ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА 2021, Ч. CL, № 1, с. 127–133

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

ПИРАМИДЫ РОСТА ГРАНЕЙ {110} В ПРИРОДНОМ АЛМАЗЕ

© 2021 г. д. члены И. В. Клепиков[1, *], Е. А. Васильев[2], А. В. Антонов[1], А. А. Кудрявцев[3]

[1]*ВСЕГЕИ, Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106 Россия*
[2]*Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия*
[3]*ООО "Тескан", Гражданский пр., 11, Санкт-Петербург, 195220 Россия*
**e-mail: klepikov_igor@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.10.2020 г.
После доработки 14.12.2020 г.
Принята к публикации 14.12.2020 г.

Приводятся результаты изучения внутреннего строения двух значительно растворенных кристаллов алмаза из россыпей Красновишерского района (Западное Приуралье). Внутреннее строение визуализировано как с поверхности кристалла, так и на плоскопараллельной полированной пластине. Обнаружена секториальная неоднородность: в общем пространстве пирамиды роста граней {100} по люминесценции выявляются фигуры в виде трех лучей, исходящих из одной точки. Показано, что эти фигуры соответствуют пирамидам роста граней {110}. Таким образом, установлена возможность сосуществования в одном кристалле алмаза слоев роста граней {110}, {100} и {111}.

Ключевые слова: алмаз, внутреннее строение, секториальность, пирамиды роста граней {110}, кубоид

DOI: 10.31857/S0869605521010068

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллы алмаза в большинстве своем имеют октаэдрическую морфологию. В их внутреннем строении доминирует прямолинейная зональность, которая соответствует тангенциальному механизму роста граней {111} (Орлов, 1984; Бескрованов, 2000). В подчиненном количестве встречаются кубоиды и кристаллы с совместным ростом пирамид граней {111} и {100} (Rakovan et al., 2014). Больше ростовых граней выделено в микрокристаллах (Квасница и др., 1999), но на поверхности макрокристаллов эти формы не выявляются (Ракин, 2013). Значительная часть природных кристаллов имеет признаки растворения. Форма их зависит от исходного габитуса и степени растворения. При потере более 50% массы такие кристаллы не имеют реликтов исходной поверхности и ограничены поверхностями эллипсоида (Ракин, 2013). Также существуют алмазы "в оболочке" с поверхностями, субпараллельными {110}, они являются результатом волокнистого роста в направлении [111] (Machado et al., 1985). Случаи описания кристаллов с ростовой зональностью пирамид граней {110} единичны (Pavlushin et al., 2017).

В отличие от природных кристаллов алмаза, синтетические могут иметь сингулярные грани {111}, {100}, {110}, {113}, {115} (Welbourn et al., 1996). Эти грани формируют соответствующие пирамиды роста, которые прекрасно визуализируются из-за диспропорционирования в распределении примесей – азота и бора. В природных индивидах пирамиды роста разных граней тоже проявляются во внутреннем строении. Об-

