуляторы рекомендованы для испытаний в промышленных процессах пенной сепарации в схемах обогащения алмазосодержащих кимберлитов.

### Список литературы / References

1. Чантурия В.А., Морозов В.В., Двойченкова Г.П. и др. Оптимизация состава и условий применения средств для модификации спектральных характеристик алмазов при рентгенолюминесцентном разделении. *Горные науки и технологии*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>  
Chanturiya V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., et al. Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>
2. Morozov V. V., Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Chanturia E. L. Hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Journal of Mining Science*. 2022;58(2):257–266. <https://doi.org/10.1134/S1062739122020090>
3. Коваленко Е.Г., Бабушкина А.Д., Чуть-Ды В.А. Применение многокомпонентных собирателей и выбор температурных режимов в пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов. *Горный журнал*. 2023;(12):51–62. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.12>  
Kovalenko E.G., Babushkina A.L., Chut-Dy V.A. Application of multi-component collectors and selection of temperature modes for frother separation of diamond-bearing kimberlites. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):51–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.12>
4. Морозов В.В. Коваленко Е.Г., Двойченкова Г.П. и др. Современные направления повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов. *Горные науки и технологии*. 2024;9(2):134–145. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-136>  
Morozov V.V., Kovalenko E.G., Dvoichenkova G.P., et al. Current trends of improving the efficiency of froth separation of diamond-bearing kimberlites. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):134–145. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-136>
5. Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G. P., et al. Selecting organic collectors for luminophore-bearing modifying agents to extract weakly fluorescent diamonds. *Journal of Mining Science*. 2023;59(2):292–301. <https://doi.org/10.1134/S1062739123020126>
6. Nguyen A. V., Schulze H. J. *Colloidal science of flotation*. New York: Marcel Dekker; 92004. 850 p.
7. Кондратьев С.А. Термодинамические условия нахождения физически сорбируемых собирателей на минеральной поверхности в элементарном акте флотации. *Цветные металлы*. 2024;(7):118–136. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.07.02>  
Kondratyev S.A. Thermodynamic conditions for the presence of physically sorbed collectors on a mineral surface in an elementary act of flotation. *Tsvetnye Metally*. 2024;(7):118–136. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.07.02>
8. Zhang J., Kouznetsov D.L., Yu M., et al. Improving the separation of diamond from gangue minerals. *Minerals Engineering*. 2012;36–38:168–171. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.015>
9. Верхотуров М.В., Амелин С.А., Коннова Н.И. Обогащение алмазов. *Международный журнал экспериментального образования*. 2012;(2):61.  
Verkhotuров M.V., Amelin S.A., Konnova N.I. Diamond beneficiation. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Eksperimental'nogo Obrazovaniya*. 2012;(2):61. (In Russ.)
10. Сергиенко В.И., Перфильев А.В., Ксеник Т.В., Юдаков А.А. Получение и применение гидрофобных сорбентов из алюмосиликатов. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2015;(5):108–112.  
Sergienko V.I., Perfiliev A.V., Ksenik T.V., Yudakov A.A. Obtaining and application of hydrophobic adsorbents on the basis of aluminosilicates. *Proceedings of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2015;(5):108–112. (In Russ.)
11. Земцов Ю.В., Мазаев В.В. *Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи: литературно-патентный обзор*. Екатеринбург: ООО «Издательские решения»; 2021. 239 с.  
Zemtsov Yu.V., Mazaev V.V. *Current state of physicochemical enhanced oil recovery methods: a literature and patent review*. Yekaterinburg: LLC «Izdatel'skie resheniya»; 2021. 239 p. (In Russ.)
12. Попов К.И., Ковалева Н.Е., Рузакова Г.Я. и др. Современное состояние разработок биоразлагаемых ингибиторов солеотложений для различных систем водопользования. *Теплоэнергетика*. 2016;(2):46–53. <https://doi.org/10.1134/S0040363616010094> (Перев. вер.: Popov K.I., Kovaleva N.E., Rudakova G.Y.,



