

## Возможно ли преобразование формы включений в алмазах?

В.П.АФАНАСЬЕВ (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН); 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 3),

С.С.УГАПЬЕВА (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАНР); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39)

Предложена гипотеза, объясняющая возможность преобразования формы включений минералов диффузионным путем внутри алмаза в глубинных условиях. Она опирается на натурные наблюдения и требует дальнейшего развития. Исследования в данном направлении позволят лучше понять генезис включений, в частности, октаэдрическую форму многих, в том числе полиминеральных включений.

*Ключевые слова:* алмаз, включение, морфология, диффузия.

Афанасьев Валентин Петрович  
Угапьева Саргылана Семеновна



avp-diamond@mail.ru  
sargylana-ugapeva@yandex.ru

## Transformation of the inclusions shape in diamonds: is it possible?

V.P.AFANASIEV, S.S.UGAPIEVA

The hypothesis that explains the possibility of shape transformation of mineral inclusions by diffusion inside a diamond in deep conditions is proposed. It relies on field observations and requires further development. Research in this direction will allow a better understanding of the genesis of inclusions, in particular, octahedral shape of many inclusions including polymineral ones.

*Key words:* diamond, inclusion, morphology, diffusion.

Включения в глубинных минералах из кимберлитов служат источником важнейшей генетической информации. Включения рассматриваются как протогенетические, сингенетические и эпигенетические. Первые встречаются редко и их сложно диагностировать. Вторые представлены широко и рассматриваются как основной источник информации о минеральном парагенезисе и условиях его формирования. Третьи также широко распространены и представлены главным образом структурами распада твердого раствора, отражающими эволюцию минерала в связи со сменой условий существования (поздние эпигенетические включения, связанные с проникновением вещества по трещинам здесь во внимание не принимаются). Однако реально не всегда удается надежно определить генезис включения. Как показано в работе [1], игольчатые включения, являющиеся результатом распада твердого раствора пиропов, могут преобразовывать свою форму и терять морфологические признаки распадного происхождения, тогда их легко принять за сингенетические. У пикроильменита ламелли распада твердого раствора, представленные шпинелевой фазой, могут в результате преобразования морфологии давать октаэдры хромита, и тогда возникает возможность ошибки – рассмотрение

парадоксального парагенезиса «пикроильменит – хромит» [1].

Преобразование формы включений в глубинных минералах осуществляется через механизмы диффузии при высокой температуре и давлении [1, 2]. Одновременно уничтожаются признаки ростовой зональности: у глубинных минералов, связанных происхождением с мантийными породами, ростовая зональность отсутствует, что связано, помимо внутриминеральных диффузионных процессов, с процессами глубинного метасоматоза, модифицирующего составы минералов. В целом ассоциации глубинных минералов из кимберлитов показывают высокую лабильность структуры и приспособляемость к меняющимся условиям среды [1].

Единственным исключением служит алмаз. У любого кристалла алмаза прекрасно выражена зональность, хорошо видимая, например, в картинах катодолюминесценции или структурного травления, что наводит на мысль о высокой консервативности его структуры. Вместе с тем алмаз не мертвая структура, ему также свойственны внутренние диффузионные процессы, выраженные в агрегировании структурной примеси азота в парные конфигурации (центр А), в тетраэдрические конфигурации (центр В1), имеются иные структурные

примеси. Отжиг алмазов в условиях высокого давления и температуры возбуждает диффузионные процессы и перераспределение примесных центров [6, 9, 12].

Диффузионные процессы не могут не затрагивать и вещество включений в алмазах. Включения жестко изолированы в алмазной матрице и все процессы, связанные с ними, будут иметь изохимический характер. По аналогии с другими глубинными минералами можно предположить, что движущей силой преобразования включений в алмазах будут диффузионные процессы, приводящие к изменению морфологии включений. Однако изменение формы включения требует одновременного изменения распределения вещества алмаза вокруг включения. И здесь возникает психологический барьер: при наличии четко выраженной зональности представляется невероятной «текучесть» вещества алмаза в районе включений.