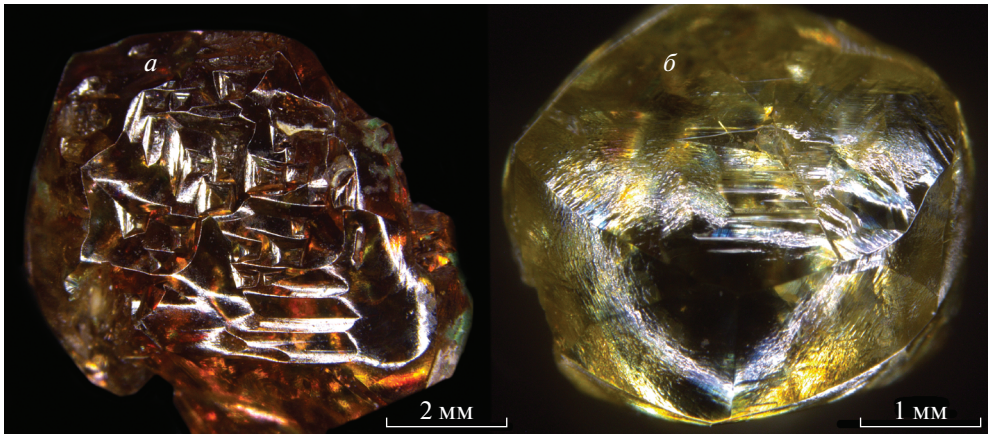


Рис. 1. Фотографии изученных кристаллов: *а* – кубоид 223-76, *б* – сильно растворенный кристалл 605-66.
Fig. 1. Morphology of studied crystals: *а* – cuboid 223-76, *б* – strongly dissolved crystal 605-66.

щей особенностью природных кристаллов со сложным внутренним строением является их переогранение на последних стадиях роста за счет регенерационного нарастания слоев {111} (Klepikov et al., 2020). Этот эффект не позволяет выявлять возможные случаи роста граней других простых форм при изучении поверхности кристаллов. Только изучая конституционные особенности алмаза, можно заключить, какие поверхности являются индивидуальными гранями (Pavlushin et al., 2017), какие – их микроступенчатыми комбинациями (Миронов, 2017).

В настоящей работе исследованы случаи внутреннего строения кристаллов алмаза, которые могут указывать на реализацию тангенциального механизма роста граней {110} в природном алмазе.

ОБРАЗЦЫ И АППАРАТУРА

При исследовании кристаллов алмаза из россыпей Красновишерского района (Клепиков и др., 2019) были обнаружены два значительно растворенных кристалла желтой (образец 605-66 массой 30 мг) и коричневой (223-76, 206 мг) окраски (рис. 1). Эти кристаллы содержат азот в форме *C*-центров, которые характерны для кубических кристаллов. В спектрах фотолюминесценции выявляются системы S1, 575, 637 нм, линии 800, 820.5, 823, 840, 843, 847, 860, 869, 884, 890, 912 нм. По морфологическим и спектроскопическим критериям индивиды соответствуют II разновидности по классификации Ю.Л. Орлова. Из кристалла 223-76 была выпилена пластина по {100} для детального изучения его внутреннего строения. Неоднородности в строении образцов были визуализированы монохромной катодолюминесценцией (КЛ) на сканирующем электронном микроскопе CamScan MX2500 S с приставкой CLI/QUA 2 при ускоряющем напряжении 12 КэВ. Для выявления неоднородностей, связанных с разориентировкой структуры, были зарегистрированы карты EBSD на сканирующем электронном микроскопе MIRA III (Teskan) с детектором Symmetry (Oxford Instruments) с шагом 5 μm при ускоряющем напряжении 20 КэВ при токе 5 нА.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При КЛ визуализации внутреннего строения кубоидов обнаружены неоднородности в форме лучей. В общем пространстве пирамид роста граней {100} по люминесцен-

ции проявляются неоднородности: три исходящих из одной точки луча (рис. 2, 3). Лучи видны на КЛ изображении поверхности целого кристалла 605-66 (рис. 2, *а, б*) и на КЛ изображении плоско-параллельной полированной пластины из кристалла 223-76 (рис. 3, *в–д*). Кристаллы с аналогичными секториальными неоднородностями и спектроскопическими особенностями ранее отмечены в трубке Орапа (Ботсвана) (Timmerman et al., 2018). Природа такого внутреннего строения в цитируемой работе не обсуждается.

