

УДК 553.08

АЛМАЗЫ ИЗ РОССЫПИ ЭБЕЛЯХ (АНАБАР, ЯКУТИЯ): НОВЫЕ ДАННЫЕ О ИХ РАЗДЕЛЕНИИ ПО ПЕРВОИСТОЧНИКАМ

Сергей Васильевич Вяткин^{1✉}, Галина Юрьевна Кriuлина²,
Виктор Константинович Гаранин³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vyt_box@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5054-575X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; galinadiamond@gmail.com

³ Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана, Москва, Россия; vgaranin@mail.ru

Аннотация. На основании данных, полученных при изучении представительной коллекции алмазов из россыпи Эбелях методами морфологического анализа, люминесценции, ИК и ЭПР, предложена схема разделения кристаллов на три группы, предположительно связанные с первоисточниками алмазов. Разделение основано на статистическом распределении алмазов коллекции по содержанию центров А (ИК). Правомерность выделения трех групп подтверждается выявленными различиями кристаллов этих групп по значительной части типоморфных признаков, включая габитус, морфологию поверхности, окраску, визуальную люминесценцию, наличие двойников и сростков, степень механического износа и т. д.

Ключевые слова: алмаз, россыпи, типоморфизм, ИК, ФЛ, Анабар, Эбелях

Для цитирования: Вяткин С.В., Кriuлина Г.Ю., Гаранин В.К. Алмазы из россыпи Эбелях (Анабар, Якутия): новые данные о их разделении по первоисточникам // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 84–92.

DIAMONDS OF THE EBELAKH PLACER (ANABAR, YAKUTIA): NEW DATA ON THE DIVISION BY PRIMARY SOURCES

Sergey V. Vyatkin^{1✉}, Galina Y. Kriulina², Viktor K. Garanin³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vyt_box@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5054-575X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; galinadiamond@gmail.com

³ Fersman Mineralogical Museum, Moscow, Russia; vgaranin@mail.ru

Abstract. Based on the data obtained during the study of a representative collection of diamonds of the Ebelakh placer by morphological analysis, luminescence, IR and EPR methods, a scheme for dividing crystals into three groups, presumably related to the primary sources of diamonds, is proposed. The separation is based on the statistical distribution of diamonds in the collection according to the content of A (IR) centers; the validity of the allocation of three groups is confirmed by the revealed differences in crystals of these groups in a significant part of typomorphic features, including habitus, surface morphology, color, visual luminescence, the presence of twins and accretions, the degree of mechanical wear, etc.

Key words: diamond, placers, typomorphism, IR, FL, Anabar, Ebelakh

For citation: Vyatkin S.V., Kriulina G.Y., Garanin V.K. Diamonds of the Ebelakh placer (Anabar, Yakutia): new data on the division by primary sources. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 4: 84–92. (In Russ.).

Введение. Промышленная алмазоносность северо-востока Сибирской платформы связана с россыпными месторождениями. Открытая в 1965 г. россыпь на р. Эбелях считается одним из крупнейших в мире месторождений по запасам россыпных алмазов (по материалам сайта www.alrosa.ru). В долине, которая выработана в карбонатных породах среднего кембрия, алмазоносны все аллювиальные образования и переотложенные коры выветривания. Месторождение охватывает отрезок долины р. Эбелях протяженностью 83 км от места ее слияния с р. Анабар, в него включены отложения русла, низкой и высокой пойм, четырех надпойменных террас и переотложенные части кор выветривания. Содержание алмазов в россыпи на р. Эбелях колеблется от 0,22 до 7,82 кар./м³, среднее значение по

месторождению составляет 1,34 кар./м³. Россыпи на р. Эбелях, а также на ее притоках — ручьях Моргогор, Гусиный, Холомолух — в настоящее время активно разрабатываются.

Россыпные алмазы на северо-востоке Сибирской платформы в значительной степени отличаются от алмазов, добываемых в коренном залегании в ее центральной части. Эти отличия состоят не только в механическом износе перемещаемых в процессе образования и переотложения россыпей алмазов, но и в другом соотношении их разновидностей. Заметно возрастают доли кристаллов II и VII разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова [Орлов, 1984], появляются кристаллы V разновидности.

Коренные источники алмазов, размыв которых привел к образованию богатых россыпей на

северо-востоке Сибирской платформы, до сих пор не установлены. Кимберлитовые трубки фанерозойского возраста, подобные разрабатываемым в центральной части платформы, не обнаружены, установлено лишь значительное число кимберлитовых тел мезозойского возраста. Однако они слабо- и неалмазоносные и не могут быть источниками образования богатых россыпей. Кроме того, и по типам, и по характеристикам алмазы россыпей в Анабарском районе значительно разнообразнее кимберлитовых алмазов Сибирской платформы.

Были предложены различные гипотезы происхождения алмазов россыпей [Горина, 1971; Метелкина и др., 1976; Граханов, 2000; Афанасьев и др., 2002; Граханов, Зинчук 2003; Владыкин, Торбеева, 2005], однако общепризнана пока лишь констатация полигенности и многостадийности их образования — из нескольких источников через фазы промежуточных коллекторов. При этом алмазы россыпей, как правило, делятся на несколько типов по предположительному коренному источнику их поступления [Зинчук, Коптиль, 2003; Афанасьев, 2011].

