

Первые результаты исследований искаженной формы додекаэдрических кристаллов алмаза из россыпей Якутской алмазоносной провинции

А.Д. Павлушин¹, Д.Г. Степенщиков²

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

pavlushin@diamond.ysn.ru, stepen@geoksc.apatity.ru

Аннотация. Проведена апробация нового метода компьютерного анализа симметрии реальной формы кристаллов алмаза додекаэдрического габитуса. Получены первые объективные данные об искаженной форме кристаллов из россыпей Якутской алмазоносной провинции: россыпи Холомолоох, Анабарского алмазоносного района и россыпи Пироповый ручей Далдыно-Алакитского алмазоносного района. Показана принципиальная возможность анализа симметрии реальной формы округлых додекаэдроидов алмаза с помощью надежных инструментальных измерений кристаллов. По сравнению с додекаэдрами кимберлитового происхождения из россыпи Пироповый ручей додекаэдроиды из россыпи Холомолоох (представляющие россыпи северо-востока Сибирской платформы) имеют более значительную степень искривления выпуклых граней додекаэдроидов, что требует внесения поправок в результаты измерения расстояний между параллельными гранями. Расхождение результатов измерений между искривленными гранями додекаэдрических кристаллов кимберлитового происхождения находится в пределах погрешности измерений прибора и не требует корректировки. У кристаллов из россыпи Пироповый ручей зафиксировано 7, а из россыпи Холомолоох 13 морфологических типов искажения ромбододекаэдра. Общими морфологическими типами искаженного ромбододекаэдра для месторождений являются разновидности № 2 [0363], № 5 [0444], № 7 [0444], № 8 [0462] с соответствующими гранными наборами. Внешняя симметрия кристаллов в основном отвечает низшим категориям точечных групп симметрии. Впервые у додекаэдроидов алмаза отмечена внешняя псевдотригональная симметрия группы 32, обнаруженная у кристаллов из россыпи Холомолоох.

Ключевые слова: алмаз, додекаэдроид, кристалл, кристалломорфология, растворение, ромбододекаэдр, реальная форма.

Благодарности. Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект 0381-2019-0003) и частично при финансировании работ НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) (договор №02-НИР-В-17 от 13.03.2017 г.).

Введение

Округлый кривогранный додекаэдроид уральского (бразильского) типа – форма растворения алмаза, хорошо известная у кристаллов Бразилии [1], Южной Африки [1–4], Австралии [5], россыпей Урала [4, 6], кимберлитовых трубок Архангельской алмазоносной провинции [7]. В россыпях северо-востока Сибирской платформы эта форма широко распространена и признана типоморфной для кристаллов алмаза, связанных с неизвестными коренными источниками. В некоторых кимберлитовых телах Якутской алмазоносной провинции, например тр. Удачная, также отмечены подобные формы кристаллов алмаза

[4, 8]. Происхождение формы кривогранного додекаэдроидов за счет растворения в мантийных условиях показано экспериментально в водосодержащем карбонатно-силикатном расплаве [9].

Формой округлого додекаэдроидов растворения обладают алмазы I и V разновидностей по минералогической классификации Ю.Л. Орлова [4]. Внешне облик таких кристаллов весьма схож, в качестве основных описательных черт округлых алмазов отмечались характер рельефа поверхности граней, и оценка степени их искривления приводится, как правило, субъективно. Выявление более индивидуальных морфологических особенностей для кристаллов уральского типа из раз-

личных источников является важной и до сих пор не реализованной практической задачей, позволяющей выделить дополнительные надежные типоморфные признаки. Между тем кривогранная поверхность додекаэдроидов, его геометрия, внешняя искаженная форма и симметрия являются типоморфными признаками, непосредственно характеризующими условия образования алмазов.

К теме изучения искаженной формы кристаллов алмаза обращались многие исследователи, но касались они исключительно октаэдрической формы роста кристаллов [10–16]. Сложность изучения додекаэдрических кристаллов по сравнению с кубоидами и октаэдрами алмаза очевидна и до сих пор сводилась к наблюдениям отдельных типов искажений [17]. Визуальное определение внешней симметрии реальной формы кристаллов, особенно такого мелкого размера, как алмазы, во многом субъективно, а для многогранников сложной формы весьма затруднительно. По предшествующему опыту [13–16] ошибки в подобных определениях составляют порядка 35 %. Итоги столь неточных наблюдений, нередко фигурирующие в описании кристаллов алмаза, теряют свою ценность и практическую значимость. На современном техническом уровне задача точного описания реальной формы кристалла может быть выполнима лишь с привлечением цифровых технологий и компьютерной обработки данных.

Основной целью проделанной работы по измерениям искаженной формы додекаэдроидов являлось устранение возможных ошибок и апробирование эффективности предложенной авторами методики компьютерного анализа симметрии искаженных кристаллов алмаза. В качестве первых объектов исследования выбраны кристаллы алмаза россыпей Якутской алмазонасной провинции. Это округлые додекаэдроиды алмаза I разновидности из россыпи Холомолоох Анабарского алмазонасного района с неизвестным типом коренного источника, и в противовес им – кристаллы додекаэдрической формы заведомо кимберлитового происхождения из россыпи Пироповый ручей, генетически связанной с трубкой Удачная.

Методика исследования

Метод исследования искаженных форм кристаллов минералов [18] основан на универсальном принципе симметрии-диссимметрии П. Кюри [19]. В трактовке И.И. Шафрановского [20]: «...в течение роста кристалл сохраняет лишь те

элементы симметрии, которые совпадают с элементами симметрии кристаллообразующей среды». Следует заметить, что в нашем случае искаженные додекаэдроиды кристаллов алмаза несут форму, образованную растворением. Однако, так же как и с формами, порожденными ростом кристаллов, принцип диссимметрии, сформулированный для любых физических явлений, действует одинаково справедливо и для следствий среды растворения, отраженных в телах растворения кристаллов. Таким образом, симметрия среды оказывает влияние на внешнюю симметрию кристаллов и порождает на них простые ложные кристаллографические формы первого рода (подформы). Вывод всех простых ложных форм первого рода также показан И.И. Шафрановским [20]. Метод выделения подформ на кристаллах, как правило, более высокой собственной структурной симметрии служил вспомогательным приемом в определении визуальной пониженной внешней симметрии реальной формы кристалла.

