

Извлечение алмазов с аномальной кинетикой люминесценции: результаты экспериментальных исследований

И.В. Зырянов^{1,2}, А.В. Иванов✉¹, В.Н. Яковлев¹

¹ Институт «Якутнiproalmaz», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация

² Политехнический институт – филиал в Мирном Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Мирный, Российская Федерация

✉ IvanovAV@alrosa.ru

Резюме: Представлены результаты экспериментальных исследований извлечения алмазов с аномальной кинетикой люминесценции из месторождений Западной Якутии. Проведен анализ характеристик люминесценции алмазов, реализован новый алгоритм обнаружения алмазов типа IIa. Проведены расчеты по подбору оптимальной зоны возбуждения рентгеновской трубки. Представлены результаты внедрения на обогащаемых объектах АК «АЛРОСА» (ПАО) модернизации действующего оборудования и вновь изготавливаемых рентгенолюминесцентных сепараторов, оснатив их опциональным комплектом доработки. Модернизация с минимальными капитальными вложениями (доработка программного обеспечения) позволила оперативно реализовать попутное извлечение аномальных алмазов, т.е. алмазов, имеющих аномальную кинетику рентгенолюминесценции и не извлекавшихся ранее существующим оборудованием. Опытные технологические схемы извлечения алмазов типа IIa показали наличие данных алмазов на месторождениях, обрабатываемых Айхальским, Нюрбинским, Удачинским и Ломоносовским горно-обогатительными комбинатами. На Удачинской площадке были обнаружены особо ценные экземпляры алмазов. Проведенный мониторинг извлечения алмазов типа IIa крупностью более 5 мм показал, что прирост товарной продукции оценивается около 5 млн долл. США ежегодно.

Ключевые слова: аномальный алмаз, кинетика люминесценции, селективность, рентгенолюминесцентный сепаратор, рентгено-абсорбционный, эксперимент, руда, обогатительная фабрика, концентрат

Для цитирования: Зырянов И.В., Иванов А.В., Яковлев В.Н. Извлечение алмазов с аномальной кинетикой люминесценции: результаты экспериментальных исследований. *Горная промышленность*. 2022;(4):88–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-88-92>

Recovery of diamonds with anomalous luminescence kinetics: results of experimental studies

I.V. Zyrianov^{1,2}, A.V. Ivanov✉¹, V.N. Yakovlev¹

¹ Yakutniproalmaz Institute, AK "ALROSA", Mirny, Russian Federation

² Mirny Polytechnic Institute, Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation

✉ IvanovAV@alrosa.ru

Abstract: The paper presents the results of experimental studies to recover diamonds with anomalous luminescence kinetics from deposits in Western Yakutia. The characteristics of diamond luminescence are analyzed and a new algorithm for detecting Type IIa diamonds is implemented. Calculations were carried out to select the optimum X-ray tube settings for fluorescence excitation. The results of upgrading the existing equipment and introducing newly manufactured X-ray luminescence separators by equipping them with an optional upgrade kit at ALROSA's concentration facilities are presented. Upgrading with minimal capital investment, i.e. software modification, made it possible to promptly implement recovery of the high-value anomalous diamonds. Pilot technological workflows for extraction of Type IIa diamonds showed presence of these diamonds in the deposits developed by the Aikhal, Nyurba, Udachny and Lomonosov mining and processing plants. The Udachny site was found to have particularly valuable diamond specimens. Monitoring of recovery of Type IIa diamonds greater than 5 mm in size has shown that the increase in marketable products is estimated at about USD 5 million annually.