Первый тип — «кимберлитовый» — выделен исходя из предположения об участии в формировании алмазной ассоциации россыпей источника, подобного богатым фанерозойским трубкам в центральной части платформы. Этот тип наследует все характерные черты алмазов из известных якутских трубок: резкое преобладание ламинарных кристаллов I разновидности по систематике Ю.Л. Орлова, с габитусами ряда октаэдр–псевдоромбододекаэдр: «небольшое количество додекаэдроидов с “шагренью” и полосами пластической деформации, незначительные количества серых кубоидов III разновидности, поликристаллические образования VIII разновидности, редко встречающиеся желтые кубоиды II разновидности. Для кимберлитового типа алмазов не характерны округлые скрытоламинарные додекаэдроиды с частотой встречаемости более 20—25%, кубоиды II и III разновидностей в количестве более 3—5%, и полностью отсутствуют алмазы V—VII, а также X и XI разновидностей» [Афанасьев 2011, с. 338].

Второй тип «предположительно лампроитового генезиса» включает в себя округлые алмазы додекаэдрического габитуса уральского типа, с переменным, но часто повышенным количеством алмазов эклогитовых парагенезисов. Кристаллы обычно имеют признаки повышенного механического износа» [Афанасьев 2011, с. 338]. Этот тип выделен по сходству признаков с алмазными ассоциациями древних (докембрийских) россыпей в осадочных коллекторах многих регионов мира (Индия, Бразилия, Южная Африка и т.д.) [Соболев, 1951; Метелкина, и др., 1976]. В то же время авторы работы [Зинчук, Коптиль, 2003] выделяют ассоциацию алмазов «жильного» типа — преобладающие додекаэдроиды с шагренью и полосами пластической деформации, а также округлые алмазы «уральского» («бразильского») типа.

В россыпях (в основном в мелких фракциях) присутствуют также алмазы импактного генезиса, так называемые якутиты, первоисточником которых служит Попигайская астроблема.

Разнообразие алмазов на северо-востоке Сибирской платформы не ограничивается упомянутыми ассоциациями. Для россыпей характерно повышенное содержание алмазов II, V и VII разновидностей по Ю.Л. Орлову, для объяснения наличия которых выделяется еще один [Зинчук, Коптиль 2018] или два отдельных [Афанасьев 2011] первоисточника неизвестного типа.

Если исходить из современных данных о различных коренных источниках алмаза, то наличие источника (источников), где алмазы были бы представлены преимущественно V, VII или II разновидностями по классификации Ю.Л. Орлова, весьма маловероятно. Напротив, гораздо вероятнее присутствие в таких источниках значительной доли алмазов I разновидности. Следовательно, при описанном выше разделении значительную часть алмазов I разновидности не удастся однозначно соотнести с каким-либо первоисточником.

Материалы и методы исследований. Нами проведено выделение по типоморфным признакам характерных групп алмазов на основе представительной коллекции из 704 кристаллов алмаза, предоставленной компанией АК АЛРОСА. Алмазы добыты в 2018 г. в среднем течении р. Эбелях, на участке между ручьями Гусиный и 53. Исследованная выборка кристаллов алмаза состояла из двух размерно-весовых групп: –12+11 (381 шт.), масса одного кристалла в пределах 0,30–0,45 кар., и –9+7 (323 шт.), масса одного кристалла 0,10–0,15 кар. По окраске, габитусу кристаллов и цвету визуальной фотолюминесценции выборка статистически идентична крупнообъемным пробам алмазов соответствующих размерно-весовых групп, которые, в свою очередь, получены из партии промышленной добычи методом квартования. Для всех алмазов выборки проведено покристальное минералогическое описание. Кроме того, выполнены спектроскопические исследования методами инфракрасной спектроскопии (ИК, 362 шт.) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР, 98 шт.).

Минералогическое описание алмазов проводилось с использованием бинокля Motic SMZ-143 и УФ осветителя–бокса (365 и 254 нм) по следующей схеме: габитус кристалла, разновидность по классификации Ю.Л. Орлова, морфология поверхности — формы роста и растворения, аксессуарное травление, наличие двойников и сростков, степень сохранности, характер и интенсивность окраски, визуальная оценка наличия и состава включений, а также цвета, однородности и интенсивности фотолюминесценции. Регистрация ИК-спектров проводилась на Фурье-спектрометре Vertex-70 (фирма Bruker) с микроскопом Hyperion-1000. Спектры ЭПР регистрировали на спектрометре Varian E-115.

Результаты исследований и их обсуждение.

Разнообразие россыпных алмазов на северо-востоке Сибирской платформы определяет потенциальную возможность различия их коренных источников не только по географическому расположению, но и по возрасту и геологическому типу. Исходя из этого в методическом аспекте критерием разделения алмазов на группы по общности коренного источника следует избрать один из основных сохраняющихся в различных процессах типоморфных признаков. Подтверждением правильности проведенного разделения должна послужить четкая сепарация полученных групп по другим характеристикам кристаллов.