Морфологические типы или реальные формы искаженных кристаллов определяются по методике, изложенной в работах Ю.Л. Войтеховского и Д.Г. Степенщикова [21, 22]. Они дают краткую и емкую характеристику геометрии реальной формы кристаллов, отражающую форму граней, их количество и характер контакта друг с другом. Морфологические типы дополняются формулой гранного набора, в которой на первой позиции указывается количество граней с 3-мя (например, 0), на второй с 4-мя (8), далее с 5-ю (0) и 6-ю (4) вершинами – [0804], как у кристалла с ложной симметрией $4/m\bar{3}m$ (рис. 1, а). Для полногранного ромбододекаэдра известно всего 17 возможных гранных наборов и 34 возможных морфологических типа искажения формы, причем один и тот же гранный набор может соответствовать нескольким различным морфологическим типам [22, 23]. Приведем их по порядку с указанием после каждой формулы гранного набора количества соответствующих морфологических типов: [0282] 1, [0363] 2, [0381] 1, [0444] 3, [0462] 5, [048] 2, [0543] 1, [0561] 4, [0624] 1, [0642] 4, [066] 2, [0741] 2, [0804] 1, [0822] 1, [084] 2, [0921] 1 и [0С] 1 – идеальный ромбододекаэдр. Отметим, что все гранные наборы не содержат треугольных граней, т. е. такая грань невозможна на искаженном полногранном ромбододекаэдрическом кристалле.

Кристалломорфологическое исследование ромбододекаэдров алмаза в настоящей работе выпол-

нено с помощью компьютерной программы «Интерактивный анализ видимой симметрии искаженных кристаллов алмаза» для ОС Windows, разработанной в ИГАБМ СО РАН по заказу НИГПАК «АЛРОСА» [14–16]. Программа рассчитывает результаты инструментальных измерений кристаллов и позволяет дать исчерпывающую характеристику искаженной формы полногранных кристаллов кубического, октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов. Основными параметрами измерения кристаллов являются расстояния между параллельными гранями и длины трех дополнительных (ложных) ребер a , b и f (см. рис. 1), возникающих на месте вершин идеальной кристаллографической формы за счет неравномерного развития граней кристалла. Знаком перед длиной ложного ребра указывается его ориентировка, что существенно – например, два ромбододекаэдрических кристалла на рис. 1, a , b при одинаковых прочих параметрах отличаются друг от друга только ориентировкой (но не длиной) ребра a , что в результате приводит к различию как их гранного набора, так и внешней симметрии. Так,

у кристалла на рис. 1, a внешняя симметрия относится к тетрагональной точечной группе $4/mmm$, а на рис. 1, b к ромбической $mm2$. После ввода параметров программа отстраивает масштабную трехмерную модель искаженной формы измеренного кристалла (рис. 2, 3). Определяются морфологический тип искажения, гранный набор и видимая симметрия кристалла, оцениваемая интегрально с помощью сравнения площадей и формы граней, связанных предполагаемыми элементами симметрии. Точность сравнения граней задается в интерфейсе программы изменяемой величиной коэффициента асимметрии [18] и сопровождается визуальным контролем оценки внешней симметрии искаженной формы кристалла.

Измерение кристаллов алмаза размером более 4 мм проводилось с помощью цифрового штангенциркуля – измерителя драгоценных камней «PRESIDIUM» PGCG с точностью измерений $\pm 0,01$ мм. Кристаллы ситовых классов $-4+2$ измерялись с помощью линейки окулярного микрометра микроскопа. Определение цены деления измерительной линейки окуляра производилось с помощью объект-микрометра для отраженного света ОМО ГОСТ 7513-75 с точностью измерения $\pm 0,01$ мм.

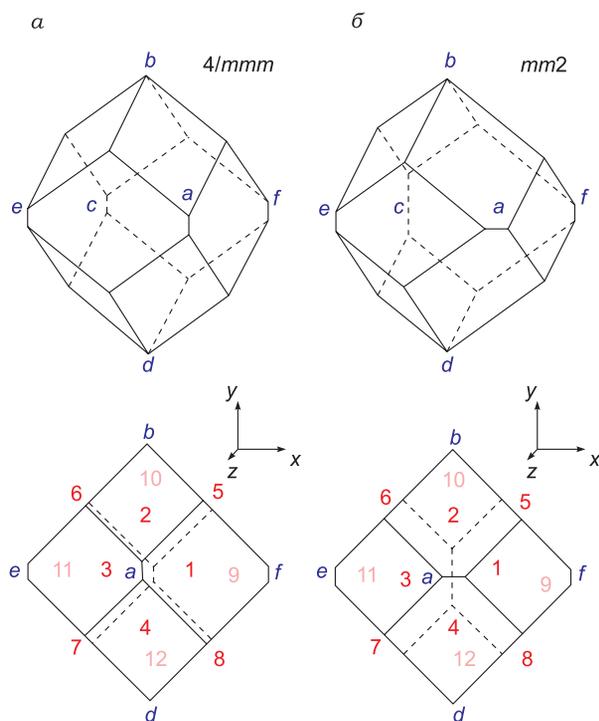


Рис. 1. Искажённые ромбододекаэдры псевдотетрагональной симметрии $4/mmm$ (a) и псевдоромбической симметрии $mm2$ (b). Пояснения в тексте.

Fig. 1. Distorted rhombododecahedra of pseudotetragonal symmetry $4/mmm$ (a) and pseudorombic symmetry $mm2$ (b).

Результаты анализа реальной формы кристаллов алмаза ромбододекаэдрического габитуса

Кристаллы ромбододекаэдрического габитуса проанализированы из коллекции алмазов долинной россыпи Пироповый ручей, расположенной в пределах Далдынского кимберлитового поля Далдыно-Алакитского алмазоносного района. Предполагается, что формирование россыпи происходило за счет разрушения коренного месторождения алмазов тр. Удачная и алмазоносных отложений надпойменных террас р. Далдын. Из выборки, насчитывающей около 100 кристаллов размерного класса $-4+3$, отобрано 11 кристаллов, пригодных для проведения инструментальных измерений. Анализ симметрии алмазов с помощью компьютерной программы позволил обнаружить 7 различных морфологических типов ромбододекаэдра, представленных гранными наборами [0363], [0444], [0462], [0624], [0642]. Подробные результаты анализа приведены в табл. 1.