- et al. Recent state-of-the-art of biodegradable scale inhibitors for cooling-water treatment applications (review). *Thermal Engineering*. 2016;63(2):122–129. <https://doi.org/10.1134/S0040601516010092>
- Popov K. I., Kovaleva N. E., Rudakova G. Y., et al. Recent state-of-the-art of biodegradable scale inhibitors for cooling-water treatment applications (review). *Thermal Engineering*. 2016;63(2):122–129. <https://doi.org/10.1134/S0040601516010092> (Orig. ver.: Popov K. I., Kovaleva N. E., Rudakova G. Y., et al. Recent state-of-the-art of biodegradable scale inhibitors for cooling-water treatment applications (review). *Teploenergetika*. 2016;(2):46–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363616010094>)
13. Siddiqui M. A. Q., et al. Current understanding of shale wettability: A review on contact angle measurements. *Earth-Science Reviews*. 2018;181:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.04.002>
14. Двойченкова Г. П., Коваленко Е. Г., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А. Повышение эффективности пенной сепарации алмазосодержащего материала за счет комбинированной очистки поверхности алмазов от шламовых гидрофилизирующих покрытий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(10):20–38. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_10\\_0\\_20](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_20)  
Dvoichenkova G. P., Kovalenko E. G., Timofeev A. S., Podkamenny Yu. A. Enhanced efficiency of diamond foam separation after complex removal of hydrophilic slime coats from diamond surface. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(10):20–38. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_10\\_0\\_20](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_20)
15. Богатов М. В., Юдин П. Е., Веревкин А. Г., Берков Д. В. Влияние гидрофильности, олеофильности на образование асфальтосмолопарафиновых отложений. *Нефтегазовое дело*. 2022;20(6):117–126. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-114-123>  
Bogatov M. V., Yudin P. E., Verevkin A. G., Berkov D. V. Effect of hydrophilicity, oleicity on formation of asphalt resin paraffin deposits. *Petroleum Engineering*. 2022;20(6):117–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-114-123>
16. Самара H., Jaeger P. Experimental determination of wetting behavior under non-atmospheric conditions relevant to reservoirs: a practical guide. *SN Applied Sciences*. 2022;4:85. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-04963-8>
17. Belhaj A. F., Elraies K. A., Mahmood S. M., et al. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;10(1):125–137. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0685-y9>
18. Третьяков Н. Ю., Паничева Л. П., Турнаева Е. А. и др. Синтез и изучение свойств алкилфосфатов как поверхностноактивных компонентов щелочно-ПАВ-полимерного состава для повышения нефтеотдачи пласта. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021;11(1):147–158. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-147-158>  
Tret'yakov N. Yu., Panicheva L. P., Turnaeva E. A., et al. Synthesis of alkyl phosphates and investigation of their surface-active properties in an alkaline surfactant polymer system for enhanced oil recovery. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(1):147–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-147-158>
19. Дерябин В. А., Фарафонтова Е. П. *Физическая химия дисперсных систем*. М.: Юрайт; 2018. 86 с.  
Deryabin V. A., Farafontova E. P. *Physical chemistry of disperse systems*. Moscow: Yurayt; 2018. 86 p. (In Russ.)
20. Кондратьев С. А. Обоснование механизма работы физически сорбированного собирателя в элементарном акте флотации. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(1):118–136. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210112> (Перев. вер.: Kondrat'ev S. A. Action of physisorbed collector in particle–bubble attachment. *Journal of Mining Science*. 2021;57(1):106–122. <https://doi.org/10.1134/S1062739121010129>)  
Kondrat'ev S. A. Action of physisorbed collector in particle–bubble attachment. *Journal of Mining Science*. 2021;57(1):106–122. <https://doi.org/10.1134/S1062739121010129> (Orig. ver.: Kondrat'ev S. A. Action of physisorbed collector in particle–bubble attachment. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2021;(1):118–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210112>)
21. Błaszków A., Ratajczak T., Szyszka D. Flotation of hydrophobic minerals in Hallimond tube. *Mining Science*. 2024;31:219–227. <https://doi.org/10.37190/msc243112>

## Информация об авторах

**Валентин Алексеевич Чантуря** – доктор технических наук, профессор, академик РАН, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4410-8182](https://orcid.org/0000-0002-4410-8182), Scopus ID [7004497128](https://scopus.com/scopus/7004497128), ResearcherID [J-9712-2014](https://orcid.org/J-9712-2014); e-mail [vchan@mail.ru](mailto:vchan@mail.ru)

**Валерий Валентинович Морозов** – доктор технических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://scopus.com/scopus/7402759618); e-mail [dchmgu@mail.ru](mailto:dchmgu@mail.ru)

**Елена Леонидовна Чантуря** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5757-4799](https://orcid.org/0000-0002-5757-4799), Scopus ID [57196009376](https://scopus.com/scopus/57196009376), ResearcherID [J-4214-2014](https://orcid.org/J-4214-2014); e-mail [elenachan@mail.ru](mailto:elenachan@mail.ru)



**Андрей Леонидович Самусев** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией теории разделения минеральных компонентов, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7324-0353](https://orcid.org/0000-0001-7324-0353), Scopus ID [54894913500](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54894913500); e-mail samusev\_a@ipkonran.ru

### Information about the authors

**Valentin A. Chanturiya** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4410-8182](https://orcid.org/0000-0002-4410-8182), Scopus ID [7004497128](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004497128), ResearcherID [J-9712-2014](https://orcid.org/J-9712-2014); e-mail vchan@mail.ru

**Valeriy V. Morozov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7402759618); e-mail dchmggu@mail.ru

**Elena L. Chanturiya** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Enrichment and Processing of Mineral Resources and Technogenic Raw Materials, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5757-4799](https://orcid.org/0000-0002-5757-4799), Scopus ID [57196009376](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196009376), ResearcherID [J-4214-2014](https://orcid.org/J-4214-2014); e-mail elenachan@mail.ru

**Andrey L. Samusev** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Theory of Mineral Components Separation, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7324-0353](https://orcid.org/0000-0001-7324-0353), Scopus ID [54894913500](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54894913500); e-mail samusev\_a@ipkonran.ru

**Поступила в редакцию**

01.09.2025

**Received**

01.09.2025

**Поступила после рецензирования**

30.09.2025

**Revised**

30.09.2025

**Принята к публикации**

01.10.2025

**Accepted**

01.10.2025