Критерием разделения нами выбрано распределение кристаллов алмаза по содержанию центров А (пара атомов азота в соседних позициях углерода в кристаллической структуре), определяемому методом ИК-спектроскопии. Концентрация этих центров в отдельных кристаллах практически из любого коренного источника может принимать значения в широком диапазоне — от близких к нулевым до тысячи ppm и более. Однако для статистически значимых выборок распределение кристаллов в пределах этих значений оказывается типоморфным признаком, индивидуальным для каждого источника. Этот признак стабилен для одного коренного источника и индивидуален для различных. В качестве примера на рис. 1 приведено распределение кристаллов алмаза по концентрации центров А для нескольких горизонтов трубки Удачная и верхнего горизонта трубки Заполярная.

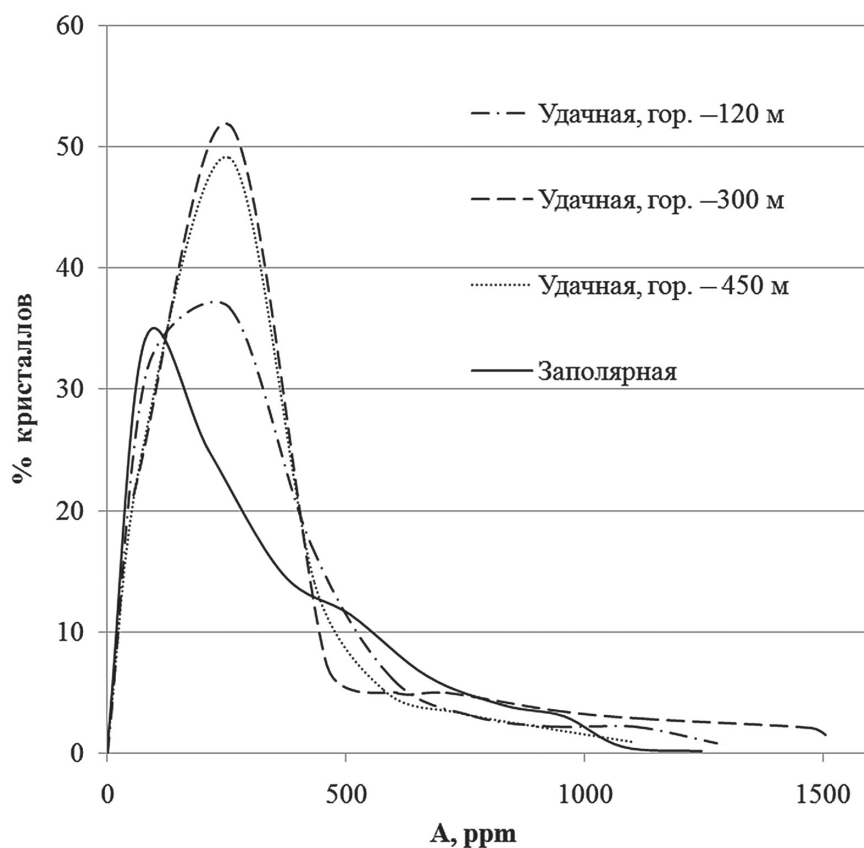


Рис. 1. Распределение кристаллов алмаза по концентрации А-центров для трех горизонтов трубки Удачная и для верхов трубки Заполярная; для трубки Удачная, гор. -120 м, по данным [Зинчук, Коптиль, 2003]

Распределение кристаллов исследованной выборки алмазов россыпного месторождения Эбелях по концентрации А-центров имеет три ярко выраженных максимума (рис. 2). В рамках работы причиной возникновения этих максимумов предполагается происхождение алмазов рассматриваемой выборки из трех основных источников. Алмазы, отвечающие на кривой распределения верхней 2/3 максимумов, выбраны как наиболее характерные для этих трех источников, они образуют группы А (74 шт.), Б (31 шт.) и В (143 шт.) соответственно.

Отметим, что график на рис. 2 представляет собой статистическую закономерность и представляет собой суммарную кривую распределения для трех групп. Следовательно, алмазы, представляющие «боковое крыло» одной группы (например группы А — пунктирная линия на рис. 2), попадают в область, рассматриваемую как другая группа (Б на рис. 2). Вероятность таких совпадений учитывалась при интерпретации результатов.

Распределение кристаллов по габитусу и разновидности по классификации Ю.Л. Орлова представлено в табл. 1.