Многие исследователи отмечали, что додекаэдрические кристаллы нередко бывают вытянуты или уплощены в одном из кристаллографических направлений. При этом собственные ребра

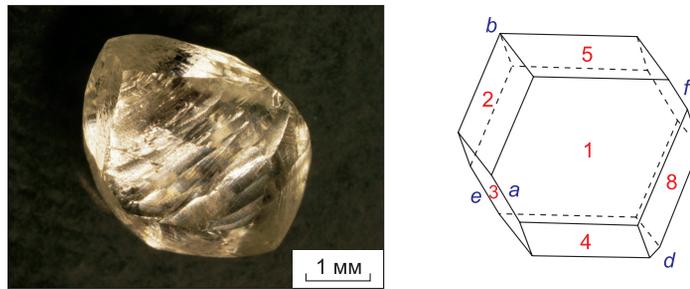


Рис. 2. Додекаэдрoid ложной триклинной симметрии (1) из россыпи Пироповый ручей и его трехмерная модель – ромбододекаэдр разновидности № 20 с гранным набором [0642].

Fig. 2. Dodecahedron of false triclinic symmetry (1) from the Ruchey Pyropovy placer and 3D-model rhombododecahedron of variety No. 20 with a faceted set [0642].

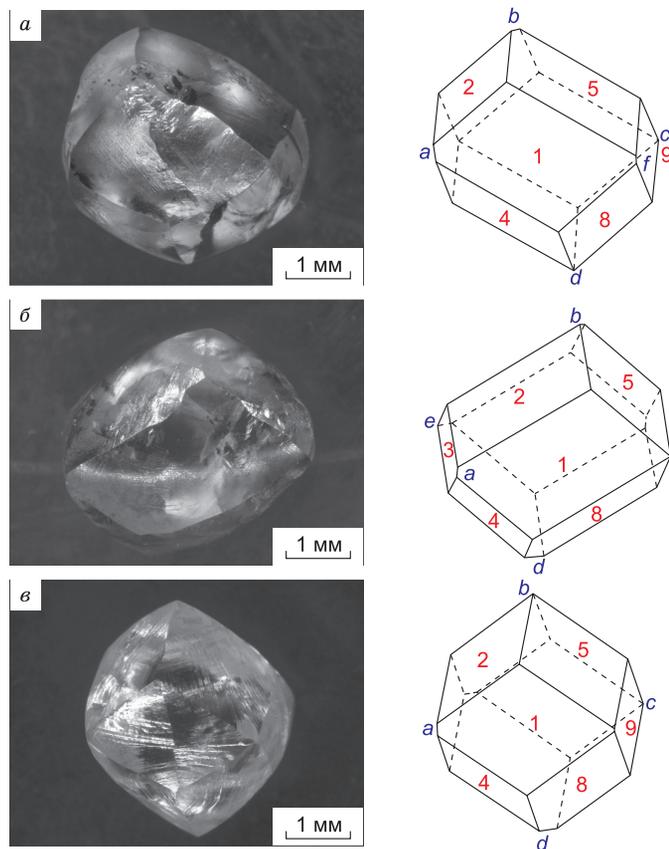


Рис. 3. Округлые додекаэдронды алмаза из россыпи Холомолоох (а, б) и трубки Удачная (в) и построенные трехмерные модели кристаллов.

а – псевдомоноклинный кристалл симметрии (2), разновидность ромбододекаэдра № 2 с гранным набором [0363], обр. 7357; б – псевdotриклинный кристалл ложной симметрии (1), разновидность № 11 с гранным набором [0462], № 7375; в – псевдомоноклинный кристалл симметрии (2), разновидность № 5 с гранным набором [0444], № 3509.

Fig. 3. Rounded dodecahedral diamond placer Kholomolokh (а, б) and Udachnaya pipe (в) and constructed three-dimensional models of crystals:

а – pseudomonoclinic symmetry crystal (2) of faceted set [0363] variety No. 2, No. 7357; б – pseudotriclinic dodecahedroid of false symmetry diamond (1) of faceted set [0462] variety No. 11, No. 7375; в – pseudomonoclinic symmetry crystal (2) of faceted set [0444] variety No. 5, No. 3509.

Таблица 1

Характеристики додекаэдров алмаза из россыпи Пироповый ручей

Table 1

Results characteristics of the dodecahedron diamond from placers of Pyropovy Ruchey

Гранный набор	Комбинаторный тип, № *	Видимая симметрия кристалла	Количество
[0363]	2	1	1
[0444]	5	2	2
		1	1
	7	$\bar{1}$	1
[0462]	8	1	1
[0624]	20	$mm2$	1
		m	1
		1	1
[0642]	21	1	1
	23	1	1

Примечание. В таблицах 1, 2 номер комбинаторного типа ромбододекаэдра указан по Ю.Л.Войтеховскому, Д.Г. Степенщикову [22, 23].

Note. In tables 1, 2 the number of the combinatorial type the rhombic dodecahedron is listed by U.L. Voitekhovskiy, D.G. Stepenshikov [22, 23].

ромбододекаэдра одного кристаллографического пояса [111] у индивидов могут быть растянуты или укорочены в параллельном направлении. В другом варианте удлинение наблюдается в параллельном направлении дополнительных ложных ребер, возникающих на ромбододекаэдре вдоль [001]. Характерной особенностью кристаллов алмаза из россыпи Пироповый ручей является наличие значительно развитых ложных ребер (см. рис. 2). Большинство изученных кристаллов имеет от трех до четырех параллельных ребер, неравномерно развитых в одном направлении.