Keywords: anomalous diamond, luminescence kinetics, selectivity, X-ray luminescence separator, X-ray absorption, experiment, ore, processing plant, concentrate

For citation: Zyrianov I.V., Ivanov A.V., Yakovlev V.N. Recovery of diamonds with anomalous luminescence kinetics: results of experimental studies. *Russian Mining Industry*. 2022;(4):88–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-88-92>

Введение

Основным методом обогащения алмазов на обогатительных объектах АК «АЛРОСА» (ПАО) является рентгенолюминесцентный, основанный на свойствах алмазов люминесцировать в видимой области спектра под воздействием рентгеновского излучения. Современные рентгенолюминесцентные сепараторы (далее – РЛС) используют импульсный режим работы рентгеновской трубки (далее – РТ) и при выборке минералов определяют кинетические характеристики люминесценции, благодаря которым достигаются высокие показатели извлечения алмазов и сокращения исходной руды. Введенные с 2006 г. в систему обнаружения сепараторов кинетические признаки разделения руды позволили значительно увеличить селективность и повысить извлечение слаболюминесцирующих алмазов [1]. Однако исследование алмазов из хвостовых продуктов РЛС показывает, что кроме низкосортных алмазов типа «Boart»¹ со слабой люминесценцией и стоимостью менее двух долларов США за карат встречаются прозрачные алмазы ювелирного качества со средней стоимостью, достигающей 1000 и более долл. США за карат.

Результаты исследований

В ходе проведения технологических испытаний новой модификации сепараторов для доводки концентратов тяжелосредних установок на обогатительной фабрике №16 Нюрбинского ГОКа (далее – ОФ №16) был извлечен алмаз весом более 3 карат (рис. 1).



Рис. 1
Алмаз стоимостью 1500 долл./ карат, извлеченный на ОФ №16



Fig. 1
A diamond worth of \$1,500/ carat, recovered at Processing Plant No.16

По физической классификации такие алмазы относятся к типу IIa, так называемые безазотные алмазы с минимальным количеством примесей, что сказывается на чистоте кристаллов и, соответственно, оценивается значительно дороже. Содержание их относительно всех алмазов из якутских месторождений, по данным Е.В. Соболева, насчитывается не более 1–2% [2].

Для определения содержания слаболюминесцирующих и аномальных алмазов размерами более 5 мм на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» (ПАО) были проведены исследования с помощью сепаратора Tomra Tertiary XRT/D (далее – XRT/D), способного извлекать все алмазы вне зависимости от люминесцентных свойств алмазов². В труб-

ках Интернациональная и Мир алмазов типа IIa с нехарактерной кинетикой люминесценции не было обнаружено, а вот в трубке Юбилейная и на месторождениях Накынско-го рудного поля (тр. Ботуобинская и тр. Нюрбинская) подобные алмазы обнаруживаются и при этом имеют значительные сколы, указывающие на то, что алмазы были более крупного размера и, соответственно, значительно дороже. Обработка исходной руды месторождения «Юбилейное» класса крупности –13+6 мм сепаратором XRT/D выявила в концентратах наряду с алмазами с типовой люминесценцией (которые составляли более 99%) алмазы с аномальной кинетикой люминесценции со средней оценкой в 600 \$/ct, которые представлены на рис. 2.



Рис. 2
Алмазы с аномальной кинетикой люминесценции из тр. Юбилейная

Fig. 2
Diamonds with anomalous luminescence kinetics from the Yubileynaya Tube

Проведенные спектрографические и морфологические исследования показали, что выявленная группа аномальнолюминесцирующих алмазов на 90% состоит из прозрачных, часто окрашенных в дымчато-коричневый цвет кристаллов I разновидности, по Ю.Л. Орлову [3]. В основном эта группа алмазов представлена обломками и осколками с техногенными сколами и относится к спектральному типу IIa («безазотные»).

Измерение рентгенолюминесцентных свойств выделенных алмазов выявляет нехарактерную (для алмазов из концентратов РЛС) кинетику люминесценции, заключающуюся в свечении алмаза во время воздействия импульса РТ ($t_1 - t_2$ на рис. 3) – быстрая компонента люминесценции (далее – БК), и при его окончании – резком затухании люминесценции медленной компоненты (далее – МК) (рис. 3).

Зачастую значение люминесценции МК от таких алмазов ниже порога выделения сепаратора, а если и выше, то по кинетическим характеристикам такие алмазы не попадают в концентрат и уходят в циркуляцию обогатительной фабрики, где подвергаются дальнейшему разрушению.

