

Алмазы россыпного месторождения реки Моргогор (Анабар, Якутия)

С. В. Вяткин¹, Г. Ю. Криулина^{1,2}, Л. Д. Бардухинов², В. К. Гаранин³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: vyt_box@mail.ru

²ВГРЭ АК “АЛРОСА” ПАО, 678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Тихонова, 3/3, e-mails: galinadiamond@gmail.com; BardukhinovLD@alrosa.ru

³Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана, 115162, г. Москва, Ленинский проспект, 18, к. 2, e-mail: vgaranin@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г., принята к печати 21.08.2023 г.

Объект исследования. Россыпное месторождение алмазов реки Моргогор, Анабар, Якутия, геологическая история образования которого достоверно не установлена, коренные источники неизвестны. **Цель.** Описание минералогических и спектроскопических характеристик алмазов месторождения р. Моргогор в сравнении с изученными ранее алмазами россыпи р. Эбелях. Разделение алмазов на генетические группы, предположительно отражающее первоисточники сноса, по распределению содержания А-центров. Оценка устойчивости минералогических и спектроскопических признаков для выделения генетических групп. **Материалы и методы.** Используются данные о 1386 кристаллах алмаза, добытых с 1978 по 2018 гг. Для 1168 из них сделаны покристалльные описания; ИК спектроскопические исследования проведены для 103 алмазов, информативные ЭПР-спектры получены для 61 алмаза. **Результаты.** С использованием данных ИК-спектроскопии алмазы р. Моргогор разделены на три группы по содержанию центров А по методике, разработанной при исследовании алмазов р. Эбелях. Алмазы разных групп значительно отличались по комплексу признаков, в том числе по габитусу и морфологии кристаллов, развитию процессов пластической деформации, содержанию включений, наличию и разнообразию визуальной люминесценции, а также ассоциаций парамагнитных центров. Различие между выборками кристаллов р. Моргогор и р. Эбелях проявилось в соотношении долей генетических групп, что можно интерпретировать как влияние географического фактора – расположения по отношению к источникам и направлениям сноса на всех этапах формирования россыпи. **Выводы.** Алмазы р. Моргогор, имеют те же три первичных источника, что и алмазы р. Эбелях. Статистическое разделение кристаллов по первоисточникам – генетическим группам – возможно на основе распределения по содержанию центров А. Такое разделение формирует группы, алмазы которых отличаются не только по ИК-характеристикам, но и по группе морфологических признаков и характеру люминесценции. Статистически значимые выборки алмазов различных россыпей Анабара различаются по соотношению долей генетических групп, что отражает их географическое положение, с поправкой на направления сноса в процессах формирования и перераспределения россыпей. Полученные данные могут быть использованы для выявления направлений сноса и, в конечном итоге, для поиска его первоисточников.

Ключевые слова: алмаз, Анабар, Моргогор, россыпи, типоморфизм, ИК, ЭПР

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках НИР МГУ им. М.В. Ломоносова, цитис 121061600049-4

Diamonds of the Morgogor placer (Anabar, Yakutia)

Sergey V. Vyatkin¹, Galina Y. Kriulina^{1,2}, Leonid D. Bardukhinov², Viktor K. Garanin³

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie gory, 119991 Moscow, Russia, e-mail: vyt_box@mail.ru

²Vilyuiskaya GRE of PJSC ALROSA, 3/3 Tikhonov st., 678170 Mirny, Sakha Republic, Russia, e-mails: galinadiamond@gmail.com; BardukhinovLD@alrosa.ru

³A.E. Fersman Mineralogical Museum, 18/2 Leninskii av., 115162 Moscow, Russia, e-mail: vgaranin@mail.ru

Received 19.05.2023, accepted 21.08.2023

Research subject. The placer diamond deposit of the Morgogor River, Anabar, Yakutia. The geological history of this deposit has not been reliably established, and the root sources remain unknown. **Aim.** To describe the mineralogical and spectroscopic characteristics of diamonds from the Morgogor river deposit in comparison with the previously studied dia-

Для цитирования: Вяткин С.В., Криулина Г.Ю., Бардухинов Л.Д., Гаранин В.К. (2023) Алмазы россыпного месторождения реки Моргогор (Анабар, Якутия). *Литосфера*, 23(4), 672-682. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-672-682>

For citation: Vyatkin S.V., Kriulina G.Y., Bardukhinov L.D., Garanin V.K. (2023) Diamonds of the Morgogor placer (Anabar, Yakutia). *Lithosphere (Russia)*, 23(4), 672-682. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-672-682>

monds from the Ebelyakh river placer. To divide the studied diamonds into genetic groups, presumably reflecting the primary sources of demolition, according to the distribution of A-centers. To assess the stability of mineralogical and spectroscopic features for the identification of genetic groups. *Materials and Methods.* Data on 1386 diamond crystals mined from 1978 to 2018 were used. Detailed descriptions were made for 1168 of them; IR spectroscopic studies were carried out for 103 diamonds; informative EPR spectra were obtained for 61 diamonds. *Results.* Using IR spectroscopy data, the Morgogor diamonds were divided into three groups based on the content of A-centers according to the methodology previously developed for the study of Ebelyakh diamonds. The diamonds of the studied groups differed significantly in terms of the habitus and morphology of crystals, the development of plastic deformation processes, the content of inclusions, the presence and diversity of visual luminescence, as well as associations of paramagnetic centers. The difference between the Morgogor and Ebelyakh samples consisted in the ratio of the shares of genetic groups, which can be interpreted as the influence of a geographical factor, i.e., location in relation to the sources and directions of demolition at all stages of placer formation. *Conclusions.* The diamonds of the Morgogor river have the same three primary sources as the diamonds of the Ebelyakh river. Statistical separation of crystals by primary sources – genetic groups – is possible based on the distribution of the content of A-centers. This separation forms groups, whose diamonds differ not only in IR characteristics, but also in the morphological features and the nature of luminescence. The statistically significant samples of diamonds from various Anabar placers differ in the ratio of the shares of genetic groups, which reflects their geographical location, adjusted for the directions of demolition in the processes of formation and redeposition of placers. The data obtained can be used to identify the directions of demolition and, ultimately, to search for its primary sources.