Все обнаруженные виды ложной симметрии ромбододекаэдра из россыпи Пироповый ручей относятся к низшим видам симметрии. В одном случае наблюдалась псевдоромбическая симметрия ($mm2$), а основную часть кристаллов составили представители псевдомоноклинной (2) и (m) и псевдотриклинной ($\bar{1}$, 1) симметрии.

Округлые додекаэдровиды алмаза, представляющие россыпные алмазы северо-востока Сибирской платформы из аллювиальной россыпи Холомолоох Анабарского алмазоносного района, изучены в количестве 23 экз. из коллекции

Таблица 2

Характеристики додекаэдровидов алмаза из россыпи Холомолоох

Table 2

Characteristics of dodecahedron diamond Kholomolokh placer

Гранный набор	Комбинаторный тип, №	Видимая симметрия кристалла	Количество
[0363]	2	32	3
		2	3
	3	m	1
		1	2
[0381]	4	m	1
[0444]	5	2	2
	6	2	1
	7	m	1
[0462]	8	1	1
	9	m	1
	11	1	1
[0561]	17	2	1
	18	1	2
[0642]	22	m	2
[0741]	27	1	1

ИГАБМ СО РАН. Вес кристаллов варьировал от 0,85 до 1,3 карата, размер – от 0,9 до 11 мм.

В результате обработки данных инструментальных измерений среди додекаэдровидов россыпи Холомолоох обнаружено 13 различных морфологических типов искаженного ромбододекаэдра, представленных гранными наборами: [0363] (см. рис. 3, а), [0381], [0444] (см. рис. 3, б), [0462], [0561], [0642] и [0741]. Полученные данные сведены в табл. 2. Как мы видим, по сравнению с россыпью Пироповый ручей алмазы из россыпи Холомолоох проявляют более широкое разнообразие искажений формы додекаэдроида, возможно, связанное с большим количеством кристаллов в выборке. Несмотря на это, ложная симметрия кристаллов россыпи Холомолоох ограничена индивидами с низшими группами псевдомоноклинной (m) и (2) (см. рис. 3, а) и псевдотриклинной симметрии (1) (см. рис. 3, б). Кроме того, в отличие от россыпи Пироповый ручей, среди кристаллов отсутствуют искаженные формы псевдотриклинной симметрии с центром инверсии ($\bar{1}$). Но все же, выборка алмазов из россыпи Холомолоох выделяется наличием трех

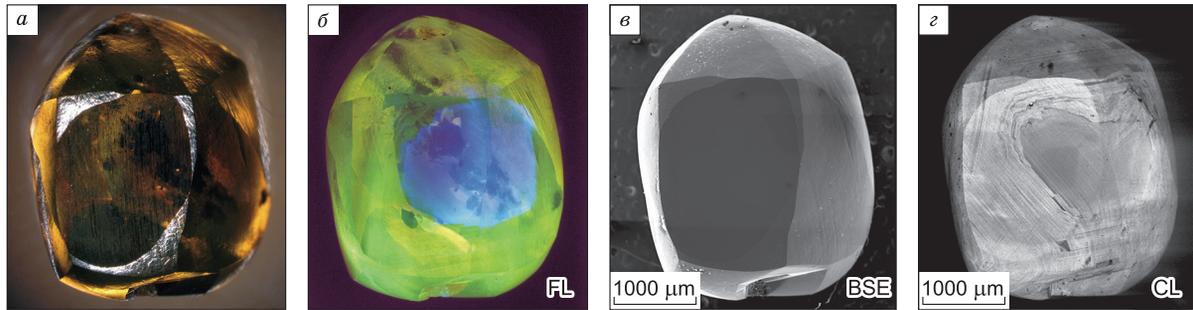


Рис. 4. Октаэдрическая зональность в кривогранном додекаэдроиде, россыпь Холомолоох: *a* – общий вид; *б* – фотолюминесценция в УФ-свете; *в* – изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE); *г* – картина катодолуминесценции (CL).

Fig. 4. Octahedral zoning in a curved dodecahedron, Kholomolokh placer: *a* – general view; *б* – photoluminescence in UV light; *в* – image in back-scattered electrons (BSE); *г* – picture of cathodoluminescence (CL).

кристаллов с комбинаторным типом № 2 [0363] более высокого – псевдотригонального вида симметрии (32). Отметим, что тригонально-трапецеэдрический вид симметрии (32) возможен лишь у данного морфологического типа искаженного ромбододекаэдра.

Из результатов анализа следует, что морфологические типы искаженного ромбододекаэдра № 2 [0363] (рис. 4, *a*), № 5 [0444] (рис. 4, *в*), № 7 [0444] и № 8 [0462] встречаются у додекаэдроидов алмаза как в россыпи Холомолоох, так и в россыпи Пироповый ручей. Кроме геометрического подобия додекаэдрические кристаллы обнаруживают значительное внешнее сходство морфологии (см. рис. 3, 4).

Обсуждение результатов

Изометричные, идеально развитые кристаллы среди округлых додекаэдроидов алмаза встречаются сравнительно редко. Эту особенность отмечали ранее у алмазов из россыпей Урала [4, 6]. Подобную картину мы наблюдаем и среди додекаэдроидов из россыпей северо-востока Сибирской платформы, что подтверждает отчасти результаты нашего исследования. Очевидно, среда растворения также была далека от признаков изотропного процесса растворения.

Октаэдрическая плоскогранная форма кристаллов являлась распространенной формой роста, а растворенные додекаэдроиды нередко имели ее изначально еще до начала процесса растворения. Следовательно, форма тел растворения алмаза могла унаследовать симметрию первоначальной формы кристаллов, подвергшихся резорбции. Слои тангенциального роста алмазов в

виде зональности по октаэдру обнаруживаются в алмазах уральского типа с помощью фотолюминесценции и катодолуминесценции. Свидетельство разительного несоответствия симметрии среды роста и среды растворения отмечены нами у одного из додекаэдроидов алмаза россыпи Холомолоох (см. рис. 4, *a*). Центральная область роста алмаза в контуре с голубым свечением в ультрафиолетовых лучах (см. рис. 4, *б*) вскрыта растворением настолько значительно, что она практически выходит на поверхность додекаэдроида (см. рис. 4, *в*). На картине катодолуминесценции (см. рис. 4, *г*) также отчетливо видно, что подсвеченные октаэдрические зоны роста трассируются на поверхности растворения кривогранного додекаэдроида и пересекаются с ней. Кроме несоответствия формы роста ее растворению это говорит еще и о весьма значительной потере веса, кратной первоначальному объему растворенного кристалла алмаза.