В распределении алмазов I разновидности по выделенным группам проявлены следующие закономерности: в группах А и Б доля плоскогранно-кривогранных алмазов I разновидности ряда октаэдр–ромбододекаэдр составляет приблизительно 13–20%, при этом в группе А отмечено максимальное число октаэдров и форм, переходных к ромбододекаэдрам, а в группе Б среди плоскогран-

Таблица 1

Частота встречаемости кристаллов алмаза в россыпи Эбелях по габитусным типам и разновидностям по классификации Ю.Л. Орлова

		Габитус кристаллов	Вся выборка, %	По группам, %		
				А	Б	В
Разновидности по классификации Ю.Л. Орлова	I	октаэдр	1,8	5,4	3,2	0,7
		октаэдр–додекаэдроид	6,0	2,7	12,9	4,2
		октаэдр–ромбододекаэдр	4,8	5,4	3,2	2,1
		плоскогранно-кривогранные, всего	12,6	13,5	19,4	7,0
		додекаэдроид уральского типа	28,1	24,3	48,4	44,8
		ламинарный додекаэдроид	23,9	35,1	19,4	18,2
		псевдоромбододекаэдр	5,1	9,5		4,9
		додекаэдроид–псевдокуб	1,3	4,1		0,7
		кривогранные додекаэдровиды, всего	58,4	73,0	67,7	68,5
		неопределенные формы	0,7	1,4		
	II	куб, куб–додекаэдр, тетрагексаэдр	0,9	1,4		
	III	куб	0,1			
	IV	алмаз в оболочке	0,3	1,4		
	V	октаэдр–додекаэдроид	17,0	5,4	12,9	14,7
	VII	сростки октаэдр–додекаэдроид	9,9	4,1		9,8
	V и VII разновидности в сумме	27,0	9,5	12,9	24,5	

но-кривогранных алмазов резко преобладают кристаллы ряда октаэдр–додекаэдроид. В группе В доля плоскогранно-кривогранных алмазов значительно снижена (7%), плоскогранные октаэдры практически отсутствуют. По распределению кривогранных додекаэдровидов группы Б и В близки: доля додекаэдровидов уральского типа (45–48%) более чем в 2 раза выше доли ламинарных (18–19%), различие лишь в отсутствии в группе Б псевдоромбододекаэдрических кристаллов. В группе А состав кривогранных форм другой — ламинарных додекаэдровидов на 1/3

больше, чем додекаэдровидов уральского типа (35 и 24%), увеличена доля псевдоромбододекаэдров, присутствует также заметное количество кристаллов псевдокубических форм.

Полученные данные о суммарной доле алмазов V и VII разновидностей (27%) согласуются с изложенными в работе [Зинчук, Коптиль, 2003], где суммарная доля кристаллов V и VII разновидностей в россыпи Эбелях возрастает от участка Исток до участка Приустьевой с 29 до 40%. Однако распределение их по выделенным группам резко различно.

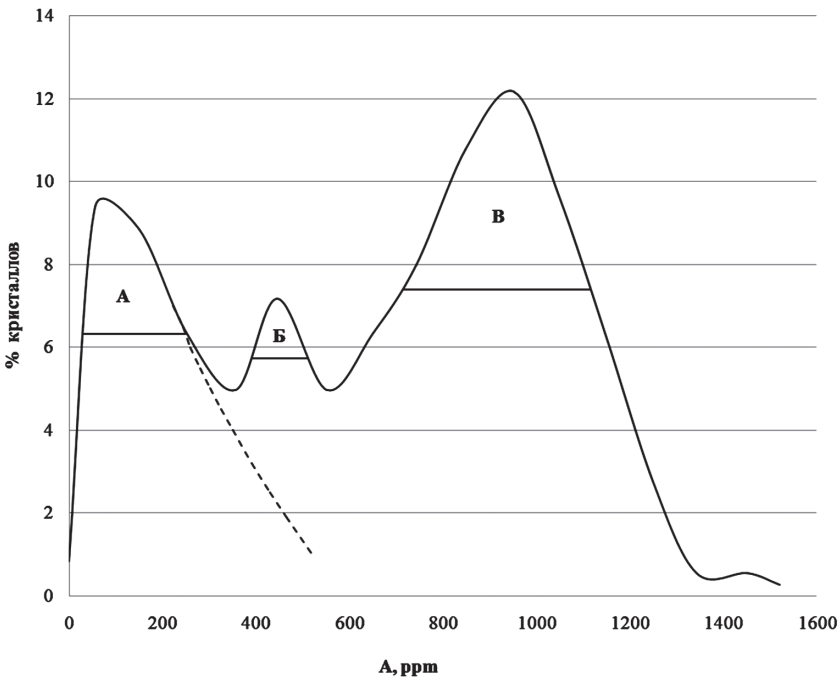


Рис. 2. Распределение кристаллов алмаза по концентрации А-центров для исследованной выборки кристаллов из россыпи Эбелях (пояснения см. в тексте)

Суммарная доля кристаллов V и VII разновидностей минимальна в группе А и максимальна в группе В; кроме того, в группе Б отсутствуют алмазы VII разновидности. Отметим, что не для всех алмазов V и VII разновидностей могут быть получены информативные ИК-спектры, по которым сделано выделение групп. Вследствие этого их реальные доли в источниках типа А, Б и В могут быть выше. Это отражается в процентном содержании кристаллов V и VII разновидностей во всей выборке.