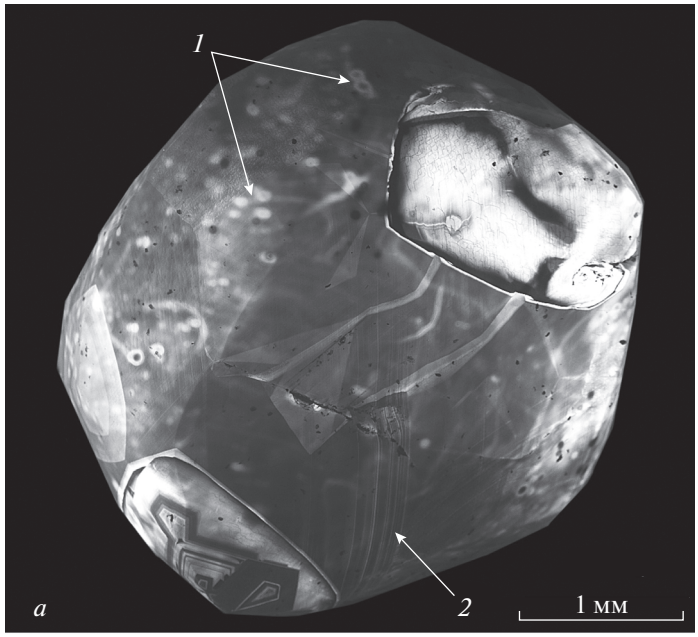
На поверхности кристалла 605-66 по люминесценции выявлены следующие особенности. На КЛ изображении (рис. 2, *а*) присутствуют следы постростовых воздействий. Постростовое облучение проявляется в виде ярких однородных пятен, а в случае большой дозы облучения в центре пятна появляется темная область (Vasilev et al., 2018). Также отчетливо видна люминесценция секущих весь кристалл слоев {111}, индуцированных пластической деформацией (Vasilev et al., 2019). На схеме (рис. 2, *б*) показаны основные ростовые неоднородности данного кристалла: 1) основной объем сформирован кубоидом; 2) на поверхности кристалла обнаружены 4 участка в форме лучей, исходящих из определенных точек в трех направлениях, а также несколько фрагментов таких лучей; 3) в трех участках наблюдаются светлые участки, по характерной зональности (Klepikov et al., 2020) соответствующие пирамидам роста граней {111}. Таким образом, на первом этапе формирования кристалла происходил совместный рост кубоида и лучей, а на последнем этапе происходило нарастание октаэдрических ступеней. При этом расположение участков с тремя лучами достаточно строго ориентировано относительно участков с октаэдрической зональностью.

На пластине кристалла 223-76 лучи проходят в объем кристалла, что видно в проходящем свете. На КЛ изображении (рис. 3, *в*, *г*) видно, что основная часть поверхности однородна, и есть три четко выделяющихся луча, исходящих из точки (очевидно, под углом 120°). В отраженном свете (рис. 3, *а*) видна незначительная неоднородность распределения желто-коричневой окраски. При сравнении изображения КЛ с изображением в отраженном свете (рис. 3, *а*, *в*) видно, что светлому участку соответствует крупный луч. В проходящем свете (рис. 3, *б*) выявляется множество микровключений, расположенных цепочками в направлении [111]. В пределах лучей микровключений намного меньше, что указывает на их ростовую природу.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Можно предположить несколько вариантов интерпретации выявленной секториальной неоднородности: 1) сечение двойникового сростка по {111}; 2) лучи являются секторами роста граней {111} в скелетных кристаллах; 3) лучи являются секторами роста граней {110}. Первый вариант был отклонен после исследования кристалла 223-76 методом EBSD. В кристалле не обнаружено двойниковых границ и разориентированных блоков. Второй вариант исключается благодаря тому, что сечение из трех лучей, исходящих из одной точки, для октаэдрических секторов в кубоиде должно проходить через центр кристалла и не может встречаться на поверхности кристалла сразу в нескольких участках.

Третий вариант рассматривается нами как наиболее вероятный. При совместном росте граней {110} и {100} могут возникать кристаллы, форма которых показана на схеме (рис. 4). Как видно, габитус кристаллов остается кубическим, а на месте ребер возникают грани ромбододекаэдра. Кристаллы такой формы описаны в аллювиальных россыпях северо-востока Сибирской платформы (Pavlushin et al., 2017) и среди микрокристаллов (Квасница и др, 1999). При сечении такого кристалла вблизи поверхности в направлении [111] будут наблюдаться секториальные неоднородности в виде лучей, исходящих из одной точки. В зависимости от относительной площади граней {110} и сечения картина неоднородностей будет меняться в широких пределах (рис. 4, *б–в*).