Итак, достоверно установлено, что первичными формами роста додекаэдроидов были остроугольные или ламинарные октаэдрические кристаллы. При достижении конечной формы растворения в виде округлого додекаэдроида грани октаэдра полностью исчезают из огранки. На месте исчезнувшей грани октаэдра возникают три ребра, образующие вершину $\{111\}$. Однако часто процесс растворения протекает не до конца и в ходе растворения грани октаэдра спорадически остаются на поверхности или в неполном наборе. Частично растворенные грани октаэдра утрачивают свое первоначальное положение, форму, покрываются кавернами, ямками травления и практически не отражают симметрию среды

растворения. Таким образом, наличием реликтов октаэдрических граней на поверхности растворения в ходе анализа искаженных форм додекаэдрических кристаллов можно пренебречь. Геометрически, на месте вершины :111:, образованной ребрами додекаэдра, на месте утраченной грани октаэдра не может возникать ложных ребер. Поэтому их наличие, равно как и отсутствие в огранке кристалла также не оказывает влияния на общий характер искажения додекаэдроидов.

Криволинейная поверхность граней додекаэдроидов вносит определенную сложность, прежде всего техническую, в измерение расстояний между параллельными гранями кристалла. Грани додекаэдроидов преломлены вдоль короткой диагонали ромба, что приводит к образованию на его выпуклой криволинейной поверхности так называемого гранного шва. Впрочем, нередко положение гранного шва смещается относительно центра грани и зависит от степени искажения кристалла. Тем не менее, он всегда остается самой высокой точкой на поверхности грани. Для того чтобы избежать ошибок, измерения необходимо проводить между этими самыми высокими точками искривленной поверхности на параллельных гранях кристалла. Кроме соблюдения точности измерений это оставляет возможность скорректировать полученные результаты путем внесения поправочных коэффициентов нивелирующих кривизну граней додекаэдроидов.

Ранее отмечались различия в кривизне граней додекаэдроидов уральского (бразильского) типа

из россыпей северо-востока Сибирской платформы и кимберлитов центральной части Якутской алмазоносной провинции [4, 8]. К сожалению, авторы не приводят численных характеристик, демонстрирующих эти различия. Отмечается лишь более значительная кривизна граней, наблюдавшаяся у округлых додекаэдроидов из россыпей, по сравнению с подобными кристаллами из кимберлитов. Кроме того, по результатам гониометрических измерений среди криволинейных алмазов округлой формы различаются собственно додекаэдроиды, характеризующиеся более пологими угловыми величинами кривизны вдоль короткой диагонали ромбической грани, и октаэдроиды, имеющие сравнительно большую кривизну поверхности вдоль короткой диагонали. Последние в россыпных месторождениях встречаются сравнительно редко, и это указывает на достаточно широкую возможную вариацию кривизны граней среди различных алмазов уральского типа. Зависимость увеличения кривизны граней с уменьшением их размера отмечалась ранее по результатам гониометрических измерений [6].

Угловые расстояния размеров световых рефлексов, полученные с помощью гониометрии, не дают полноценного представления о кривизне выпуклых граней додекаэдроидов [24]. Поэтому оценка отклонения значений кривизны поверхности была получена с помощью прямых измерений между параллельными выпуклыми гранями. Выполнены контрольные замеры расстояний между минимальными и максимальными высо-

Таблица 3

Показатели замеров расстояний между параллельными гранями додекаэдроидов алмаза демонстрирующими степень кривизны граней кристаллов из тр. Удачная и рос. Холололоох

Table 3

Indicators of measurements of distances between parallel faces of diamond dodecahedroids demonstrating the degree of curvature of the faces of crystals from Udachnaya pipe and Kholomolokh placer

Расстояние между гранями	Трубка Удачная, кристалл № 3509				Россыпь Холололоох, кристалл № 3717			
	Между центрами граней, мм	Между краями граней мм	Разница, мм	Отклонение, %	Между центрами граней, мм	Между краями граней мм	Разница, мм	Отклонение, %
1-11 (L1)	3.70	3.67	0.03	1	3.97	3.81	0.16	4
2-12 (L2)	4.02	3.97	0.05	1	4.32	4.15	0.17	4
3-9 (L3)	4.10	4.06	0.04	1	4.92	4.75	0.17	4
4-10 (L4)	4.04	4.03	0.01	0	4.72	4.52	0.20	4
7-5 (L5)	3.53	3.52	0.01	0	4.36	4.23	0.13	3
6-8 (L6)	4.07	4.05	0.02	0	4.46	4.28	0.18	4

тами каждой пары граней (табл. 3). Для чистоты эксперимента из коллекции ИГАБМ СО РАН нами были отобраны додекаэдрониды относительно изометричной формы и одинакового размера: один из кимберлитов трубки Удачная, алмазы которой питали россыпь Пироповый ручей, и один из коллекции россыпи Холомолоох. Измерения проводились между параллельными гранями вдоль длинного направления ромбической грани додекаэдронидов в самых высоких точках выпуклой поверхности, совпадающих с положением центра «гранного шва», и в самых низких по положению точках рельефа – у вершин :100.

По полученным данным высчитывалась абсолютная и относительная разница расстояний между парными гранями, измеренных в центральных частях граней и краевых участках. Отклонение значений у кристалла из россыпи Холомолоох составило 3–4 % (см. табл. 3). У кристалла из трубки Удачная разница в измерениях незначительна и составляет 0–1 %, а в некоторых случаях не превышает погрешность измерений прибора 0,01 мм.

По-видимому, необходимо ввести дифференцированный подход внесения поправок в измерение округлых додекаэдронидов из кимберлитов Якутской алмазоносной провинции и особенно – из россыпей северо-востока Сибирской платформы. Влияние формы криволинейной поверхности на измерение додекаэдронидов алмаза кимберлитового происхождения незначительно. Кроме того, необходимо учесть возможную зависимость кривизны граней алмазов от размера кристаллов. Надежная корреляция этих значений пока не разработана.