Различия между выделенными группами обнаружены также в морфологии поверхности кристаллов. Формы роста, растворения и локального акцессорного травления, а также следы процессов пластической деформации проявлены на поверхности кристаллов групп А, Б и В в различной степени (табл. 2). Признаки, характерные для группы А: более широкое развитие антискелетного роста, каплевидно-блоковая скульптура, преимущественное развитие занозистой и наличие параллельной штриховки, расщепление вершин. Группе Б присущи следующие признаки: ступенчатость, желобчатые ребра, наличие отрицательных вершин, выраженные вершины по L3, преимущественное развитие концентрической штриховки; группе 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. Различия между группами по распространенности двойников и сростков отражены в табл. 3. Фотографии алмазов из разных групп представлены на рис. 3.

Для группы Б характерно резкое увеличение доли шпинелевых двойников, а для группы В — полидвойников и сростков; кроме того, в группе В в 2 раза снижена доля монокристаллических алмазов.

Нами использована градация алмазов по степени износа, аналогичная предложенной в работе [Кухаренко, 1955]. Степень механического износа, а также распределение по ней кристаллов исследованных выборок отражены в табл. 4. Отметим практически полное отсутствие механического износа кристаллов алмаза группы Б, преобладание слабой степени износа в группе А и увеличение доли изношенных кристаллов 2–3 степени в группе В.

Закономерные отличия обнаружены в распределении по выделенным группам кристаллов различной окраски (табл. 5). Группа А обогащена кристаллами коричневой и особенно розовой и розово-коричневой окраски различной интенсивности.

Наибольшая доля прозрачных алмазов приходится на группу Б, в ней также более велика вероятность встретить зеленые камни. У алмазов

Таблица 2

Значения частоты проявления различных форм роста, растворения, акцессорного травления и пластической деформации на поверхности кристаллов алмаза из россыпи Эбелях*

Показатель	Вся вы- борка, %	По группам, %		
		А	Б	В
Формы роста				
Антискелетный рост	2,4	8,2		2,1
Полицентризм роста граней	3,3	5,5	3,2	2,8
Блоковое строение	22,6	8,2	3,2	26,1
Ростовая ступенчатость	1,5	1,4	6,5	0,7
Отрицательные вершины	0,8		3,2	
Выраженные вершины по L3	1,1		6,5	
Индукционная поверхность	0,6		3,2	0,7
Формы растворения				
Мозаично-блоковая скульптура	22,8	13,9	12,9	26,1
Черепитчатая скульптура	11,4	13,9	9,7	6,3
Вальцеобразная скульптура	3,2	1,4		3,5
Каплевидно-блоковая скульптура	3,2	9,7	3,2	1,4
Концентрическая штриховка	6,5	5,6	22,6	4,9
Сноповидная штриховка	9,9	2,8	3,2	8,5
Сноповидно-занозистая штри- ховка	7,6	8,3		9,9
Занозистая штриховка	20,2	52,8	38,7	9,9
Шестовато-занозистая штриховка	8,2	12,5	9,7	11,3
Параллельная штриховка	3,3	2,8		0,7
Ступенчатость растворения	3,8	1,4	3,2	

Показатель	Вся вы-борка, %	По группам, %		
		А	Б	В
Округло-ступенчатые	5,0	5,6		2,8
Каплевидные холмики	13,8	4,2	12,9	19,0
Желобчатые ребра	0,3		3,2	
Овализация ребер	3,8	6,9	6,5	1,4
Расщепление вершин	2,4	6,9	3,2	1,4
Ячеистый рельеф	0,9	1,4		1,4
Формы акцессорного травления				
Треугольные фигуры	25,7	32,4	22,6	21,0
Треугольные пирамиды	33,7	28,4	9,7	30,1
Тетрагональные пирамиды	6,4	5,4	3,2	2,1
Ямки	12,9	17,6	29,0	16,8
Каналы травления	42,9	33,8	41,9	42,0
Каверны	27,1	13,5	29,0	25,2
Внешние проявления процессов пластической деформации				
Полосы пластической деформации	8,7	24,3	16,1	5,6
Линии скольжения	7,9	6,8	6,5	1,4
Шагреновая поверхность	14,3	36,5	22,6	3,5
Отсутствуют	69,1	32,4	54,8	89,5

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

Таблица 3

Наличие двойников и сростков кристаллов алмаза из россыпи Эбелях				
Характер образования	Вся выборка, %	По группам, % I разновидности		
		А	Б	В
Полидвойник и поликристаллический агрегат	8,2	1,4		9,8
Шпинелевый двойник	8,7	5,4	16,1	7,0
Двойниковые швы	15,6	23,0	12,9	27,3
Сросток	13,8	5,4	3,2	19,6
Вросток	4,8	2,7	3,2	2,8
Монокристалл	48,9	62,2	64,5	33,6

Таблица 4

Степень механического износа кристаллов алмаза из россыпи Эбелях					
Степень	Истирание	Все, %	По группам, % I разновидности		
			А	Б	В
0	Отсутствие механического износа	62,1	71,6	90,3	59,4
1	Незначительное истирание вершин	8,8	10,8	3,2	7,7
2	Незначительное истирание вершин и ребер	11,9	9,5	3,2	14,0
3	Истирание вершин и ребер, незначительная матировка граней	9,7	5,4		14,0
4	Значительное истирание ребер и граней	5,0	1,4	3,2	3,5
5	Сильное истирание, округление ребер, полная матировка граней	1,7	1,4		
6	Сильное истирание, утрата ребер и вершин	0,9	1,4		
	Леденцовая скульптура	5,6	1,4		7,7