Keywords: diamond, Anabar, Morgogor, placers, typomorphism, IR, EPR

Funding information

The work was carried out as part of the research work of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, citis 121061600049-4

Acknowledgements

The authors express their appreciation to PJSC ALROSA for the opportunity to carry out investigations and publish this material.

ВВЕДЕНИЕ

Россыпное месторождение алмазов реки Моргогор открыто в 1965 г. и охватывает участок речной долины протяженностью 26 км вверх по течению от слияния с рекой Эбелях. Отработка месторождения началась в 2006 г. Широкая (от 150 до 3000 м) долина р. Моргогор прорезает карбонатные породы среднего кембрия, представленные доломитами Анабарской свиты и верхнечетвертичными осадочными породами. Террасовидные борта долины сложены гравием и песчаником и покрыты торфами. Промышленная часть россыпи включает осадочные породы днища долины, нижней и верхней пойменной террас, бортовых террас выше уровня поймы и пород переотложенной коры выветривания. Среднее содержание алмазов изменяется как по простиранию россыпи, так и поперек долины. Наиболее высокие содержания (до 4.86 кар/м³) получены из флювиальных осадков верхнечетвертичного периода. Несмотря на многочисленные подробные исследования (Граханов, 2000; Афанасьев и др., 2002; Граханов, Коптиль, 2003; Зинчук, Коптиль, 2003; Афанасьев и др., 2011; Шацкий и др., 2011; Zedgenizov et al., 2016, 2017), геологическая история образования россыпи Моргогор, как и других алмазоносных россыпей Анабара, достоверно не установлена, коренные источники неизвестны. При этом россыпные алмазы северо-востока Сибирской платформы значительно отличаются от ал-

мазов коренных месторождений Якутии по целой группе морфологических и спектроскопических признаков, в том числе изотопному составу углерода и примесного азота (Зинчук, Коптиль, 2003; Афанасьев и др., 2011; Шацкий и др., 2011; Zedgenizov et al., 2016, 2017; Zemnukhov et al., 2020). Характерной особенностью алмазов Анабара является присутствие избыточного количества, по сравнению с другими алмазными ассоциациями месторождений России, кристаллов II разновидности по классификации Ю.Л. Орлова (1984), обладающих комплексом своеобразных характеристик (Zedgenizov et al., 2016, 2017), а также алмазов V и VII разновидностей (Зинчук, Коптиль, 2003; Афанасьев и др., 2011; Шацкий и др., 2011).

Однако уже не подвергается сомнению тот факт, что коренных источников алмазов было несколько, а сам процесс сноса и переотложения являлся многостадийным (Граханов, 2000; Афанасьев и др., 2002; Граханов, Коптиль, 2003; Владыкин, Торбева, 2005). В данной работе, на основе представительных коллекций алмазов россыпи р. Моргогор, их минералогические и спектроскопические характеристики впервые описаны с позиций статистического распределения и в сравнении с полученными для алмазов р. Эбелях.

В работе (Вяткин и др., 2022) нами было предложено разделение алмазов россыпного месторождения р. Эбелях на три группы (“А”, “Б” и “В”), предположительно отражающие первоисточники

сноса, согласно характеру распределения алмазов по концентрации А-центров. А-центры представляют собой парное замещение двух соседних атомов углерода на азот в кристаллической структуре алмаза – один из наиболее широко распространенных азотных структурных центров, концентрация которого надежно устанавливается методом ИК-спектроскопии. Содержание А-центров определяется количеством азота, полученным алмазом в процессе роста, и процессами его агрегации, зависящими от продолжительности и температурного режима стадий его дальнейшей геологической истории. Распределение по концентрации А-центров алмазов какого-либо коренного источника (трубки) обычно имеет один ярко выраженный максимум. Установление трех таких максимумов в распределении алмазов россыпи Эбелях было интерпретировано нами как наличие трех источников сноса при формировании россыпи, а формирующие эти максимумы кристаллы выделены в генетические группы “А”, “Б” и “В”. Кристаллы полученных в работе (Вяткин и др., 2022) генетических групп отличались друг от друга не только содержанием А-центров, но и комплексом морфологических и спектроскопических признаков. Следует, однако, отметить, что разделение выборок алмазов на генетические группы по концентрации А-центров является статистическим, пики “А”, “Б” и “В” в распределении имеют не только выраженные максимумы, но и боковые участки, пересекающиеся с соседними областями. Таким образом, в выборке всегда находится некоторое количество кристаллов, отнесение которых к той или иной группе носит вероятностный характер, и может быть уточнено по дополнительным признакам, выявленным для генетических групп.

Группа “А” сопоставлена нами по свойствам алмазов с предполагаемым (Зинчук, Коптиль, 2003; Афанасьев и др., 2011) первоисточником лампрои-

тового генезиса, к этой же группе мы отнесли значительное количество алмазов II разновидности по классификации Ю.Л. Орлова. Алмазы группы “Б” по своим свойствам соответствуют описанному в работах (Зинчук, Коптиль, 2003; Афанасьев и др., 2011) “кимберлитовому” типу первоисточника. Выделенная нами группа “В” отвечает за появление в россыпях Анабара значительного количества кристаллов алмаза V и VII разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова.