По отклонению световых рефлексов в отражательном гониометре у округлых додекаэдронидов растворения из Бразилии и Урала установлены три точечные группы симметрии $4/m$, $2/m$ и $\bar{6}$ [24]. По мнению исследователей, растворение кристаллов сопровождалось их вращением вокруг оси, совпадавшей с одной из основных осей истинной симметрии кристалла алмаза L_4 , L_2 или L_6 , соответственно результирующей симметрии. Перечисленные группы симметрии нами не были обнаружены у изученных растворенных форм кристаллов алмаза. Следует учесть, что группы симметрии $\bar{6}$ и $4/m$ в принципе не могут быть реализованы на ромбододекаэдре как таковые, без учета дополнительной гранной морфологии кри-

сталлов на вицинальном уровне. Для плоскогранного ромбододекаэдра группа симметрии $4/m$ реализуется в группе $4/mmm$, а группа $\bar{6}$ по набору ложных форм совпадает с группой симметрии $\bar{3}$. Но ни одна из них также не была обнаружена среди изученных нами кристаллов.

Признаки эффекта вращения кристалла или относительного вращения окружающей кристалл среды в ходе процесса растворения обнаружены нами у додекаэдронидов из россыпи Холомолоох. Они фиксируются присутствием ложной симметрии 3_2 у трех кристаллов алмаза. Напомним, группа симметрии 3_2 является подгруппой предельной группы симметрии ∞_2 (симметрия скрученного в противоположных направлениях цилиндра). В свою очередь симметрия ∞_2 относится в подгруппе предельной группы симметрии ∞/∞ (симметрия особенного шара), также несущей элементы симметрии, подразумевающей вращение объекта в одном направлении вдоль множества осей.

Зафиксированная у изученных кристаллов форма ложной моноклинной симметрии 2 отмечалась достаточно часто. Ее проявление может быть объяснено двояко. Во-первых, с позиции присутствия в кристаллообразующей среде факторов, отражающих парные пересечения предельных групп симметрии. Так, для ромбододекаэдра граната ложной симметрии 2 при совмещении основных направлений предельных групп симметрии среды ∞/m и ∞_2 в перпендикулярном, или групп ∞/mm и ∞_2 с косым положением основных осей [25] могло привести к реализации данной группы симметрии в искаженной форме огранки. Примечательно, что в том и другом случае присутствует элемент симметрии среды с признаком осевого вращения. Во-вторых, моноклинная симметрия 2 может проявиться у растворенной формы алмаза в результате воздействия среды предельной группы симметрии скрученного цилиндра ∞_2 , подгруппой которой она является, или симметрии конуса вращения ∞ . В этом случае необходимо параллельное положение оси симметрии кристаллообразующей среды L_∞ с одной из осей L_2 истинной симметрии кристалла. Здесь также является обязательным присутствие вращательного момента самого кристалла или в пространстве, окружающем кристалл.

Мы предполагаем, что обнаруженные у кристаллов алмаза группы видимой симметрии 2 и

32 (отражающие взаимное положение $L_{\infty}/2$) являются признаками вращения самого кристалла во время растворения или наличия вихревого вращения потоков в окружающей кристалл среде.

Выяснилось, что для кристаллов из россыпи Пироповый ручей на искажение додекаэдров особенно сильно повлияло возникновение дополнительных параллельных ложных ребер, а также их размеры. Основной вклад в искажение формы кристаллов из россыпи Холмолоох внесли расстояния между параллельными гранями додекаэдроида. Ложные ребра кристаллов, возникающие в их огранке на противоположных вершинах кристалла, часто имеют не совпадающую друг с другом ориентировку. Возможно, кристаллы из россыпи Пироповый ручей при растворении сохранили первоначальную форму роста алмазов, близкую к ромбододекаэдру, и все элементы огранки. В отличие от них, кристаллы из россыпей северо-востока Сибирской платформы пережили более глубокое растворение, что существенно изменило их первичную габитусную октаэдрическую форму роста и внешнюю симметрию.

Выводы

Одной из основных задач проведенного исследования является обоснование принципиальной возможности анализа реальной формы округлых додекаэдроидов растворения кристаллов алмаза. Качественными морфологическими типоморфными признаками россыпных алмазов из неизвестных коренных источников могут стать форма, внешняя симметрия, степень и характер искажения округлых додекаэдроидов.

По всей видимости, спектр разнообразия морфологических типов ромбододекаэдра более широк, чем он отражен в исследованной выборке, и требует дальнейшего анализа кристаллов с охватом россыпных месторождений северо-востока Сибирской платформы, в которых доминируют додекаэдроиды алмаза.

Трудоемкость выполнения инструментальных измерений искаженных многогранных форм кристаллов алмаза очевидна. Для оперативного получения статистически значимых данных с применением данного метода необходимо создание программного комплекса, позволяющего анализировать трехмерные изображения многогранников алмаза. Они могут быть получены с помощью трехмерного сканирова-

ния алмаза бесконтактными оптическими и лазерными измерительными устройствами либо рентгеновской томографии. Такая технология измерения полноценных кристалломорфологических характеристик позволит оперативно получать и обрабатывать большой массив данных о симметрии индивидов алмаза. Главную роль в анализе симметрии реальной формы кристаллов играет возможность оперировать надежными статистически представительными данными, современные цифровые технологии дают возможность осуществить эту задачу, что в дальнейшем может стать гарантией широкого применения данного метода в практике геолого-поисковых работ.