группы В встречены зеленые пятна пигментации, а также заметно больше, чем у других групп, доля серой окраски. В то же время проявлений эпигенетической окраски мало, почти у 3/4 алмазов группы

Таблица 5

Окраска кристаллов алмаза из россыпи Эбелях				
Окраска	Все, %	По группам, % I разновидности		
		А	Б	В
Бесцветные	12,6	10,8	32,3	14,7
Сингенетическая окраска				
Отсутствует	32,5	47,3	54,8	26,6
Желтая	64,8	52,7	45,2	73,4
Эпигенетическая окраска				
Отсутствует	56,8	44,6	61,3	74,1
Зеленые пятна пигментации	2,0	2,1		
Зеленая	1,6	6,5		2,1
Коричневая	17,2	31,1	16,1	6,3
Розовая, розово-коричневая	5,4	17,6	3,2	
Серая	17,0	6,8	12,9	15,4

они отсутствуют. Однако и доля бесцветных камней невелика, что объясняется максимальным (73,4%) развитием сингенетической желтой окраски различной интенсивности.

Включения других минералов (кроме графита) в алмазе встречаются достаточно редко, исследованная выборка алмазов оказалась недостаточно велика для изучения их распределения по выделенным группам. Из выявленных закономерностей можно отметить максимальное количество кристаллов, свободных от включений, для группы Б — 35,5% против 21,6 и 14,0% для групп А и В соответственно. Увеличение количества включений в кристаллах групп А и В в подавляющем большинстве случаев происходит за счет графита.

В табл. 6 приведены данные о визуальной люминесценции алмазов. Сильно выделяются люминесцентными свойствами алмазы группы А. Визуальная люминесценция проявлена у 91,9% кристаллов, только в эту группу попадают кристаллы с зональной люминесценцией, а также со свечением голубовато-зеленой окраски. Более того, в исследованных кристаллах алмаза из россыпи Эбелях широко проявлена люминесценция в коротковолновом диапазо-



Рис. 3. Фото некоторых исследованных алмазов из россыпи Эбелях: а — обр. Эб-77-2, коричневый додекаэдроид уральского типа с шагреновой поверхностью и полосами пластической деформации, с износом 2-й степени, группа А; б — обр. Эб-39-9, кривогранный шпинелевый двойник, представленный додекаэдроидом уральского типа, без износа, группа Б; в — обр. Эб-38-3, кривогранный сросток с многочисленными двойниковыми швами и слабым износом, наибольший кристалл в сростке имеет додекаэдрический габитус, с реликтами сноповидной штриховки, группа В. Фото алмазов приведены в одном масштабе, поля зрения 7×5,2 мм

не, проявляющаяся при возбуждении источником с длиной волны 254 нм. Алмазы с такими свойствами обычно составляют доли процента в исследованных авторами коллекциях из различных месторождений. В изученной выборке из россыпи Эбелях доля таких кристаллов оказалась равной почти 5%. При этом более чем для половины из них люминесценция при 365 и 254 нм различалась не только по интенсивности, но и по цвету. При разделении на группы кристаллы, у которых обнаружена люминесценция в коротковолновом диапазоне, попали только в группу А, где составили 41,9%. Незначительно проявлены люминесцентные свойства у алмазов в группе В — визуально люминесцирует лишь 21% кристаллов, в основном в слабой голубой окраске.

Таблица 6

Визуальная люминесценция кристаллов алмаза из россыпи Эбелях

Окраска	Все, %	По группам, % I разновидности		
		А	Б	В
Визуально отсутствует	56,3	8,1	29,0	79,0
Голубая слабая	18,5	16,2	38,7	16,8
Голубая средняя	7,8	13,5	12,9	2,1
Голубая интенсивная	10,9	43,2	19,4	2,1
Голубая с зеленым	1,6	5,4		
Зеленая	0,7			
Желтая	0,6	1,4		
Зональная	3,7	12,2		
В том числе в коротковолновом диапазоне	5,0	41,9		

В табл. 7 отражены результаты исследования методом ЭПР 98 кристаллов алмаза из россыпи Эбелях (без деления на группы), номенклатура центров использована согласно [Loubser, Wyk, 1978]. Концентрацию парамагнитных центров рассчитывали с использованием эталонных образцов. Спектры снимали в ориентации кристаллов H||L4, юстировка проводилась по центрам P1 (иногда по W7). Количество исследованных методом ЭПР кристаллов из групп Б и В статистически непредставительно для числового отображения результатов, однако общие

Таблица 7

Парамагнитные центры в кристаллах алмаза из россыпи Эбелях

Показатель	P1	P2	N2	W7	W21	OK1
Кристаллы, содержащие центр, %	73,5	86,7	18,4	13,3	35,7	2,0
Максимальная концентрация, ppm	5,0	18,8	0,5	1,1	0,006	0,3
Средняя концентрация для кристаллов, содержащих центр, ppm	0,5	2,2	0,1	0,5	0,001	0,1

тенденции очевидны — в алмазах группы А значительно больше распространены центры N2 и W7, связанные с пластической деформацией кристаллов; алмазы группы В лидируют по содержанию центров P1 и P2, в то время как алмазы группы Б характеризуются сравнительно низкой концентрацией парамагнитных центров. Отметим, что в ЭПР-выборке отмечен лишь один кристалл II разновидности по Ю.Л. Орлову (центр P1 — 5 ppm).