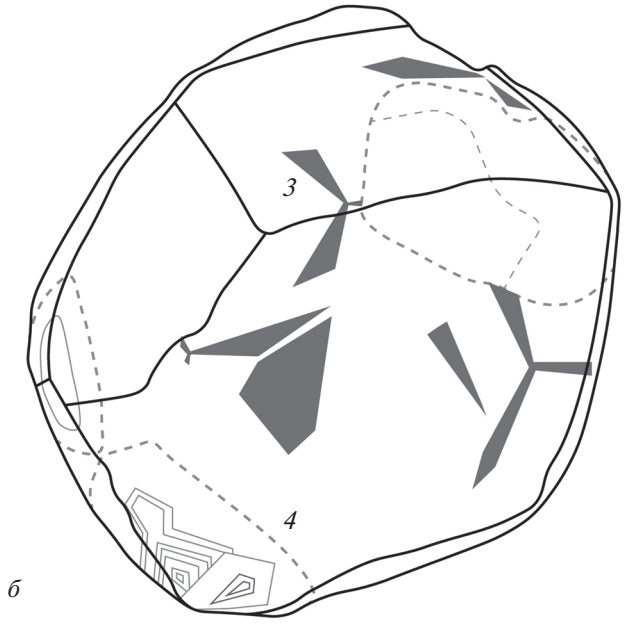


Рис. 2. КЛ изображение (*а*) кристалла 605-66 и схема (*б*) поверхностных неоднородностей. На КЛ поверхности кристалла (*а*) проявляются: следы природного облучения в виде светлых изометричных пятен (*1*); плоскости пластической деформации в виде ярких слоев {111}, секущих весь кристалл (*2*). На схеме (*б*) серым показаны выделяющиеся в КЛ лучи (*3*) и их фрагменты. Пунктиром обведены (*4*) три области тангенциального роста граней {111}.

Fig. 2. CL image of crystal 605-66 (*а*) and the scheme of superficial heterogeneities (*б*). Light isometric spots of natural irradiation (*1*) and bright {111} layers of plastic deformation, crossing the entire crystal (*2*) appears on its CL surface. Growth heterogeneities in form of rays (*3*) and their fragments (gray) are visible on the scheme (*б*). Dotted line (*4*) delineates three areas of tangential regenerative growth of {111} faces.