Литература

1. Ферман А.Е. Кристаллография алмаза. Л.: Изд. АН СССР, 1955. 566 с.
2. Шафрановский И.И. К кристаллографии алмазов бразильского типа // Докл. АН СССР. 1940. Т. 26, № 7. С. 670–673.
3. Шафрановский И.И. Результаты статистического исследования округлых уральских алмазов // Докл. АН СССР. 1941. Т. 31, № 8. С. 185–196.
4. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973. 264 с.
5. Tappert R., Foden J., Stachel T., Muehlenbachs K., Tappert R., Wills K. The diamonds of South Australia // Lithos. 2009. Vol. 112. P. 806–821.
6. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 512 с.
7. Бартошинский З.В. Кристалломорфология алмаза из кимберлитов Архангельской алмазоносной провинции // Минералогический сборник. 1992. Вып. 2, № 46. С. 64–73.
8. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 603 с.
9. Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N. The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // American Mineralogist. 2007. Vol. 92. P. 909–917.
10. Зыков Л.В., Шафрановский И.И. Статистика искаженных форм алмазных октаэдров // ЗВМО. 1975. Ч. 104, Вып. 3. С. 354–356.
11. Ракин В.И. Октаэдры алмаза и принцип Кюри // Кристаллография. 2015. Т. 60, № 5. С. 708–711.
12. Ракин В.И., Ковальчук О.Е., Помазанский Б.С. Диссимметризация искусственных и природных алмазов // Докл. РАН. 2016. Т. 471, № 6. С. 708–711.
13. Павлушин А.Д. Анализ анизотропии пространственно-неоднородной кристаллообразующей среды природного алмаза // Материалы межд. конф.

“XII съезд Российского минералогического общества”, 2015 г. СПб., 2015. С. 348–350.

14. Павлушин А.Д., Степенищikov Д.Г. Анализ симметрии октаэдрических кристаллов алмаза из кимберлитов и россыпей якутской алмазоносной провинции // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения», посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ – НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). Мирный, 2018. С. 391–393.

15. Павлушин А.Д., Степенищikov Д.Г. Анализ симметрии искаженной формы кристаллов алмаза и оценка ее прогнозно-поискового значения // Проблемы магматической и метаморфической петрологии, геодинамики и происхождения алмазов: Тезисы докладов Международной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика В.С. Соболева. Новосибирск, 2018. С. 45.

16. Павлушин А.Д., Степенищikov Д.Г. Характеристика симметрии реальной формы кристаллов алмаза из коренных и россыпных месторождений Мало-Ботубинского кимберлитового поля // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, 10–12 апреля 2019 г. Т. 1. Якутск, 2019. С. 153–156.

17. Бартошинский З.В., Гневушев М.А. Внешняя симметрия якутских алмазов и условия их кристаллизации // Зап. ВМО. 1969. № 5. С. 560–567.

18. Шафрановский И.И., Корень Р.В., Дубов П.Л. К методике изучения искаженных форм на кристаллах минералов // Зап. ВМО. 1971. Т. 100. вып. 1. С. 42–48.

19. Кюри П. О симметрии в физических явлениях // Пьер Кюри. Избранные труды. М., Л.: Наука, 1966. С. 95–113.

20. Шафрановский И.И. Очерки по минералогической кристаллографии. Л.: Недра, 1974. 67 с.

21. Войтеховский Ю.Л., Степенищikov Д.Г. Реальные кристаллографические простые формы // Зап. ВМО. 2004. № 2. С. 112–120.

22. Войтеховский Ю.Л., Степенищikov Д.Г. Реальные ромбододекаэдры: теория и приложение к гранатам г. Макзапах, Западные Кейвы, Кольский полуостров // Зап. ВМО. 2005. № 1. С. 97–103.

23. Voytekhovskiy Y.L., Stepenshchikov D.G. On the real crystal rhombododecahedra // Acta Cryst. 2004. Vol. A60. P. 582–584.

24. Ракин В.И. Криволинейные поверхности растворения как отражение физико-химических свойств структуры кристалла // Кристаллография. 2011. Т. 56, № 2. С. 314–323.

25. Степенищikov Д.Г. О предельных группах симметрии и формах кристаллов альмандин // Зап. ВМО. 2010. № 4. С. 107–110.

Поступила в редакцию 19.09.2019

Принята к публикации 20.11.2019

Об авторах

ПАВЛУШИН Антон Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-7991-1947>, pavlushin@diamond.ysn.ru;

СТЕПЕНЩИКОВ Дмитрий Геннадьевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт Кольского научного центра РАН, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия,

Researcher ID A-4233-2017, stepen@geoksc.apatity.ru.

Информация для цитирования

Павлушин А.Д., Степенищikov Д.Г. Первые результаты исследований искаженной формы додекаэдрических кристаллов алмаза из россыпей Якутской алмазоносной провинции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019, том 24, № 4. С. 25–36. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-2>

The first results of studies of the distorted shape of dodecahedral diamond crystals from placers of the Yakutian diamond-bearing province

A.D. Pavlushin¹, D.G. Stepenschikov²

¹*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

²*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia*

pavlushin@diamond.ysn.ru, stepen@geoksc.apatity.ru

Abstract. A new method of computer analysis of the symmetry of the real shape of diamond crystals of dodecahedral habit is tested. Produced the first objective data on the distorted form of crystals from mineral deposits of the Yakutian diamondiferous province: placer Kholomolokh, Anabar diamondiferous district, Pyropovy Ruchey placer Daldyno-Alakit diamondiferous district. The principal possibility of analyzing the symmetry of the real shape of rounded diamond dodecahedroids with the help of reliable instrumental measurements of crystals is shown. Compared with dodecahedrons kimberlite origin from the deposits of Pyropovy Ruchey, dodecahedron placer Kholomolokh (representing placers of the northeastern Siberian platform) have a significant degree of curvature of the convex faces of dodecahedron, which requires amendments to results of measurement of distances between parallel faces. The discrepancy of the measurement results between the curved faces of dodecahedral crystals of kimberlite origin is within the measurement error of the device and does not require correction. The crystals from the deposits of Pyropovy Ruchey were 7, and placer Kholomolokh 13 morphological types of distortion of the rhombic dodecahedron. Common morphological types of distorted rhombododecahedron are varieties №2 [0363], №5 [0444], №7 [0444], №8 [0462] with matching face sets. The external symmetry of crystals mostly corresponds to the lower categories of point symmetry groups. For the first time, the external pseudotrigonal symmetry of group 32 was observed in diamond dodecahedroids. This symmetry found in crystals from placers Kholomolokh.