Первыми на возможность преобразования морфологии включений в алмазах указали Б.А.Мальков и А.М.Асхабов [5], предположившие, что октаэдрическая огранка включений различных минералов в алмазах [3, 4] может быть результатом диффузионного преобразования исходной формы включений в соответствии со структурой алмаза благодаря повышенной диффузионной активности пограничной зоны «алмаз–включение». Предполагается, что такой диффузии способствовали высокие температуры в области алмазообразования и, вероятно, присутствие включений газовой фазы в алмазах, упомянутые в работах [10, 11]. Необходимо признать, что В.П.Афанасьевым в личной беседе с Б.А.Мальковым в свое время была отвергнута возмож-

ность преобразования формы включений исходя из представления о консерватизме структуры алмаза. Однако позднее С.С.Угапьева нашла включения в алмазах из кимберлитовой трубки Айхал и россыпи р. Эбелях [7, 8], морфология которых с высокой долей вероятности указывает на возможность изменения их морфологии внутри алмаза. В связи с этим авторы настоящей статьи попытались понять возможность этих процессов с учетом особенностей структуры алмаза, опираясь главным образом на изучение морфологии включений.

**Результаты наблюдений.** В алмазе из россыпей р. Эбелях (кристалл 6034) присутствует силикатное включение (оливин?) с пережимом в средней части (рис. 1, А). Это типичная картина начальной стадии распада удлиненных включений на ряд фрагментов с последующей их изометризацией, описанная Я.Е.Гегузиным [2]. В пиропе из кимберлита авторами найдены аналогичные включения с пережимами (см. рис. 1, Б) [1]. Вокруг включения в алмазе (см. рис. 1, А) видны мелкие включения, но на некотором удалении от крупного. Это может быть следствием коалесценции (слияния) мелких включений в крупное, из-за чего пространство вокруг крупного включения очищается, а мелкие включения остаются лишь на удалении. Аналогичную картину авторы настоящей публикации наблюдали для пикроильменита с распадом твердого раствора из трубки Зимняя Верхнемунского кимберлитового поля [1].

В алмазе 2004 из трубки Айхал на удлиненном включении оливина наблюдаются пережимы, являющиеся, вероятно, начальной стадией распада включения на фрагменты с последующей их изометризацией (рис. 2).