Описание алмазов р. Моргогор дано в сравнении с изученными ранее (Вяткин и др., 2022) алмазами россыпи Эбелях, которые были получены с ее участка между ручьями Гусиный и 53; исследованные алмазы россыпи Моргогор были разделены на генетические группы согласно описанной в этой работе методике. Фотографии типичных представителей генетических групп “А”, “Б” и “В” даны на рис. 1. Также на примере алмазов р. Моргогор рассмотрена устойчивость минералогических и спектроскопических признаков для выделения генетических групп.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные о 1386 кристаллах алмаза, добытых дочерним обществом акционерной компании “АЛРОСА” (ПАО) АО “Алмазы Анабара” с 1978 по 2018 гг. Для 1168 из них сделаны покристалльные описания; ИК спектроскопические исследования проведены для 103 алмазов, информативные ЭПР спектры получены для 61 алмаза. Минералогическое описание алмазов сделано под биноклем Motic SMZ-143 с УФ осветителем-боксом. ИК спектроскопические исследования алмазов проводились на ИК-Фурье спектрометре Bruker VERTEX 70 в комплексе с ИК-микроскопом Hyperion 2000. Диапазон измерений: 400–5500 см⁻¹. Нормирование спектров осуществлялось по погло-



Рис. 1. Алмазы р. Моргогор групп “А”, “Б” и “В” соответственно.

Фотографии алмазов приведены в одном масштабе, поля зрения 7 × 5.2 мм.

Fig. 1. Diamonds of the Morgogor river of groups “A”, “B” and “B”, respectively.

Photos of diamonds in are shown on the same scale, the field of view is 7 × 5.2 mm.

щению в двухфонной области (Бокий и др., 1986; Zaitsev, 2001). По спектрам определялись концентрации А-, В1-, В2-дефектов алмазов. Коэффициенты поглощения на частотах 1973 см^{-1} и 2500 см^{-1} , соответственно, $\alpha_{1973} = 12.5\text{ см}^{-1}$ и $\alpha_{2500} = 4.9\text{ см}^{-1}$ были выбраны в качестве параметров внутреннего стандарта. Общая концентрация азота (N_{tot}) и доля азота в форме дефектов В (%В) вычислялись по известным коэффициентам пропорциональности (Zaitsev, 2001). Спектры ЭПР регистрировали на спектрометрах Varian E-115 и CMS-8400. Спектры снимались в ориентировке L4||H, юстировка производилась по угловой зависимости центров P1 (либо W7), при их отсутствии регистрировались только центры P2 и N2. Расчет концентраций производился по соотношениям интенсивностей линий с помощью эталонных образцов. Минералогическое описание алмазов проводилось по следующей схеме: габитус кристалла, разновидность по классификации Ю.Л. Орлова, морфология поверхности – формы роста и растворения, локальное травление, наличие двойников и сростков, степень сохранности, характер и интенсивность окраски, визуальная оценка наличия и состава включений, а также цвета, однородности и интенсивности фотолуминесценции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как и для россыпи Эбелях, распределение алмазов р. Моргогор по концентрации А-центров имеет несколько максимумов, однако их взаим-

ные соотношения (доли) иные (рис. 2). В сравнении с распределением для россыпи Эбелях, в выборке алмазов р. Моргогор выросли доли кристаллов групп “А” (интервал по концентрации центров А $\approx 0\text{--}300\text{ ppm}$) и “Б” ($\approx 300\text{--}750\text{ ppm}$), причем содержание в выборке кристаллов группы “А” повысилось значительно. Соответственно, снизилась доля алмазов группы “В” ($\approx 750\text{--}1600\text{ ppm}$). Согласно предложенной модели разделения, соотношение долей генетических групп должно зависеть от расположения по отношению к источникам и направлениям сноса на всех этапах формирования россыпи.

Для кристаллов алмаза р. Моргогор, как и для всех россыпных месторождений Анабарского района, характерно большое разнообразие габитусных форм и разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова. Распределение исследованных алмазов по этим критериям близко к кристаллам россыпи Эбелях, однако есть и закономерные отличия, отраженные в табл. 1.

Среди отличий следует отметить увеличение доли октаэдров и уменьшение содержания переходных форм октаэдр-ромбододекаэдр, при этом общая доля плоскогранно-кривогранных форм практически не изменилась (12.6% для р. Эбелях и 12.1% для р. Моргогор). Также изменилось общее соотношение между додекаэдроидами уральского типа и ламинарными, значительно увеличились доли алмазов II и VII групп, а также появились (возможно, из-за значительного увеличения выборки) кристаллы VI и XI групп по Ю.Л. Орлову.

Практически все эти изменения соответствуют модели разделения на генетические группы. Рост