Key words: Diamond, dodecahedron, crystal, crystal morphology, dissolution, rhombic dodecahedron, real form.

Acknowledgements. The research was carried out according to the plan of research of IGABM SB RAS (project 0381-2019-0001) and partially with financing of works of NIGP AK "ALROSA" (PAO) (contract No. 02-NIR-V-17 dated 13.03.2017).

References

1. Fersman A., Goldschmidt V. Der Diamant. Heidelberg: Winter, 1911. 274 p.
2. Shafranovsky I. I. On crystallography of diamonds of Brazilian type // Reports of the USSR Academy of Sciences. 1940. Vol. 26, No. 7. P. 670–673.
3. Shafranovsky I. I. Results of statistical study of rounded Ural diamonds // Reports of the USSR Academy of Sciences. 1941. Vol. 31, N 8. P. 185–196.
4. Orlov Y. L. Mineralogy of diamond. Moscow: Nauka, 1973. 264 p.
5. Tappert R., Foden J., Stachel T., Muehlenbachs K., Tappert R., Wills K. The diamonds of South Australia // Lithos. Vol. 2009, 112. P. 806–821. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.04.029
6. Kukharenko A. A. Diamonds Of The Urals. M: Gosgeoltekhizdat, 1955. 512 p.
7. Bartoshinsky Z. V. Crystallomorphology of diamond from kimberlites of Arkhangelsk diamondiferous province // Mineralogical collection. 1992. Vol. 2. N 46. P. 64–73.
8. Zinchuk N. N., Koptil V. I. Diamond Typomorphism of the Siberian platform. Moscow: LLC «Nedra-Biznes-sentr», 2003. 603 p.
9. Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N. The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // American Mineralogist. 2007. Vol. 92. P. 909–917.
10. Zykov L.V., Shafranovsky I.I. Statistics are distorted forms of diamond octahedrons // Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 1975. CH. 104, Vol. 3. P. 354–356.
11. Rakin V.I. Diamond Octahedra And Curie Principle // Crystallography Reports. 2015. Vol. 60, N 5. P. 749–757. DOI: 10.1134/S1063774515050119
12. Rakin V.I., Kovalchuk O.E., Pomazansky B.S. Dissymmetrization of artificial and natural diamonds // Reports of the Academy of Sciences. 2016. Vol. 471, N 6. P. 708–711. DOI: 10.7868/S0869565216360184

13. *Pavlushin A.D.* Analysis of the anisotropy of the spatially inhomogeneous crystal-forming medium of natural diamond. Materials of the journal. Conf. "XII Congress of The Russian mineralogical society", 2015 St. Petersburg, 2015. P. 348–350.
14. *Pavlushin A. D., Stepenshchikov D. G.* Analysis of the symmetry of octahedral diamond crystals from kimberlites and placers of Yakutia diamondiferous province // Materials of the V Russian scientific-practical conference with international participation "The Efficiency of exploration for diamonds: inferred resource, methodical, innovative and technological ways of its improvement", devoted to the 50-ann. Diamond Lab TsNIGRI – NIGP «ALROSA» (JSC), 2018. P. 391–393.
15. *Pavlushin A.D., Stepenshchikov D.G.* Analysis of the symmetry of the distorted form of diamond crystals and assessment of its predictive and search value // Problems of magmatic and metamorphic Petrology, geodynamics and origin of diamonds: Abstracts of the international conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of academician V. S. Sobolev. Novosibirsk, 2018. P. 45.
16. *Pavlushin A.D., Stepenshchikov D. G.* Characteristics of the symmetry of the real form of diamond crystals from the indigenous and alluvial deposits of the Malo-Botuobinsk kimberlite field // Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the IX all-Russian scientific and practical conference, 10–12 April 2019, Vol. 1. Yakutsk, 2019. P. 153–156.
17. *Bartoshinsky Z. V., Gnevushev M. A.* External symmetry of Yakut diamonds and conditions of their crystallization // Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 1969. N 5. P. 560–567.
18. *Shafranovsky I.I., Koren R.V., Dubov P.L.* To the method of studying distorted forms on crystals of minerals // Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 1971. Vol. 100, N 1. P. 42–48.
19. *Curie P.* On Symmetry in Physical Phenomena, Symmetry of an Electric Field and of a Magnetic Field' // Journal de Physique. 1894. 3. P. 401.
20. *Shafranovsky I.I.* Essays on mineralogical crystallography. L.: Nedra, 1974. 67 p.
21. *Voitekhovskiy Yu.L., Stepenshchikov D.G.* Real crystallographic simple forms // Proceedings of the Russian Mineralogical Society. N 2. 2004. P. 112–120.
22. *Voitekhovskiy Yu.L., Stepenshchikov D.G.* Real rhombododecahedra: theory and application to garnets of Makzapakh, Western Caves, Kola Peninsula // Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 2005. N 1. P. 97–103.
23. *Voitekhovskiy Y.L., Stepenshchikov D.G.* On the real crystal rhombododecahedra // Acta Cryst. 2004. Vol. A60. P. 582–584.
24. *Rakin V.I.* Curved Surfaces Upon Dissolution as a Manifestation Of Physicochemical Properties of Crystal Structure // Crystallography Reports. 2011. Vol. 56, N 2. P. 289–297. DOI: 10.1134/S1063774511020155
25. *Stepenshchikov D.G.* On limit symmetry groups and forms of almandine crystals // Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 2010. N 4. P. 107–110.

About the authors

PAVLUSHIN Anton Dmitrievich, candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7991-1947>, pavlushin@diamond.ysn.ru;

STEPENSCHIKOV Dmitri Gennadevich, candidate of geological and mineralogical sciences, researcher, Geological Institute Kola Science Centre of RAS, 14 Fersmana St., Apatity, Murmanskaya Oblast, 184209, Russia, Researcher ID A-4233-2017; stepen@geoksc.apatity.ru.

Citation

Pavlushin A.D., Stepenshchikov D.G. The first results of studies of the distorted shape of dodecahedral diamond crystals from placers of the Yakutian diamond-bearing province // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2019, Vol. 24, N 4. P. 25–36. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-2>