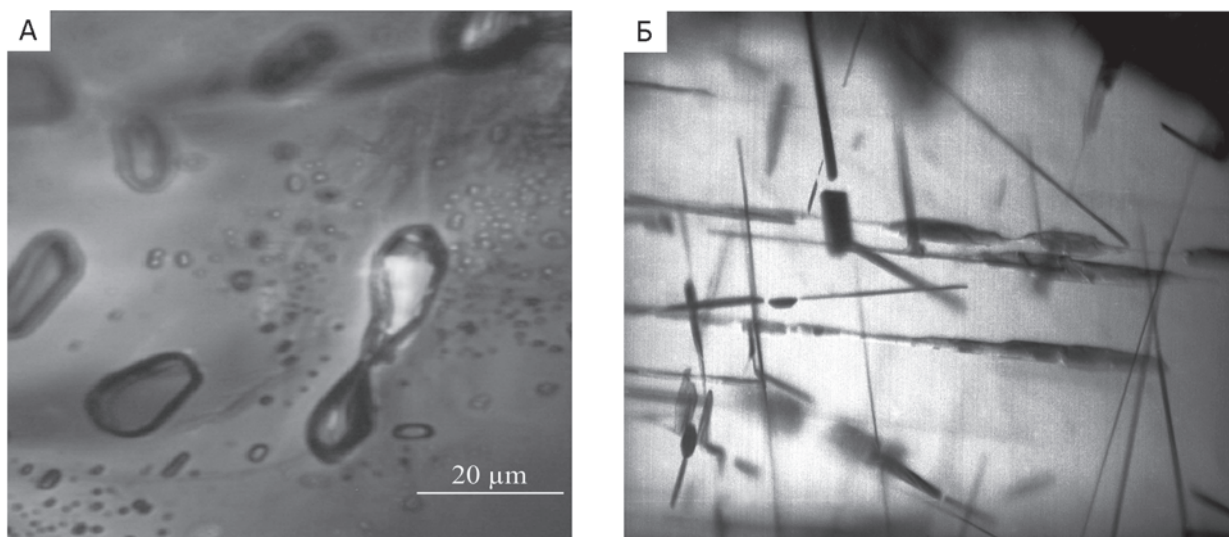


Рис. 1. Начальная стадия распада удлиненных включений:

А – силикатное включение (оливин?) с пережимом в алмазе (кристалл 6034); Б – для сравнения: аналогичные пережимы на игольчатом включении в пиропе

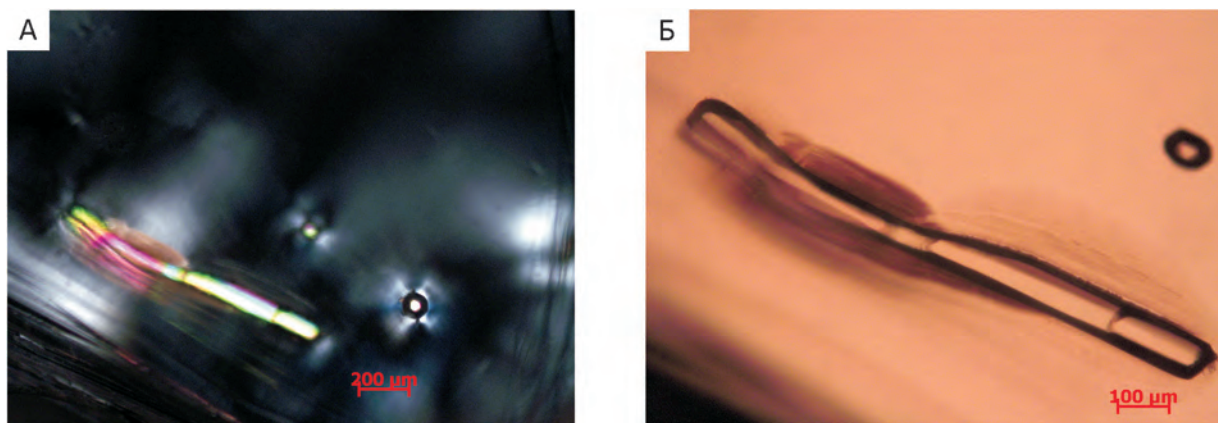


Рис. 2. Кристалл 2004 из трубки Айхал. Удлиненное включение оливина с пережимами:

фото при скрещенных николях (А) и в проходящем свете (Б)

В алмазе 2114 из трубки Айхал можно видеть практически завершившийся процесс распада удлиненного включения с изометризацией фрагментов (рис. 3, А–Б). Аналогичная картина наблюдается в пиропе (см. рис. 3, В) [1].

На рис. 4 приведен пример цепочки включений, развитых по плоскости двойникового шпинелевого двойника (алмаз 3156 из трубки Удачная). Изогнутая форма цепочки связана, вероятно, с формированием его в плоскости двойникового с высокой степенью дефектности.

Здесь показаны достаточно явные примеры преобразования морфологии включений. Однако при специальном изучении включений такие признаки можно найти в значительном количестве случаев.

**Обсуждение результатов наблюдений.** В данной работе представлено только несколько примеров, которые можно интерпретировать с точки зрения диффузи-

онного преобразования морфологии включений внутри алмаза. Однако реально разнообразные минеральные включения в алмазах часто показывают специфические морфологические признаки, свидетельствующие о возможности преобразования их морфологии. Лишь упомянутый психологический барьер мешает обратить на них внимание с этой точки зрения.