Подобные алмазы можно извлекать с помощью рентгено-абсорбционных сепараторов (типа XRT/D), использующих степень ослабления рентгеновского излучения минералами, транспортируемыми конвейером³. Однако данная техника имеет жесткие требования к подготовке материа-

¹ ГОСТ Р 51519-99 Алмазы природные. Введ. 2000-09-01. М.: Издательство стандартов, 2000. 11 с.

² <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/sorting-equipment/com-series/com-xrt>

³ <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/case-studies/gem-diamonds>

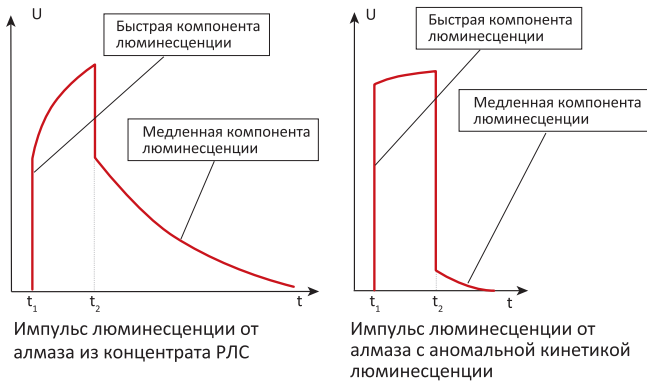


Рис. 3
Импульсы рентгенолюминесценции алмазов (слева – от алмаза из концентратов РЛС, справа – от алмаза с аномальной кинетикой люминесценции)

Fig. 3
X-ray luminescence pulses of diamonds (left: diamond from the X-ray luminescence separator, right: diamond with anomalous kinetics)

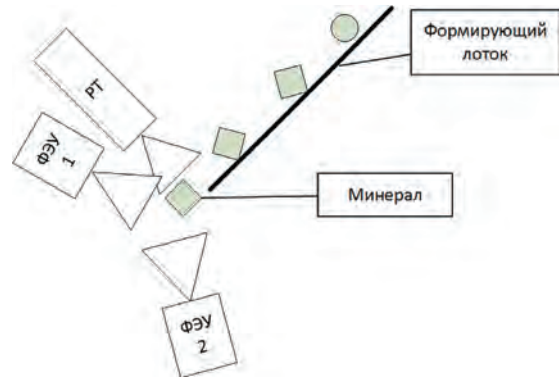


Рис. 4
Схема работы люминесцентно-абсорбционного режима работы РЛС

Fig. 4
Schematic diagram of the luminescence-absorption operation of the X-ray luminescence separator

ла, способна стабильно извлекать только крупные алмазы размерами более 4 мм, дорогостоящая в обслуживании и имеет значительно более высокую стоимость по сравнению с РЛС производства АО «ИЦ «Буревестник»⁴. Извлечение алмазов типа IIa, имеющих аномальную кинетику люминесценции, с помощью первичных способов обогащения – РЛС, позволит добывать особо крупные кристаллы исключительной чистоты в превозданном виде.

Кинетика рентгенолюминесценции аномальных алмазов характеризуется значительной БК и небольшой МК, при этом отношение этих компонент (БК+МК)/МК более 12, не характерное для алмазов с типичной люминесценцией [4]. Если проводить обнаружение только по уровню БК, то в концентрат будет попадать значительное количество сопутствующих люминесцирующих минералов, что резко снизит селективность процесса. Поэтому было решено использовать люминесцентно-абсорбционный режим работы РЛС, схема которого представлена на рис. 4.

Сформированный поток руды облучается рентгеновской трубкой (РТ) и с помощью фотоприемников 1 и 2 (ФЭУ 1 и ФЭУ 2 на рис. 4) анализируется импульс люминесценции минерала как со стороны облучения, так и с обратной стороны. Для алмазов, прозрачных для рентгена, значение отношений компонент как по МК, так и по БК, будет неболь-

шим, а для сопутствующих минералов будет значительно большим [5]. Проведенный анализ алмазов типа IIa, извлеченных сепаратором ХРТ/D, показал наличие у них не только БК люминесценции, но и МК, порой превышающей порог разделения сепараторов РЛС. По этой причине был доработан алгоритм обнаружения алмазов с аномальной кинетикой люминесценции, применявшийся в ранних алгоритмах обнаружения, разработанных АО «ИЦ «Буревестник», в котором оценивался критерий по уровню БК в люминесцентно-абсорбционном режиме работы, а параметр МК при этом не учитывался.