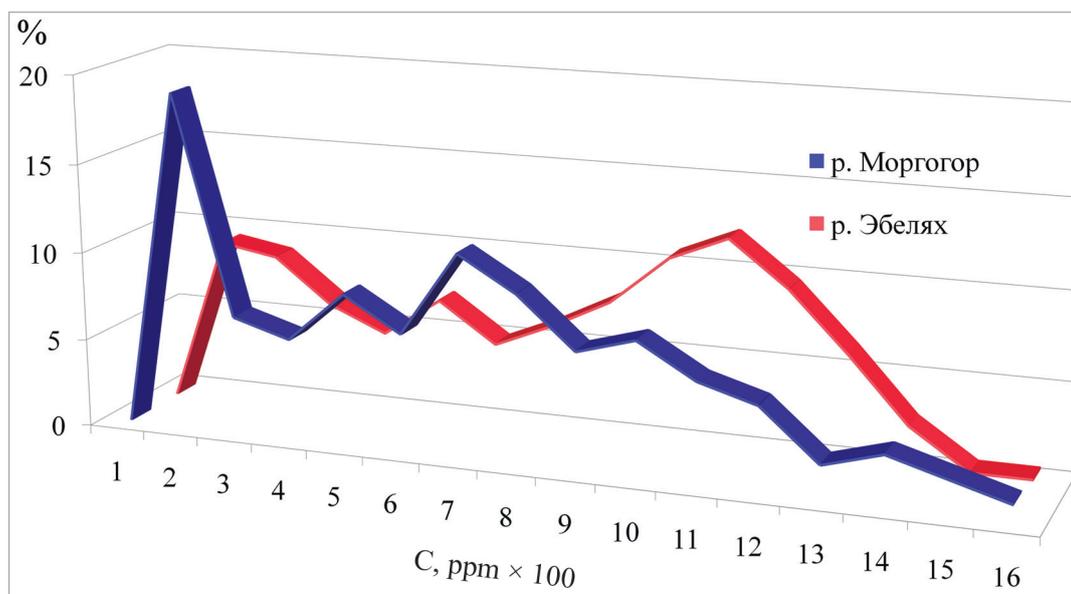


Рис. 2. Гистограмма распределения алмазов россыпей Эбелях и Моргогор по содержанию А-центров.

Fig. 2. A histogram of the distribution of diamonds in the Ebelakh and Morgogor placers by the content of A-centers.

Таблица 1. Частота встречаемости кристаллов алмаза россыпей Эбелях и Моргогор по габитусным типам и разновидностям по классификации Ю.Л. Орлова**Table 1.** The frequency of occurrence of diamond crystals of the Ebelakh and Morgogor placers by habitus types and varieties according to the classification of Y.L. Orlov

Разновидности по классификации Ю.Л. Орлова	Разновидность	Габитус кристаллов	Эбелях, %	Моргогор, %	
	I	Октаэдр		1.8	5.0
		Октаэдр–додекаэдроид		6.0	5.8
		Октаэдр–ромбододекаэдр		4.8	1.2
		Додекаэдроид уральского типа		28.1	15.7
		Ламинарный додекаэдроид		23.9	27.8
		Псевдоромбододекаэдр		5.1	0.4
		Д–псевдокуб, тетрагексаэдр		1.3	1.7
		Псевдогемиморфные формы			0.4
		Неопределенные формы		0.7	2.7
II	Куб, куб–додекаэдр, тетрагексаэдр		0.9	4.4	
III	Куб		0.1		
IV	Алмаз в оболочке		0.3	1.1	
V	Октаэдр–додекаэдроид		17.0	17.1	
VI	Балласоподобные формы			0.2	
VII	Сростки октаэдр–додекаэдроид		9.9	15.0	
XI	Якутиты			0.8	

общего процентного содержания октаэдров предсказуемо обусловлен резким увеличением доли группы “А”, внутри которой они составили 17.9%. Также связано с ростом доли группы “А” увеличение общего содержания ламинарных додекаэдров и алмазов II группы по Ю.Л. Орлову, они составили внутри группы 35.7% и 4.4% от всех кристаллов соответственно. Снижение до 15.7% содержания в общей выборке додекаэдров уральского типа связано со значительным уменьшением доли генетической группы “В”, для которой соотношение додекаэдров уральского типа и ламинарных составляет 48.7% и 10.3% соответственно. Лишь одна характеристика, а именно доля кристаллов VII группы по Ю.Л. Орлову, основные содержания которой предполагались в группе “В”, не снизилась вместе с долей этой группы, а, напротив, повысилась до 15%. Это связано появлением в ИК-выборке нескольких кристаллов алмаза VII группы со средней ($\approx 300\text{--}750$ ppm) концентрацией А-центров, попавших, соответственно, в генетическую группу “В”. Таким образом, привязка этого признака к группе “В” требует дальнейшей проверки.

Изменения в долях содержания кристаллов с различными характеристиками морфологии поверхности, отмеченные для алмазов р. Моргогор по сравнению с алмазами р. Эбелях (табл. 2) полностью отвечают изменениям в долях генетических групп. В работе (Вяткин и др., 2022) выделены морфологические признаки, характерные для генетических групп.

– “А”: развитие антискелетного роста, капле-видно-блоковой скульптуры, параллельной штриховки, расщепления вершин.

– “Б”: ростовая ступенчатость, желобчатые ребра, преимущественное развитие концентрической штриховки.

– “В”: блоковое строение, мозаично-блоковая скульптура, преимущественное развитие сноповидной штриховки.

– Процессы пластической деформации широко проявлены в кристаллах группы “А”, слабее – в кристаллах группы “Б” и практически отсутствуют для группы “В”.

Все выделенные характеристики предсказуемо изменились в соответствии с изменившимися соотношениями генетических групп.

Заметное увеличение содержания монокристаллов алмаза в общей выборке (табл. 3) также объясняется снижением доли алмазов группы “В”, где менее половины монокристаллических образцов, и ростом долей кристаллов групп “А” и “Б” в которых их содержание доходит до 67%. В то же время такой признак, как значительно большая доля шпинелевых двойников, определенная для группы “Б” алмазов р. Эбелях, не нашел подтверждения для кристаллов р. Моргогор.

Аналогичным образом уменьшение доли отличающихся повышенным износом кристаллов группы “В” в пользу алмазов более высокой сохранности групп “А” и “Б” приводит к заметному снижению по грациям износа согласно (Кухаренко, 1955) для всей выборки алмазов (табл. 4).