Ключевым моментом является понимание возможности диффузионного массопереноса вещества алмаза вокруг включения. Выше упоминалось, что сохранение ростовой зональности – свидетельство консерватизма структуры алмаза. Ростовая зональность формируется при смене параметров роста и фиксируется достаточно крупными линейными и объемными нарушениями структуры алмаза, которые хорошо выражаются в картине структурного травления. Возможно, такие дефекты достаточно устойчивы. Однако широко проявлены

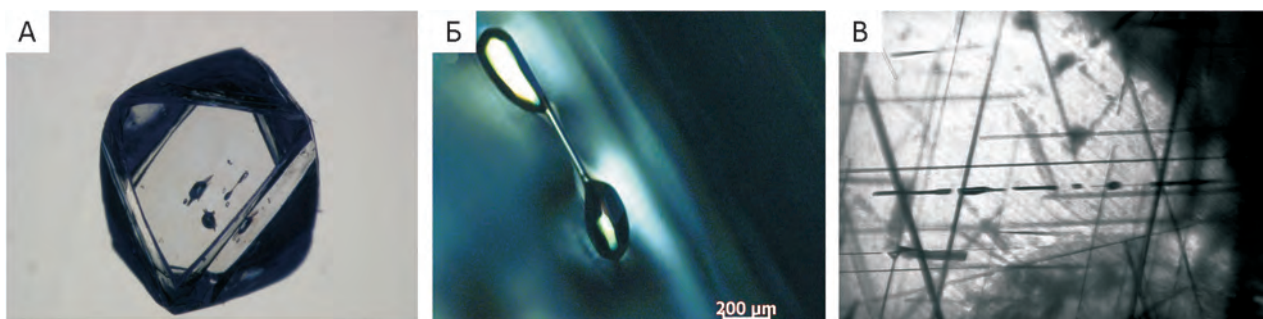


Рис. 3. Кристалл 2114 из трубки Айхал. Практически завершённый распад удлиненного включения оливина (?):

А – общий вид кристалла с включением; Б – фрагменты распавшегося включения; В – для сравнения: фрагментированное игольчатое включение рудного минерала в пиропе

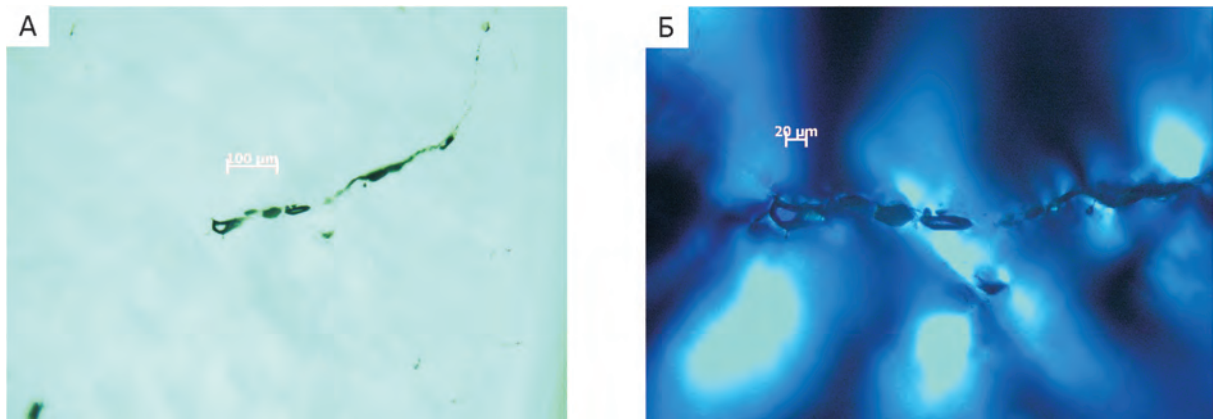


Рис. 4. Кристалл 3156. Распавшееся включение в плоскости двойникования шпинелевого двойника:

фото в проходящем свете (А) и при скрещенных николях (Б)