Проведенные исследования кинетики рентгенолюминесценции аномальных алмазов в зависимости от количества импульсов облучения РТ показали возрастание уровня люминесценции и изменение селективных характеристик, что не характерно для алмазов I типа, уровень люминесценции которых становится максимальным после 2–3 импульсов возбуждения РТ длительностью 500 мкс. В табл. 1, 2 представлены типичные значения МК, БК и селективных признаков люминесценции для алмазов с аномальной кинетикой люминесценции.

На рис. 5 и 6 представлены полученные значения МК и БК в зависимости от количества импульсов облучения РТ соответственно.

Таблица 1
Рентгенолюминесцентные свойства алмаза №1

Table 1
X-ray luminescence properties of diamond No.1

Количество импульсов РТ	Свертка*	Т _{ау} *, мс	Отношение компонент*	МК, мкА	БК, мкА
1	0,02	6,1	35,7	0,0026	0,090
2	0,04	3,2	21,3	0,0045	0,091
5	0,05	5,76	16,6	0,0070	0,109
10	0,05	4,9	16,7	0,0082	0,129
20	0,04	3,8	21,4	0,0070	0,143
40	0,03	4,55	24,6	0,0060	0,141

* селективные критерии разделения (<http://bourestnik.ru/products/separatory/>)

Таблица 2
Рентгенолюминесцентные свойства алмаза №2

Table 2
X-ray luminescence properties of diamond No.2

Количество импульсов РТ	Свертка	Тау, мс	Отн	МК, мкА	БК, мкА
1	0,06	6,2	15,4	0,0055	0,079
2	0,09	9,5	10,1	0,0097	0,088
5	0,14	6,7	7,2	0,0150	0,093
10	0,14	12	6,7	0,0173	0,099
20	0,12	7,7	7,4	0,0162	0,104
40	0,1	4,64	9,2	0,0136	0,112

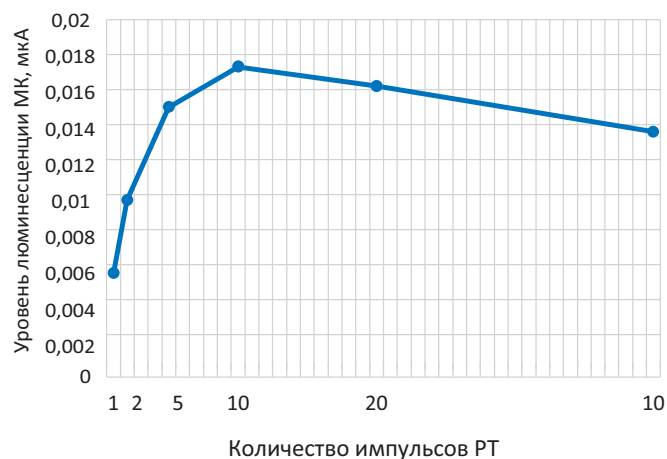


Рис. 5
Зависимость уровня люминесценции МК от количества импульсов РТ

Fig. 5
Dependence of the slow component luminescence level on the number of the X-Ray tube pulses