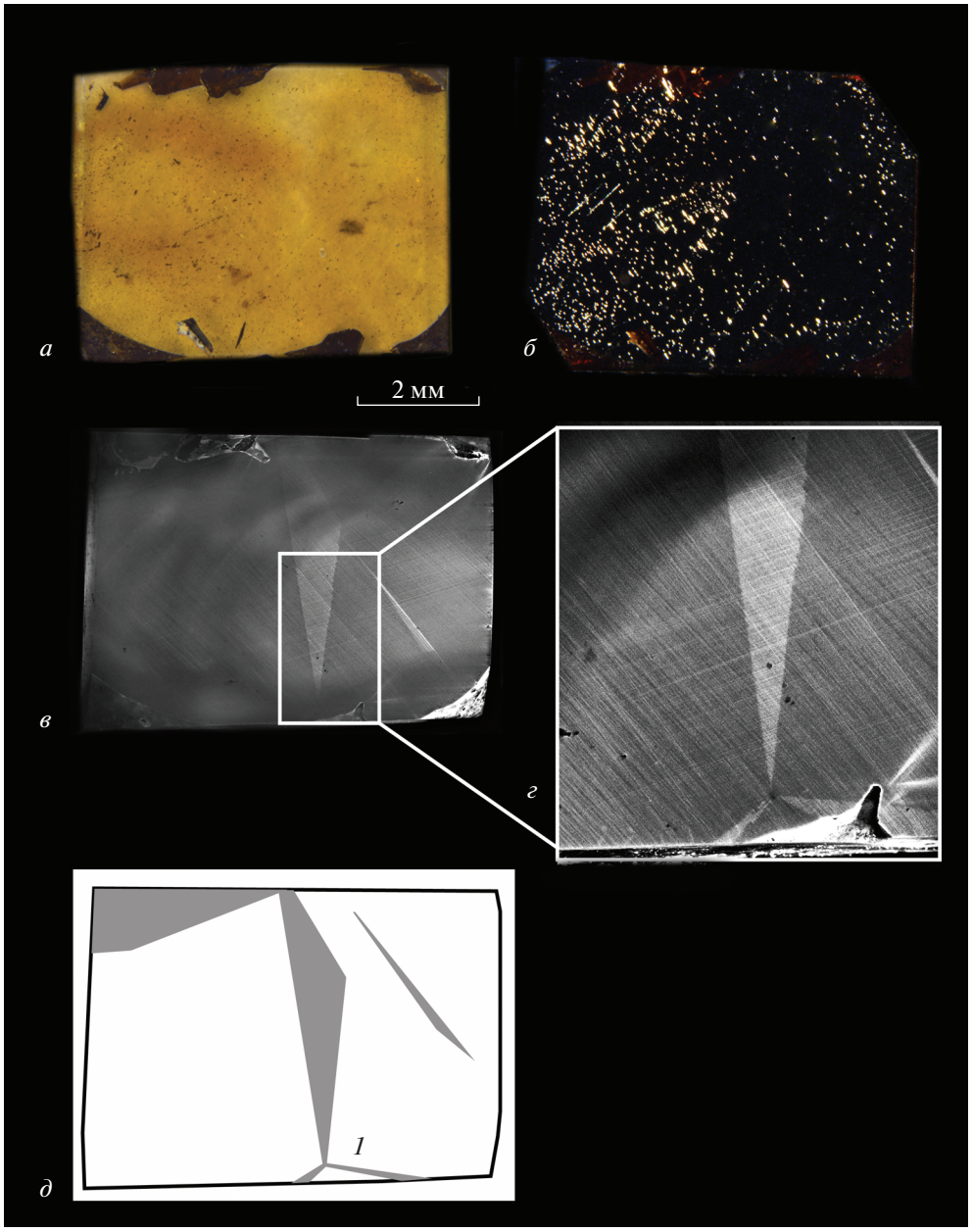


Рис. 3. Изображения пластины кристалла 223-76: (*а*) в отраженном свете; (*б*) темнопольное в проходящем свете; (*в*) монохромная КЛ; (*г*) увеличенный фрагмент монохромной КЛ; (*д*) схема выявляемых ростовых неоднородностей в виде лучей (*1*). На поверхности кристалла проявляются следы пластической деформации в виде ярких слоев {111}, секущих весь кристалл.

Fig. 3. Image of plate from the 223-76 crystal: (*a*) in reflected light; (*б*) dark field in transmitted light; (*в*) monochrome CL; (*г*) an enlarged fragment of the monochrome CL; (*д*) scheme of revealed growth heterogeneities in form of rays (*1*). Bright layers {111} – traces of plastic deformation crossing the entire crystal appear on its surface.