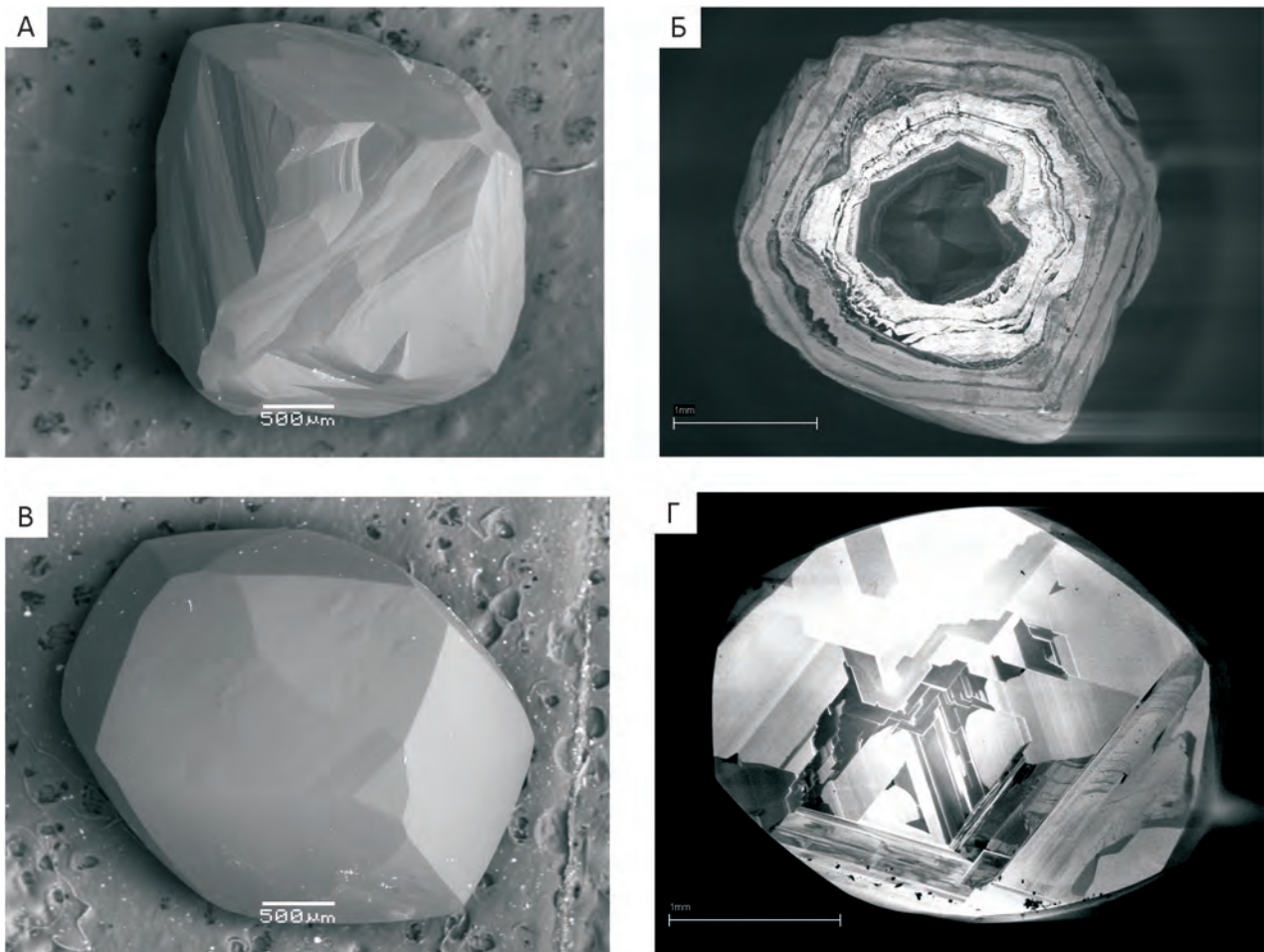


Рис. 5. Картина катодолюминесценции кристаллов алмаза из района Кванго (Конго):