Как показано в табл. 1, суммарно 28,3% исследованной коллекции составляют алмазы II–VII разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова. Некоторые из них попадают в выделенные по ИК-распределению группы прямым путем согласно измеренной концентрации А-центров. Однако по комплексам выявленных выше признаков можно соотнести исследованные алмазы этих разновидностей и группы А, Б и В.

Из 6 кристаллов II разновидности по Ю.Л. Орлову 5 однозначно следует отнести к группе А в соответствии с характером их люминесценции (в том числе коротковолновой), многочисленными морфологическими проявлениями пластической деформации кристаллов, а также по механическому износу. В подтверждение этого один кристалл попадает в группу А согласно ИК-анализу. Аналогичные свойства для алмазов II разновидности выявлены в посвященной их исследованию работе [Титков и др., 2015]. Таким образом, заметный избыток кристаллов II разновидности в россыпи Эбелях, соотносимый некоторыми авторами с особым типом первоисточника, можно отнести к группе А.

Только один алмаз в исследованной выборке относится к III разновидности по Ю.Л. Орлову — кристалл с гранями куба и тетрагексаэдра, серый от большого количества микровключений, без механического износа, со слабой голубой люминесценцией. По комплексу свойств он близок к алмазам групп А и Б. Также лишь 2 алмаза желтого оттенка в исследованной выборке отнесены к IV разновидности по Ю.Л. Орлову, один из них принадлежит к группе А согласно ИК-анализу, а также имеет коротковолновую люминесценцию. Тем не менее, это единичные кристаллы, их доля в общей выборке слишком мала для того, чтобы назвать алмазы III или IV разновидности характерными для какой-либо группы.

Другая картина распределения по группам А, Б и В наблюдается для кристаллов V и VII разновидностей. По данным ИК-анализа в группу А попадают 4 кристалла V и 3 кристалла VII разновидностей; в группу Б — лишь 4 кристалла V разновидности по Ю.Л. Орлову. Здесь уместно вспомнить о статистическом характере распределения, рассмотренном выше (рис. 2), который допускает попадание единичных кристаллов в другие группы, поскольку совершенно очевидно тяготение этих разновидностей к группе В, куда попал 21 кристалл V разновидности и 14 кристаллов VII разновидности.

Заключение. Полученные данные позволяют разделить на три группы по предполагаемым первоисточникам не только алмазы II, V и VII разновидностей из россыпи Эбелях, но и описать для каждой группы характерные особенности кристаллов, составляющих основную массу в каждом первоисточнике, — алмазов I разновидности по Ю.Л. Орлову.

В первоисточнике, отвечающем группе А, среди алмазов I разновидности плоскогранно-кривогранные формы составляют около 13,5%, при этом более 5% из них — октаэдры. Также отметим значительное (более 5%) количество кристаллов ряда октаэдр-ромбододекаэдр. Около 73% всех алмазов I разновидности составляют кривогранные додекаэдрониды, при этом ламинарных додекаэдронидов примерно на 1/3 больше, чем додекаэдронидов уральского типа. В морфологии поверхности кристаллов для группы А характерно более широкое развитие антискелетного роста, каплевидно-блоковой скульптуры, более частое, чем в других группах, проявление занозистой штриховки и наличие параллельной штриховки; расщепление вершин кристаллов. Широко проявлены процессы пластической деформации.

Монокристаллы составляют около 60% кристаллов I разновидности. Степень механического износа алмазов слабая — более чем у 70% кристаллов он отсутствует, еще приблизительно у 20% выражен в незначительном истирании вершин и ребер. Группа обогащена алмазами эпигенетической окраски — коричневой и особенно розовой и розово-коричневой (почти половина кристаллов).

Наиболее заметно алмазы группы А отличаются люминесцентными свойствами. Люминесцируют более 90% кристаллов, встречается люминесценция, отличающаяся от голубой, а также зональная и в коротковолновом диапазоне. В алмазах группы А широко распространены парамагнитные центры N2 и W7, связанные с пластической деформацией кристаллов. Предполагаемый первоисточник кристаллов группы А по комплексу свойств алмазов близок к выделенному в работах [Афанасьев 2011; Зинчук, Коптиль, 2003] первоисточнику второго типа, т. е. лампроитового генезиса; однако относимое нами к группе А «избыточное» количество алмазов II разновидности по классификации Ю.Л. Орлова авторы работы [Зинчук, Коптиль 2003] выделили в отдельный тип. Суммарное количество алмазов V и VII разновидностей минимально по сравнению с другими группами.