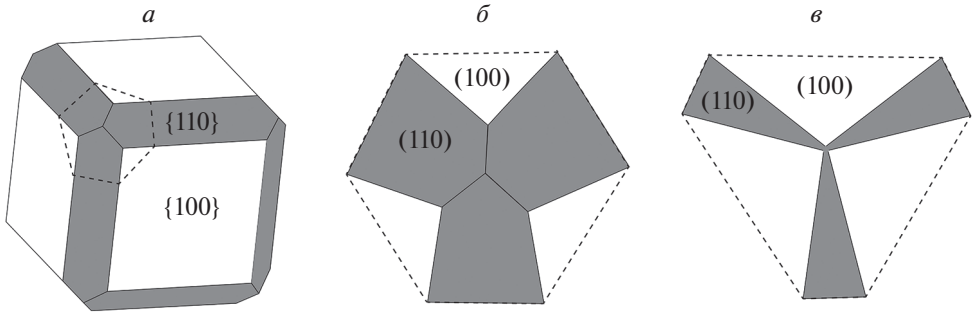


Рис. 4. Схема ограничения кристалла с совместным ростом граней {110} и {100} (*а*) и сечения в плоскости {111} (*б, в*) при разном соотношении площадей соответствующих граней. Пунктирная линия маркирует сечение (*б*, *в*).
Fig. 4. Scheme of the crystal facing with mixed-habit growth of faces {110} and {100} (*а*) and sections in the {111} plane (*б*, *в*) with different ratios of areas of corresponding faces. The dotted line marks the section (*б*, *в*).

При такой интерпретации можно объяснить множественность фигур в виде трех лучей (рис 4, *б*) на поверхности кристалла 605-66. В кристаллах с такой морфологией 8 вершин с симметрией L3, каждой из которых может соответствовать обсуждаемая фигура. Изучаемый кристалл сильно растворен и не имеет реликтов граней куба, а распределение пирамид роста в объеме кристаллов алмаза очень неравномерно, поэтому на КЛ изображении поверхности проявляются сразу 4 фрагмента с симметрией L3.

В синтетических кристаллах алмаза развитие граней {110} наблюдается при наличии небольшого количества H_2O в расплаве (Kanda et al., 1982). Сонахождение граней {110}, {100} и {111} наблюдается при использовании в качестве катализатора Fe–Co–Ni расплавов. Появление и развитие граней {110} и {113} связано с металлами, которые имеют более сильное сродство к азоту, чем Ni (Kanda et al., 1989). Изученные кристаллы характеризуются низкой концентрацией азота и наличием систем ФЛ, в структуру которых входит Ni, что, возможно, говорит о присутствии в глубинных флюидах элементов, аналогичных тем, которые участвуют в процессах алмазообразования, воспроизводимых в лаборатории.

Таким образом, полученные результаты показывают возможность совместного роста пирамид граней {110} и {100} в природном алмазе и возможность сосуществования в одном кристалле слоев роста граней {110}, {100} и {111}. Слои роста граней {111} возникли на последнем этапе роста кристалла и соответствуют быстрому регенерационному переогранению с образованием переходных форм ромбододекаэдр–октаэдр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бескрованов В.В. Онтогения алмаза. Новосибирск: Изд-во Наука, **2000**. 264 с.

Квасница В.Н., Зинчук Н.Н., Копиль В.И. Типоморфизм микрокристаллов алмаза. М.: Недра, **1999**. 224 с.

Клепиков И.В., Васильев Е.А., Антонов А.В. Особенности дефектно-примесного состава кристаллов алмаза с пирамидами роста ⟨100⟩ из россыпей Красновишерского района // ЗРМО. **2019**. № 5. С. 59–73.

Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, **1955**. 510 с.

Миронов В.П. Эволюция формы природного алмаза в процессе роста / Алмазы. М.: ЭС-ТЭ пресс, **2001**. С. 97–100.

Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, **1984**. 170 с.

Ракин В.И. Морфология алмазов уральского типа. Екатеринбург: Рио УрО РАН, **2013**. 396 с.