кристалл с ростовой зональностью до (А) и после (Б) подшлифовки; кристалл с мозаичным внутренним строением до (В) и после (Г) подшлифовки

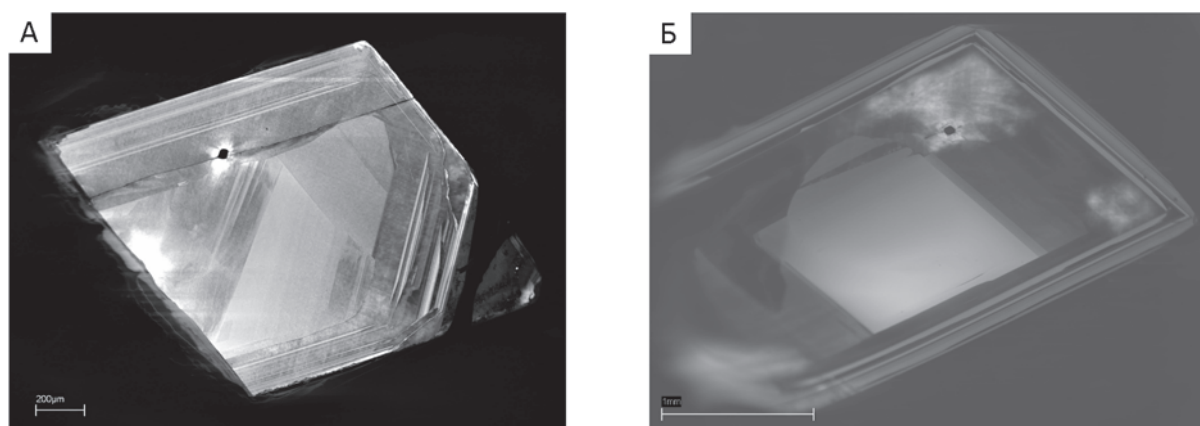


Рис. 6. Картина катодолуминесценции алмаза с включениями оливина:

кристалл: А – 2004 и Б – 2114

диффузионные процессы, обуславливающие перераспределение и агрегирование структурной примеси азота, а также других структурных примесей [6, 9, 12]. Результаты этих процессов могут быть не выражены в картине структурного травления, но хорошо видны в картине катодолуминесценции. На рис. 5 показаны два алмаза из россыпи района Кванго (Конго): первый кристалл с хорошо выраженной ростовой зональностью (см. рис. 5, А–Б), второй – с мозаичным внутренним строением, которое мало похоже на ростовую зональность, но может отражать особенности распределения агрегированных форм структурной примеси азота (см. рис. 5, В–Г).

Таким образом, диффузионные процессы в алмазах происходят, поэтому можно предполагать, что вещество алмаза хотя бы в масштабах ближнего порядка перемещается. Соответственно теоретически допустима возможность перераспределения вещества алмаза вокруг включения с одновременным изменением морфологии включения. Этому способствует высокая дефектность и проницаемость межфазовой границы «алмаз–включение». Ростовая зональность как достаточно устойчивая может сохраняться, тогда как в однородных зонах, в которых находятся включения, последние могут менять морфологию через диффузионные процессы. Этому способствует высокая температура и достаточно длительное время отжига, на что обращено внимание в работе [5]. В картинах катодолуминесценции вокруг включений, выведенных на поверхность, всегда видны бесструктурные ореолы (рис. 6). Пока непонятно, отражают они поле напряжений, или это действительно бесструктурная зона, в которой зональность разрушена диффузионными процессами.