Таблица 2. Частоты проявления (% от количества кристаллов) форм роста, растворения, аксессуарного травления и пластической деформации на поверхности кристаллов алмаза россыпей Эбелях и Моргогор*

Table 2. The frequency of manifestation (% of the number of crystals) of the form of growth, dissolution, accessory etching and plastic deformation on the surface of diamond crystals of the Ebelakh and Morgogor placers*

Форма	р. Эбелях	р. Моргогор
<i>Формы роста</i>		
Антискелетный рост	2.4	3.3
Полицентризм роста граней	3.3	2.1
Блоковое строение	22.6	12.9
Ростовая ступенчатость	1.5	6.3
<i>Формы растворения</i>		
Мозаично-блоковая скульптура	22.8	14.2
Черепитчатая скульптура	11.4	17.5
Вальцеобразная скульптура	3.2	0.4
Каплевидно-блоковая скульптура	3.2	7.5
Концентрическая штриховка	6.5	12.9
Сноповидная, сноповидно-занозистая штриховка	17.5	7.9
Занозистая штриховка	20.2	20.4
Шестовато-занозистая штриховка	8.2	8.8
Параллельная штриховка	3.3	16.7
Округлоступенчатый	5.0	0.8
Каплевидные холмики	13.8	13.3
Желобчатые ребра	0.3	0.4
Овализация ребер	3.8	0.4
Расщепление вершин	2.4	3.3
Ячеистый рельеф	0.9	3.8
Дисковидная скульптура		4.2
<i>Формы аксессуарного травления</i>		
Треугольные фигуры	25.7	29.6
Треугольные пирамиды	33.7	17.9
Тетрагональные фигуры		3.3
Тетрагональные пирамиды	6.4	17.9
Ямки	12.9	11.7
Каналы травления	42.9	36.3
Каверны	27.1	50.4
<i>Внешние проявления процессов пластической деформации</i>		
Полосы пластической деформации	8.7	20.8
Линии скольжения	7.9	28.8
Шагреновая поверхность	14.3	24.2
Отсутствуют	69.1	53.8

*Суммы различных форм могут отличаться от 100%, так как на одном кристалле могут встречаться несколько их типов.

*The sums of various forms may differ from 100%, since several types of them may occur on the same crystal.

Таблица 3. Наличие двойников и сростков (% от количества кристаллов) алмаза россыпей Эбелях и Моргогор

Table 3. The presence of twins and splices (% of the number of crystals) of diamond placers Ebelakh and Morgogor

Характер образования	р. Эбелях	р. Моргогор
Полидвойник и поликристаллический агрегат	8.2	4.6
Шпинелевый двойник	8.7	6.7
Двойниковые швы	15.6	15.0
Сросток	13.8	6.7
Вросток	4.8	5.4
Монокристалл	48.9	61.7

В сравнении с окраской алмазов россыпи Эбелях в выборке кристаллов россыпи Моргогор уменьшились доли желтой и серой окрасок, характерные для алмазов группы "В", не обнаружены в выборке розовые кристаллы (табл. 5). Увеличилась доля коричневых кристаллов, характерных для группы "А", и алмазов желто-зеленоватых тонов.

Данные о прозрачности кристаллов алмаза для россыпи Моргогор получены с большей степенью детальности, чем для алмазов россыпи Эбелях и подробно, по генетическим группам, даны в табл. 6.

Полученные данные подтверждают ранее сделанный вывод, что наиболее часто алмазы высших степеней прозрачности встречаются сре-

Таблица 4. Степень механического износа (% от количества кристаллов) алмаза россыпей Эбелях и Моргогор**Table 4.** The degree of mechanical wear (% of the number of crystals) of the diamond placers Ebelah and Morgogor

Степень	Истирание	р. Эбелях	р. Моргогор
0	Отсутствие механического износа	62.1	69.2
1	Незначительное истирание вершин	8.8	6.3
2	Незначительное истирание вершин и ребер	11.9	11.7
3	Истирание вершин и ребер, незначительная матировка граней	9.7	5.8
4	Значительное истирание ребер и граней	5.0	4.6
5	Сильное истирание, округление ребер, полная матировка граней	1.7	2.1
6	Сильное истирание, утрата ребер и вершин	0.9	0.4
	Леденцовая скульптура	5.6	1.7

Таблица 5. Окраска (% от количества кристаллов) алмаза россыпей Эбелях и Моргогор**Table 5.** Coloring (% of the number of crystals) of diamond placers Ebelakh and Morgogor

Окраска	р. Эбелях	р. Моргогор
Бесцветные	12.6	9.8
Желтая	46.2	42.2
Желто-зеленая	1.6	15.7
Коричневая	17.2	24.5
Розовая	5.4	
Серая	17.0	8.0

Таблица 6. Прозрачность кристаллов алмаза россыпи Моргогор**Table 6.** Transparency of diamond crystals of the Morgogor placer

Степень прозрачности	Вся выборка, %	По группам, %		
		“А”	“Б”	“В”
“Чистой воды”	3.5		5.6	2.6
Весьма прозрачные	18.0	3.6	38.9	25.6
Прозрачные	45.0	92.9	52.8	59.0
Полупрозрачные	31.4	3.6	2.8	12.8
Непрозрачные	2.1			

ди кристаллов группы “Б”. Наибольший разброс по этой характеристике имеют алмазы группы “В”. Кристаллы группы “А” в целом наиболее стабильно прозрачны, в то же время “весьма прозрачный” алмаз оказался в группе единственным, а кристаллы “чистой воды” среди этой группы не встречены. Следует также учитывать, что непрозрачные кристаллы отсутствуют в разделении по генетическим группам ввиду сложностей в получении их ИК-спектров. Однако по характеру распределения кристаллов в группе “В”, а также некоторым причинам непрозрачности, таким как наличие включений графита, поликристалличность и т. п. можно обоснованно предположить, что наибольшая их часть попала бы именно в группу “В”.

По распределению включений алмазы россыпи Моргогор не отличаются от кристаллов россыпи Эбелях. Доля алмазов, свободных от включений, максимальна для генетической группы “Б” и минимальна для группы “В”. В последней резко повышено процентное содержание кристаллов с групповыми и многочисленными включениями графита. Типичный кристалл с такими характеристиками показан на (см. рис. 1В).