Алмазы группы Б по свойствам наиболее соответствуют выделенному ранее [Афанасьев 2011; Зинчук, Коптиль 2003] «кимберлитовому» типу первоисточника. Отметим, что в исследованной выборке это самая малочисленная из трех выделенных групп. Среди алмазов I разновидности суммарная доля плоскогранно-кривогранных форм максимальна среди выделенных групп и составляет

около 20%, при этом большая их часть (около 13%) приходится на кристаллы ряда октаэдр-додекаэдронид. Доля кривогранных додекаэдронидов — 2/3, преобладают (более чем в 2 раза) уже додекаэдрониды уральского типа. Кристаллы псевдоромбододекаэдрического габитуса, а также алмазы VII разновидности отсутствуют. Характерны следующие морфологические особенности кристаллов группы: развитие ступенчатости, желобчатые ребра, наличие отрицательных вершин, выраженные вершины по L3, преобладание концентрической штриховки. Пластическая деформация кристаллов выражена слабо. Среди кристаллов группы Б отмечена необычно высокая доля шпинелевых двойников (16%), а также бесцветных камней (более 30%). Наиболее велика вероятность встретить зеленые кристаллы (6,5%) и кристаллы, свободные от включений (35,5%). Механический износ практически отсутствует. Люминесценция по сравнению с группой А проявлена слабее, приблизительно у 70% кристаллов и только в голубых тонах.

Группа В отражает свойства алмазов первоисточника, отвечающего за появление в россыпи Эбелях значительного количества кристаллов алмаза V и VII разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова В то же время у алмазов I разновидности по сравнению с группами А и Б резко снижена доля алмазов плоскогранно-кривогранных форм. Для морфологии алмазов характерны блоковое строение, мозаично-блоковая скульптура, сноповидная штриховка. Проявления пластической деформации практически отсутствуют. Доля монокристаллических алмазов по сравнению с группами А и Б уменьшена в 2 раза, почти до 1/3, за счет резкого увеличения содержания полидвойников и сростков. Износ алмазов, напротив, увеличен, преобладает 2–3 его степень. Заметно больше количество серых алмазов, хотя в целом эпигенетических окрасок мало. Встречены зеленые пятна пигментации, отмечено максимальное (около 3/4 алмазов) развитие сингенетической желтой окраски. Алмазы группы обогащены включениями графита, чаще проявлено ожелезнение. Наименее проявлена визуальная люминесценция, причем только в голубых тонах (21% образцов). Среди парамагнитных центров наиболее широко представлены P1 и P2.

Данные о количественных соотношениях выделяемых групп на других участках россыпей на северо-востоке Сибирской платформы могут быть использованы для установления направлений палеосноса и локализации первоисточников алмаза.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность Е.А. Васильеву (Санкт-Петербургский Горный университет) за помощь в анализе образцов алмаза методами ИК-спектроскопии.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзаказа № 1719189201752017729147283/2017-175 от 16.06.2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Тычков С.А. Проблема докембрийской алмазности Сибирской платформы // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология. 2002. Вып. 1. С. 19–36.
- Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П. и др. Полигенез алмазов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 3. С. 335–353.
- Владыкин Н.В., Торбеева Т.С. Лампроиты Томторского массива (Восточное Прианбарье) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 10. С. 1038–1050.
- Горина И.Ф. О возможном нахождении алмазных кимберлитовых трубок в районе Анабарского залива (Море Лаптевых) // Кимберлитовый вулканизм и перспективы коренной алмазности северо-востока Сибирской платформы. Л.: НИИГА, 1971. С. 134–136.
- Граханов С.А. К вопросу о распространении неоген-нижнечетвертичных россыпей алмазов северо-востока Сибирской платформы // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология. 2000. № 5. С. 212–215.
- Граханов С.А., Коптиль В.И. Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 11. С. 1191–1201.
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 603 с.
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Об особенностях алмазов из кимберлитов и древних осадочных толщ (на примере Центрально-Сибирской алмазносной субпровинции) // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология. 2018. № 4. С. 28–38.
- Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1955. 512 с.
- Метелкина М.П., Прокопчук Б.И., Суходольская О.В., Францессон Е.В. Докембрийские алмазоносные формации мира. М., Недра, 1976. 134 с.
- Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 221 с.
- Соболев В.С. Геология месторождений алмазов Африки, Австралии, Борнео и Северной Америки. М.: Госгеолтехиздат, 1951. 126 с.
- Тычков С.В., Ширяев А.А., Зудина Н.Н. и др. Дефекты в кубических алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы по данным ИК-микроспектроскопии // Геология и геофизика. 2015. № 1–2. С. 455–466.
- Loubser J., Van Wyk J.A. Electron spin resonance in the study of diamond // Rep. Prog. Phys. 1978. Vol. 41. P. 1201–1248.

Статья поступила в редакцию 03.02.2022,
одобрена после рецензирования 09.03.2022,
принята к публикации 31.08.2021