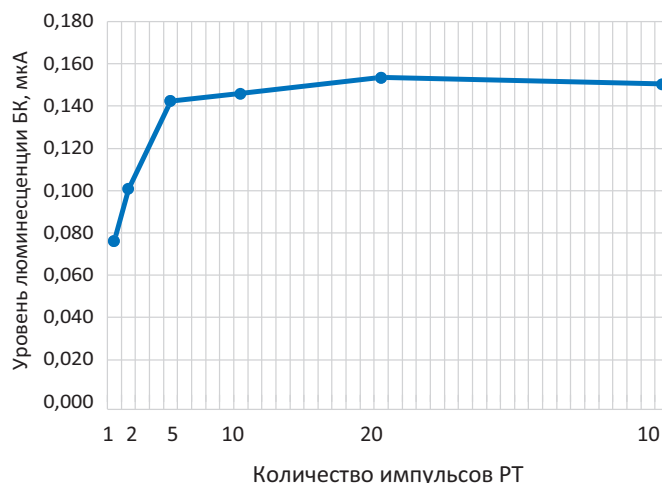


Рис. 6
Зависимость уровня люминесценции БК от количества импульсов РТ

Fig. 6
Dependence of the fast component luminescence level on the number of the X-Ray tube pulses

Как видно из рис. 5, при увеличении импульсов возбуждения РТ свыше 10 идет небольшое снижение люминесценции МК алмаза, что связано с взаимодействиями дефектных центров в алмазе, вероятнее всего, из-за вмешательства парных ассоциаций азота в структуре алмаза, в результате чего происходит тушение люминесценции [6]. Анализ изменения кинетических характеристик люминесценции по МК и БК (см. рис. 5 и 6) в зависимости от количества импульсов РТ показал, что максимум насыщения люминесценции данных алмазов происходит при 10 импульсах, а для уровня 90% люминесценции алмаза достаточно 5 импульсов рентгеновского облучения. Дальнейшее увеличение «накачивания» алмазов рентгеновским облучением ведет к так называемому «тушению» люминесценции, когда фотоны поглощаются дефектными центрами внутри алмаза. Характер люминесценции алмазов с аномальной кинетикой показывает, что в алмазе имеются различные центры люминесценции (дефекты кристаллической решетки) в зависимости от содержания примесей при формировании алмаза. Эти центры характеризуются длительностью и характером люминесценции при воздействии рентгеновского излучения.

Для облучения 5–7 импульсами РТ с длительностью 500 мкс и периодичностью в 4 мс необходимо, чтобы минерал находился в зоне облучения в течение 20–30 мс. Для сепараторов первичного обогащения ЛС-20-05Н(2Н) производства АО «ИЦ «Буревестник» на классах крупно-

сти более 5 мм скорость рудного материала составляет около 2,5 м/с, значит на нём достаточно 50–75-миллиметровой зоны облучения РТ. Для доводочных сепараторов ЛС-ОД-50-03Н производства АО «ИЦ «Буревестник» на классах крупности более 5 мм скорость рудного материала составляет около 1,5 м/с, значит на нём необходимо придерживаться зоны облучения РТ шириной 30–40 мм. Учитывая геометрию расположения рентгенооптических блоков в сортировочных машинах данных сепараторов, хватит одной РТ с увеличением ширины коллиматорной щели (относительно стандартной), что также способствует более эффективному использованию потенциала рентгеновской трубки БХВ-21(22)⁵.

Заключение

Проведенные исследования алмазов с аномальной кинетикой люминесценции институтом «Якутнипроалмаз» позволили модернизировать изготавливаемые серийно АО «ИЦ «Буревестник», дочерним обществом АК «АЛРОСА» (ПАО), сепараторы ЛС-20-05Н(2Н), ЛС-50-05 и ЛС-ОД-50-03Н, оснастив их опциональным комплектом доработки (ОКДС). В этих сепараторах наряду с шириной зоны возбуждения, позволяющей эффективно «разжигать» люминесценцию аномальных алмазов, реализован новый алгоритм обнаружения алмазов, работающий в люминесцентно-абсорбционном режиме и позволяющий извлекать как типовые,

5 <http://www.svetlana-x-ray.ru/production.html>

так и алмазы с аномальной кинетикой люминесценции. Модернизация действующих РЛС на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» (ПАО) с минимальными капитальными вложениями (доработка программного обеспечения) позволила оперативно реализовать извлечение дорогостоящих аномальных алмазов параллельно с основной продукцией обогатительных фабрик. Реализованные на первых этапах опытные технологические схемы извлечения алмазов типа IIa показали наличие данных алмазов на месторождениях, обрабатываемых Айхальским, Нью-

бинским, Удачинским и Ломоносовским ГОКа. На Удачинской площадке были обнаружены особо ценные экземпляры, оценочная стоимость которых может достигать нескольких миллионов долларов. Проведенный мониторинг извлечения алмазов типа IIa крупностью более 5 мм по опытной схеме показал, что прирост товарной продукции на ОФ №12 Удачинского ГОКа оценивается не менее 5 млн долл. США ежегодно.