Характер визуальной люминесценции у алмазов россыпей р. Моргогор и р. Эбелях достаточно близок, что отражено в табл. 7. Можно отметить лишь незначительное общее увеличение долей люминесцирующих алмазов практически по всем категориям. Отдельно следует обратить внимание на люминесценцию, возникающую при возбуждении более коротковолновым (254 нм) УФ излучением. У алмазов р. Эбелях был зафиксирован необычно большой процент кристаллов, люминесцирующих при данном возбуждении. Для алмазов р. Моргогор этот эффект выражен еще сильнее, доля таких кристаллов в выборке составляет 16.8%. В целом сохранены также и закономерности распределения люминесцентных свойств по выделенным генетическим группам. Наибольшее разнообразие, в т. ч. зональная и возбуждаемая при 254 нм люминесценция зафиксирована для группы “А”, хуже всего люминесцируют алмазы группы “В”. В частности, кристалл группы “А” (см. рис. 1А) имеет среднюю по интенсивности, голубую визуальную люминесценцию, а также желтую при возбуждении 254 нм. Кристаллы Б и В (см. рис. 1) обладают лишь слабой голубой люминесценцией.

Хорошо иллюстрируют различное происхождение выделенных групп их ИК-характеристики (табл. 8). При преобладании одного первоисточника к осуществленному уже при выделении групп разделению по содержанию центров А с высокой долей вероятности добавилось бы прямая пропорциональная зависимость с содержанием центров В1; кроме того, возможно, и со средним показателем поглощения В2 центров – при условии преобладания в выборке упорядоченных алмазов по кри-

Таблица 7. Визуальная люминесценция кристаллов алмаза россыпей Эбелях и Моргогор

Table 7. Visual luminescence of diamond crystals of the Ebelakh and Morgogor placers

Люминесценция кристаллов	Все кристаллы, %		Группы Моргогор, (% I разн.)		
	Эбелях	Моргогор	“А”	“Б”	“В”
Визуально отсутствует	56.3	46.2	30.9	33.3	73.5
Голубая слабая	18.5	16.8	9.1	25.6	18.4
Голубая средняя	7.8	11.9	10.9	17.9	8.2
Голубая интенсивная	10.9	15.4	29.1	15.4	
Голубая с зеленым	1.6	2.8	3.6	5.1	
Зеленая	0.7	2.1	5.5		
Желтая	0.6	1.4	1.8	2.6	
Зональная	3.7	3.5	9.1		
В т. ч. при возбуждении 254 нм	5.0	16.8	40.0	5.1	

Таблица 8. ИК-характеристики алмазов россыпи Моргогор (для генетических групп приведены медианные значения)

Table 8. IR characteristics of diamonds of the Morgogor placer (median values are given for genetic groups)

ИК-характеристика	A, ppm	B1, ppm	%B1	B2, cm ⁻¹	RzB2, cm ⁻¹	CH, cm ⁻¹
Медиана для всей выборки	532.0	207.0	27.3	6.0	1369.4	0.6
Min-max для всей выборки	8.7–1461.9	0.0–799.8	0.0–83.2	0.0–23.7	1358.1–1392.8	0.0–17.2
Группа “А”	64.6	30.1	32.5	0.5	1364.1	1.3
Группа “Б”	475.1	243.6	33.9	9.4	1365.8	17.2
Группа “В”	895.1	293.5	25.3	5.9	1373.5	9.7

Таблица 9. Концентрации парамагнитных центров в алмазах россыпи Моргогор

Table 9. Concentrations of paramagnetic centers in diamonds of the Morgogor placer

Парамагнитный центр	P1	P2	N2	W7	W21	OK1	NE1, NE2	M1
% кристаллов, содержащих центр	80.3	75.4	18.0	21.3	42.6	13.1	1.6	9.8
Максимальная концентрация, ppm	100.22	11.49	6.44	25.73	0.01	1.33	0.08	0.019
Медиана концентрации для кристаллов, содержащих центр, ppm	0.22	0.72	0.18	0.84	0.001	0.25	0.08	0.005

терию Г.С. Вудса (Woods, 1986). Однако никаких корреляций не наблюдается, что еще раз подтверждает полигенность россыпи.

Концентрации парамагнитных центров в алмазах россыпи Моргогор, полученные методом ЭПР отражены в табл. 9. Номенклатура центров дана согласно (Loubser, Wyk, 1978; Минеева и др., 1994). Общий состав структурных центров для всей исследованной выборки типичен для природных алмазов российских месторождений, по соотношению концентраций центров он ближе к алмазам коренных месторождений Якутии, чем к кристаллам, добываемым в Архангельском алмазоносном районе.

Применительно к выделенным генетическим группам результаты исследования структурных

нарушений в алмазах россыпи Моргогор методом ЭПР удобно описать, используя устойчивые ассоциации парамагнитных центров (табл. 10). Наиболее разнообразен состав парамагнитных дефектов в алмазах группы “А”. Только для них характерна ассоциация P1–OK1 (одионый структурный азот и парное замещение азот плюс кислород), в которой P1 центр может достигать значительной концентрации (до 100 ppm). Также в группе “А” присутствуют кристаллы с ассоциацией деформационных азотных центров W7–N2, в которых концентрация центра W7 также может достигать необычно больших значений (более 25 ppm). Ассоциация деформационного центра W7, который можно представить как трансляционно “раздвинутый” двойной

Таблица 10. Ассоциации парамагнитных центров в алмазах россыпи Моргогор (проценты содержащих их кристаллов в выборках)

Table 10. Associations of paramagnetic centers in diamonds of the Morgogor placer (percentages of crystals containing them in samplings)

Ассоциация	Вся выборка	“А”	“Б”	“В”
P1–OK1	13.1	25.8		
P1–P2	14.8	12.9	25.8	7.1
P1–P2–W21	42.6	6.5	68.8	92.9
P2–W7	6.6	9.7	6.3	
W7–N2	14.8	29		
Прочие	8.2	16.1		