Непредвзятое отношение к алмазу показывает, что этот минерал ведет себя как иные минералы и подчиня-

ется общим законам поведения минералов. Можно попытаться сопоставить поведение включений в алмазах с поведением включений в гранатах из кимберлитов, описанном в работе [1]. В ней охарактеризован процесс изменения формы включений, образовавшихся в процессе распада твердого раствора граната. Вначале образуются плоские скопления эмульсиевидных, аморфных выделений изотропной фазы неопределенной минеральной принадлежности; скопления ориентированы по ромбододекаэдру. Далее начинается слияние выделений, образование мелких, достаточно четко индивидуализированных многочисленных включений новой фазы, которые, в свою очередь, в процессе коалесценции дают все разнообразие игольчатых включений. Дальнейшая эволюция идет по пути разрыва игл на отрезки, стягивания, изометризации их, повторной коалесценции и образования крупных изометричных включений, то есть процесс как бы повторяется, но уже на более высоком уровне. Такая направленность обусловлена снижением удельной поверхности включений по мере их слияния и в целом снижением упругой энергии, связанной с ними. В конечном счете, в результате длительной эволюции формы включения могут потерять первичные признаки. Авторы настоящей статьи воспринимают их как данность и относят к сингенетическим включениям. Все процессы преобразования включений минералов осуществляются в твердой фазе и теоретически описаны Я.Е.Гегузиным [2].

В заключение отметим, что предложена гипотеза, объясняющая возможность преобразования формы включений диффузионным путем внутри алмаза в глубинных условиях. Она опирается на натурные наблюдения и требует дальнейшего специализированного изучения различных включений с данной точки зрения. Исследования в данном направлении

позволят лучше понять генезис включений, в частности, октаэдрическую форму многих, в том числе полиминеральных, включений, о чем писали Б.А.Мальков и А.М.Асхабов [5].

Работа выполнена по планам НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2016-0003) и ИГМ СО РАН (№ 0330-2016-0006).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П.* Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск: Филиал «Гео» Изд-ва СО РАН, Издательский дом «Манускрипт», 2001.
2. *Гегузин Я.Е.* Механизмы и кинетика преобразования формы включений в кристаллах // Проблемы современной кристаллографии. Сборник статей памяти академика А.В.Шубникова. – М.: Наука, 1975. С. 110–127.
3. *Кристаллические* включения с октаэдрической огранкой в алмазах / Н.В.Соболев, А.И.Боткунов, И.Т.Бакуменко, В.С.Соболев // Докл. АН СССР. 1972. Т. 204. № 1. С. 192–195.
4. *Кристалломорфология* включений граната в природных алмазах / З.В.Бартошинский, Э.С.Ефимова, В.П.Жихарева, Н.В.Соболев // Геология и геофизика. 1980. № 3. С. 12–22.
5. *Мальков Б.А., Асхабов А.М.* Кристаллические включения с октаэдрической огранкой (отрицательные кристаллы) – свидетельства ксеногенного происхождения алмазов в кимберлитах // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 3. С. 695–699.
6. *Природные и синтетические алмазы* // Г.Б.Бокий, Г.Н.Безруков, Ю.А.Клюев и др. – М.: Наука, 1986.
7. *Сравнительная характеристика алмазов с включениями оливина из россыпи Эбелях и кимберлитовых тел Якутской алмазоносной провинции* / С.С.Угайева, А.Д.Павлушин, С.В.Горайнов и др. // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468. № 1. С. 1–5.
8. *Угайева С.С., Павлушин А.Д., Горайнов С.В.* Типоморфные характеристики кристаллов алмаза с включениями оливина из россыпи Эбелях и кимберлитовых тел Якутской алмазоносной провинции // Наука и образование. 2015. 2(78). С. 28–35.
9. *Ченуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М.* Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. – Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1997.
10. *Giardini A.A., Melton C. E.* Experimental results and theoretical interpretation of gaseous inclusions found in Arkansas natural diamonds // American Mineralogist. 1975. Vol. 60. Pp. 413–417.
11. *Melton C.E., Giardini A.A.* Experimental evidence that oxygen in principal impurity in natural diamonds // Nature. 1976. Vol. 263. № 5575. Pp. 309–310.
12. *Zaitsev A.M.* Optical Properties of Diamond. Data Handbook. – Springer, 2000.