Growth of Pyramids {110} in Natural Diamonds

I. V. Klepikov[a, *], E. A. Vasilev[b], A. V. Antonov[a], and A. A. Kudryavtsev[c]

[a] *VSEGEI, Saint Petersburg, Russia*

[b] *Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*

[c] *TESCAN Ltd, Saint Petersburg, Russia*

**e-mail: klepikov_igor@mail.ru*

The internal structure of two significantly dissolved cuboid diamond from placers of the Krasnovisherskiy region (the Urals) has been studied. This internal structure was visualized both from the crystal surface and on a plane-parallel polished plate. There were revealed heterogeneities in sectorial shape: areas appear as three rays emanating from one point in the general space of the growth pyramid of {100} faces. It is shown that these areas belong to growth pyramids of {110} faces. Thus, there was revealed the possibility of coexisting growth layers of {110}, {100} and {111} faces in one natural crystal.

Keywords: diamond, internal structure, sectorial structure, growth pyramids of {110} faces, cuboid

REFERENCES

Beskrovanov V.V. Ontogeny of diamonds. Novosibirsk: Nauka, **2000**. 165 p. (*in Russian*).

Kanda H., Ohsawa T., Fukunaga O., Sunagawa I. Effect of solvent metals upon the morphology of synthetic diamonds. *J. Cryst. Growth*. **1989.** Vol. 74. P. 115–124.

Kanda H., Setaka N., Ohsawa T. Fukunaga O. Growth condition for the dodecahedral form of synthetic diamonds. *J. Cryst. Growth*. **1982.** Vol. 60. P. 441–444.

Klepikov I.V., Vasilev E.A., Antonov A.V. Growth nature of negative relief forms of diamonds from Ural placer deposits. *Crystallogr. Rep.* **2020**. Vol. 65. N 2. P. 300–306.

Klepikov I.V., Vasilev E.A., Antonov A.V. Defect and admixture composition of diamond crystals with growth pyramids ⟨100⟩ from placers of the Krasnovishersky district, the Urals. *Zapiski RMO* (*Proc. Russian Miner. Soc.*). **2019**. N 5. P. 59–73.

Kukharenko A.A. The Ural diamonds. Moscow: Gosgeoltehizdat, **1955**. 516 p. (*in Russian*).

Kvasnitsa V.N. Zintchouk N.N., Koptil V.I. Tipomorphism of diamond microcrystals. Moscow: Nedra, **1999**. 224 p.

Machado W.G., Moore M., Woods G.S. On the dodecahedral growth of coated diamonds. *J. Cryst. Growth*. **1985**. Vol. 71. P. 718–727.

Mironov V.P. Evolution of morphology of natural diamond during growth. In: *Diamonds*. Moscow: M.: AS-TA Press, **2001**. P. 97–100 (*in Russian*).

Orlov Yu.L. Mineralogy of diamond. Moscow: Nauka, **1973**. 221 p. (*in Russian*).

Pavlushin A.D. Pirogovskaya K., Zedgenizov D.A. Crystal morphological evolution of growth and dissolution of curve-faced cubic diamonds from placers of the Anabar diamondiferous region. *Geochem. Int.* **2017**.Vol. 55. N 17. P. 1193–1203.

Rakin V.I. Morphology of Ural-Type diamonds. Yekaterinburg: UrB RAS, **2013** (*in Russian*).

Rakovan J., Gaillou E., Post J.E., Jaszczak J.A., Betts J.H. Optically sector-zoned (star) diamonds from Zimbabwe. *Rocks and Minerals*. **2014**. Vol. 89. N 2. P. 173–178.

Timmerman S. Formation of unusual yellow Orapa diamonds. *Miner. Petrol.* **2018**. Vol. 112. P. 209–218.

Vasilev E.A., Kozlov A.V., Petrovsky V.A. Volume and surface distribution of radiation defect in natural diamonds. *J. Mining Inst.* **2018**. Vol. 230. P 107–115.

Vasilev E.A., Klepikov I.V., Kozlov A.V., Antonov A.V. The nature of the elongated form of diamond crystals from Urals placers. *J. Mining Inst.* **2019**. Vol. 239. P. 492–496.

Welbourn C.M., Cooper M., Spear P.M. De Beers natural versus synthetic diamond verification instruments. *Gems. Gemol.* **1996**. Vol. 32. N 3. P. 156–169.