азотный центр А, и центра P2 (три азота как ближайшие соседи плюс вакансия) характерна не только для группы “А”, но и для группы “Б”, в которой она присутствует в немногочисленных пластически деформированных кристаллах. Наиболее распространенной является ассоциация P1–P2–W21, представленная в подавляющем большинстве алмазов группы “В”, более чем в половине кристаллов группы “Б” и в единичных алмазах группы “А”. В строку “прочие” отнесены кристаллы, в которых отчетливо проявлен лишь один тип парамагнитных центров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для кристаллов алмаза р. Моргогор характерно большое разнообразие габитусных форм и разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова; высокие доли додекаэдридов (почти 34% кристаллов), алмазов II, V и VII групп по Ю.Л. Орлову – 4.4, 17.1 и 15.0% соответственно. Отличиями от алмазов р. Эбелях являются увеличенная доля октаэдрических кристаллов (5%), преобладание ламинарных додекаэдридов над додекаэдридами уральского типа, а также появление кристаллов VI и XI групп по Ю.Л. Орлову.

У алмазов р. Моргогор весьма велика доля монокристаллов – 61.7% (против 48.9% для россыпи Эбелях). Отличительными чертами морфологии поверхности алмазов р. Моргогор является широкое развитие штриховок: концентрической (12.9% кристаллов), занозистой (до 20.4%) и параллельной (до 16.7%). Широко развиты формы акцессорного травления поверхности, особенно кавернозность (более 50% кристаллов), а также проявления процессов пластической деформации кристаллов. Кроме резкого увеличения долей кристаллов с концентрической и параллельной штриховками, алмазы р. Моргогор отличаются от кристаллов россыпи Эбелях увеличением проявлений черепитчатой (до 17.5%) и каплевидно-блоковой (до 7.5%) скульптуры, ростовой ступенчатости (до 6.3%).

С точки зрения окраски алмазы р. Моргогор отличаются преобладанием желтых (42.2% кристаллов) и коричневых (24.5%) ее оттенков, от алмазов р. Эбелях их отличает резкое увеличение (с 1.6 до 15.7%) кристаллов желто-зеленого оттенка, уменьшение (с 17 до 8%) серых тонов и отсутствие розовых кристаллов. Алмазы р. Моргогор отличаются высокой прозрачностью: в категории прозрачных, весьма прозрачных и “чистой воды” суммарно попадают 66.5% кристаллов.

Отличительной чертой россыпных алмазов р. Моргогор является широкое распространение кристаллов, люминесцирующих при возбуждении УФ излучением 254 нм. Доля таких алмазов необычно велика уже среди кристаллов р. Эбелях – 5.0%, но для выборки р. Моргогор эта величина составила 16.8%. Суммарное содержание азота в исследованных алмазах согласно ИК-анализу варьирует от 16.1 до 1944.5 ppm (медиана 774 ppm). Средняя концентрация А-центров относительно высока (532 ppm), центров В1 – напротив, ниже (207 ppm), средние содержания центров В2 и СН несколько повышены (6.0 и 0.6 см⁻¹ соответственно). Состав структурных центров, выявляемых методом ЭПР в целом типичен для природных алмазов российских месторождений и близок к характерному для алмазов коренных месторождений Якутии.

Анализ большого массива данных по морфологии и спектроскопии алмазов россыпи реки Моргогор с позиций их разделения на генетические группы, выделенные при изучении алмазов россыпи Эбелях, подтвердил корректность этой методики. В исследованной выборке, характеризующей алмазы россыпи Моргогор, значительно снижена доля кристаллов генетической группы “В”, для которой характерно присутствие кристаллов с блоковым и поликристаллическим строением, а также с повышенным содержанием включений графита. Вследствие этого в общей выборке повысилась доля кристаллов, обладающих характерными для групп “А” и “Б” признаками.

Разделение, проведенное по содержанию азотных центров А на основе данных ИК-спектроскопии, подтвердило устойчивые различия выделенных генетических групп по подавляющему большинству определенных ранее морфологических и спектроскопических признаков. При этом группы, выделенные для россыпей Эбелях и Моргогор, обладают одинаковыми признаками и различаются по долям в выборках. Выявление долевого содержания генетических групп в разных точках россыпных месторождений Анабарского района может быть использовано для выявления направлений сноса и, в конечном итоге, для поиска его первоисточников.

В то же время выявлены и не подтвердившиеся признаки: увеличенная доля шпинелевых двой-

ников в группе “Б” и наличие алмазов VII группы по Ю.Л. Орлову только в генетической группе “В”, которые требуют дальнейшей проверки.

Благодарности

Коллектив авторов благодарит АК ПАО “АЛРОСА” за предоставленную возможность исследований и публикации данного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Коптиль В.И., Митюхин С.И., Герасимчук А.В., Помазанский Б.С., Горев Н.И. (2011) Полигенез алмазов Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, **52**(3), 335-353.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Тычков С.А. (2002) Проблема докембрийской алмазоносности Сибирской платформы. *Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология*, (1), 19-36.
- Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А., Налетов А.М., Непша В.И. (1986) Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, 224 с.
- Владыкин Н.В., Торбеева Т.С. (2005) Лампроиты Томторского массива (Восточное Прианабарье). *Геология и геофизика*, **46**(10), 1038-1050.
- Вяткин С.В., Кriuлина Г.Ю., Гаранин В.К. (2022) Алмазы из россыпи Эбелях (Анабар, Якутия): новые данные о их разделении по первоисточникам. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, (4), 84-92.
- Граханов С.А. (2000) К вопросу о распространении неоген-нижнечетвертичных россыпей алмазов северо-востока Сибирской платформы. *Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология*, (5), 212-215.
- Граханов С.А., Коптиль В.И. (2003) Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, **44**(11), 1191-1201.
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. (2003) Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 603 с.
- Кухаренко А.А. (1955) Алмазы Урала. М.: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 512 с.
- Минеева Р.М., Сперанский А.В., Титков С.В., Бершов Л.В. (1994) Новый Ni-содержащий центр в природном алмазе. *Докл. РАН*, **334**(6), 755-758.
- Орлов Ю.Л. (1984) Минералогия алмаза. М.: Наука, 221 с.
- Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Калинина В.В., Реутский В.Н. (2011) Локальные вариации изотопов углерода и содержания азота в алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы. *Докл. РАН*, **440**(1), 116-119.
- Loubser J., Van Wyk J.A. (1978) Electron spin resonance in the study of diamond. *Rep. Prog. Phys.*, **41**(8), 1201-1248. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/002>
- Woods G.S. (1986) Platelets and the infrared absorption of type Ia diamonds. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, **407**(1832), 219-238. <https://doi.org/10.1098/rspa.1986.0094>
- Zaitsev A.M. (2001) Optical properties of diamond: a data