Список литературы

1. Макалин И.А., Иванов А.В. Интенсификация процесса рентгенолюминесцентной сепарации на предприятиях АК «АЛРОСА». *Горный журнал*. 2010;(12):69-73. Режим доступа: <https://rudmet.ru/journal/455/article/4061/>
2. Квасков В.Б. (ред.) *Природные алмазы России*. М.: Полярон; 1997. 304 с.
3. Орлов Ю.Л. *Минералогия алмаза*. М.: Наука; 1984. 264 с.
4. Яковлев В.Н., Макалин И.А., Иванов А.В. Повышение извлечения алмазов и селективности процесса рентгенолюминесцентной сепарации при обогащении алмазосодержащих руд. *Горное оборудование и электромеханика*. 2009;(6):50-53.
5. Владимиров Е.Н., Бубыр Е.В. Регистрация и цифровая обработка сигналов люминесценции в сепараторах алмазов. *Современная электроника*. 2014;(2):68-73. Режим доступа: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/73a/73abc6dc5eb18cd6ac6b33949e0b7c81/20140268.pdf>
6. Соболев Е.В. *Тверже алмаза (очерки)*. 2-е изд. Новосибирск: Наука; 1989. 192 с.

References

1. Makalin I.A., Ivanov A.V. Intensification of the process of X-ray luminescent separation at the enterprises of AC "ALROSA". *Gornyi Zhurnal*. 2010;(12):69-73. (In Russ.) Available at: <https://rudmet.ru/journal/455/article/4061/>
2. Kvaskov V.B. (ed.) *Natural diamonds of Russia*. Moscow: Polyaron; 1997. 304 p. (In Russ.)
3. Orlov Yu.L. *Mineralogy of diamonds*. Moscow: Nauka; 1984. 264 p. (In Russ.)
4. Yakovlev V.N., Makalin I.A., Ivanov A.V. Rise of diamonds extraction and X-ray separation selectivity process during diamond ore concentration. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2009;(6):50-53. (In Russ.)
5. Vladimirov E.N., Bubyr E.V. Registration and digital processing of luminescence signals in diamond separators. *Sovremennaya elektronika*. 2014;(2):68-73. (In Russ.) Available at: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/73a/73abc6dc5eb18cd6ac6b33949e0b7c81/20140268.pdf>
6. Sobolev E.V. *Harder than a diamond (essays)*. 2nd ed. Novosibirsk: Nauka; 1989. 192 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Зырянов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Института «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; заведующий кафедрой горного дела, Политехнический институт – филиал в Мирном Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru

Иванов Андрей Витальевич – главный специалист лаборатории радиометрической сепарации Института «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: IvanovAV@alrosa.ru

Яковлев Виктор Николаевич – заведующий лабораторией радиометрической сепарации Института «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: YakovlevVN@alrosa.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.07.2022

Поступила после рецензирования: 21.07.2022

Принята к публикации: 23.07.2022

Information about the authors

Igor V. Zyrianov – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Research, Yakutniproalmaz Institute, AK "ALROSA", Mirny, Russian Federation; Head of the Department Mining, Mirny Polytechnic Institute, Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation; e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru

Andrey V. Ivanov – Chief Specialist of the Radiometric Separation Laboratory, Yakutniproalmaz Institute, AK "ALROSA", Mirny, Russian Federation; e-mail: IvanovAV@alrosa.ru

Viktor N. Yakovlev – Head of the Radiometric Separation Laboratory, Yakutniproalmaz Institute, AK "ALROSA", Mirny, Russian Federation; e-mail: YakovlevVN@alrosa.ru

Article info

Received: 01.07.2022

Revised: 21.07.2022

Accepted: 23.07.2022