- handbook. Springer, 519 p.
- Zedgenizov D.A., Kalinina V.V., Reutsky V.N., Yuryeva O.P., Rakhmanova M.I. (2016) Regular cuboid diamonds from placers on the northeastern Siberian platform. *Lithos*, **265**, 125-137.
- Zedgenizov D., Reutsky V., Wiedenbeck M. (2017) The carbon and nitrogen isotope characteristics of type Ib-IaA cuboid diamonds from alluvial placers in the Northeastern Siberian platform. *Minerals*, **7**(10), 178-187.
- Zemnukhov A.L., Reutsky V.N., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Zhelonkin R.Y., Kalinina V.V. (2020) Subduction related population of diamonds in Yakutian placers, northeastern Siberian platform. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **175**, 98.

REFERENCES

- Afanas'ev V.P., Lobanov S.S., Pokhilenko N.P., Koptil' V.I., Mityukhin S.I., Gerasimchuk A.V., Pomazanskii B.S., Gorev N.I. (2011) Polygenesis of diamonds in the siberian platform Russian *Geol. Geophys.*, **52**(3), 259-274 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **52**(3), 335-353).
- Afanas'ev V.P., Zinchuk N.N., Tychkov S.A. (2002) The problem of Precambrian diamond bearing of the Siberian platform. *Bull. Voronezh University. Ser. Geol.*, (1), 19-36. (In Russ.)
- Bokiy G.B., Bezrukov G.N., Klyuev Yu.A., Naletov A.M., Nepsha V.I. (1986) Natural and synthetic diamonds. Moscow, Nauka Publ., 224 p. (In Russ.)
- Grakhanov S.A. (2000) To the problem of the neogen-quaternary diamondiferous placers distribution within the n.e. Siberian platform. *Bull. Voronezh University. Ser. Geol.*, (5), 212-215. (In Russ.)
- Grakhanov S.A., Koptil' V.I. (2003) Triassic diamond placers on the northeastern Siberian Platform. *Russ. Geol. Geophys.*, **44**(11), 1150-1161 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **44**(11), 1191-1201).
- Kukharensko A.A. (1955) Diamonds of the Urals. Moscow, State Scientific and Technical University. publishing house of literature on geology and subsoil protection, 512 p. (In Russ.)
- Loubser J., Van Wyk J.A. (1978) Electron spin resonance in the study of diamond. *Rep. Prog. Phys.*, **41**(8), 1201-1248. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/002>
- Mineeva R.M., Speransky A.V., Titkov S.V., Berшов L.V. (1994) A new Ni-containing center in natural diamond. *Dokl. RAN*, **334**(6), 755-758. (In Russ.)
- Orlov Yu.L. (1984) Mineralogy of diamond. Moscow, Nauka Publ., 221 p. (In Russ.)
- Shatsky V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V., Reutsky V.N. (2011) Local variations of carbon isotopes and nitrogen content in diamonds from placers of the Northeast Siberian Platform. *Dokl. RAN*, **440**(1), 116-119. (In Russ.)
- Vladykin N.V., Torbееva T.S. (2005) Lamproites of the Tomtor massif (eastern Anabar area). *Russ. Geol. Geophys.*, **46**(10), 1038-1049 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **46**(10), 1038-1050).
- Vyatkin S.V., Kriuлина G.Yu., Garanin V.K. (2022) Diamonds from the Ebelyakh placer (Anabar, Yakutia): new data on the division by primary sources. *Moscow University Geol. Bull.*, **77**(5) 531-539, <https://doi.org/10.3103/S0145875222050167> (translated from *Vestnik Mos-*

- kovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya*, (4), 84-92.)
- Woods G.S. (1986) Platelets and the infrared absorption of type Ia diamonds. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, **407**(1832), 219-238. <https://doi.org/10.1098/rspa.1986.0094>
- Zaitsev A.M. (2001) Optical properties of diamond: a data handbook. Springer, 519 p.
- Zinchuk N.N., Koptil' V.I. (2003) Typomorphism of diamonds of the Siberian platform. Moscow, Nedra-Businesscenter Publ., 603 p. (In Russ.)
- Zedgenizov D.A., Kalinina V.V., Reutsky V.N., Yuryeva O.P., Rakhmanova M.I. (2016) Regular cuboid diamonds from placers on the northeastern Siberian platform. *Lithos*, **265**, 125-137.
- Zedgenizov D., Reutsky V., Wiedenbeck M. (2017) The carbon and nitrogen isotope characteristics of type Ib-IaA cuboid diamonds from alluvial placers in the Northeastern Siberian platform. *Minerals*, **7**(10), 178-187.
- Zemnukhov A.L., Reutsky V.N., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Zhelonkin R.Y., Kalinina V.V. (2020) Subduction related population of diamonds in Yakutian placers, northeastern Siberian platform. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **175**, 98.