



УДК 549.057(549.211)

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.41>

## Рост алмаза на импактном лонсдейлитсодержащем алмазе Попигайской астроблемы

З. А. Карпович, Е. И. Жимулев, А. И. Чепуров

*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Изучение Попигайской астроблемы представляет большой научный и практический интерес, поскольку в ней сосредоточены огромные запасы алмазов с необычными свойствами. С целью исследования взаимоотношений лонсдейлитсодержащих импактных алмазов с новообразованным алмазом было проведено экспериментальное изучение особенностей нарастания алмаза в системе Fe-Ni-C на лонсдейлитсодержащие фрагменты в статических условиях при давлении 5,5 ГПа и 1450 °С. В результате установлено, что новообразованные кристаллы представлены кубической фазой, при этом лонсдейлит в затравочных кристаллах сохранился и соотношение лонсдейлит/алмаз не изменилось. Отличием роста кристаллов на затравках импактных алмазов от роста на монокристаллической затравке алмаза являлось то, что зарождение кристаллов начиналось из разных точек затравки импактного алмаза. Наблюдался многоглавый рост, и в результате образовывался сrostок кристаллов алмаза.

**Ключевые слова:** импактные алмазы, лонсдейлит, высокое давление и температура, эксперимент.

**Для цитирования:** Карпович З. А., Жимулев Е. И., Чепуров А. И. Рост алмаза на импактном лонсдейлитсодержащем алмазе Попигайской астроблемы // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 38. С. 41–53. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.41>

### Введение

Изучение Попигайской астроблемы, открытой в 1971 г. В. Л. Масайтисом, представляет большой научный и практический интерес, поскольку она содержит огромные запасы алмазов с необычными свойствами. В импактиках Попигайской астроблемы алмаз (кубическая фаза углерода с 3С-структурой; пространственная группа  $Fd\bar{3}m$ ) и лонсдейлит (гексагональная фаза углерода с 2H-структурой; пространственная группа  $P6_3/mmc$ ) находятся во взаимном срастании. При этом до сих пор остается открытым вопрос: что такое лонсдейлит в таких срастаниях? На основании экспериментальных исследований при сверхвысоких давлениях [Nanosecond formation of diamond ... , 2016; Nanocrystalline hexagonal diamond ... , 2016] предполагается образование лонсдейлита как самостоятельной фазы и в других объектах метеоритного происхождения [Bundy, Kasper, 1967; Frondel, Marvin, 1967]. С другой стороны, лонсдейлит, возможно, не является самостоятельной фазой, а представляет собой дефектную структуру алмаза при твердофазовом превращении из графита при сверхвысоких давлениях за чрезвычайно короткое

время (микросекунды) [Сохор, Футергендлер, 1974; Lonsdaleite is faulted ... , 2014]. Лонсдейлит в незначительных количествах почти всегда присутствует в любых алмазах в виде дефектов упаковки, кристаллическая структура которых соответствует гексагональной решетке. Полагают, что лонсдейлит является проявлением ошибок упаковки в структуре кубического алмаза и образовался как неравновесный продукт при ультравысоких  $P$ - $T$ -параметрах за чрезвычайно короткое время взрыва из графита, причем лонсдейлит и кубический алмаз возникли одновременно [Сохор, Футергендлер, 1974]. Импактные лонсдейлитсодержащие алмазы проявляют черты, совпадающие с двойниками и дефектами упаковки кубического алмаза на наноуровне. Было показано, что образцы, обладающие характерными дифракционными особенностями лонсдейлита, демонстрируют интенсивное двойникование алмаза и дефекты упаковки, разделяющие индивиды на субнанометровые домены [Lonsdaleite is faulted ... , 2014].

Общепризнано, что образование импактных алмазов происходило в ходе катастрофического явления – масштабного взрыва на поверхности Земли в результате падения крупного метеорита. Импактное событие привело к трансформации кристаллов графита, содержавшихся в гнейсах – породах мишени, в алмазы, т. е. алмазы астроблемы являются параморфозами [Masaitis, 2013]. Изучение импактных алмазов Попигайской астроблемы проводили многие исследователи [Сохор, Футергендлер, 1974; Структура и свойства лонсдейлитсодержащих ... , 1985; Ударно-метаморфогенные минералы ... , 1992; Квасница, Зинчук, Коптиль, 1999; First-principles, UV Raman ... , 2011; Masaitis, 2013; Raman identification of lonsdeilite ... , 2014; Graphite in rocks of the ... , 2019, Якутиты – импактные алмазы ... , 2019]. Были изучены многие особенности этих алмазов, включая макро- и микроморфологию, внутреннее строение, изотопный состав, а также геохимические и петрологические особенности вмещающих пород, геологическое строение астроблемы. В частности, на некоторых импактных алмазах обнаружено нарастание ограненных кристаллов кубической фазы, что указывает на сохранение высокого давления в течение некоторого времени после прохождения фронта ударной волны [Ударно-метаморфогенные минералы ... , 1992]. Были проведены многочисленные экспериментальные работы по синтезу лонсдейлита как самостоятельной фазы, но пока ясный ответ на этот вопрос не получен. По данным просвечивающей электронной микроскопии установлено детальное строение природных импактных алмазов, причем отмечают интенсивное двойникование наноиндивидов [Kvasnytsya, Wirth, 2013]. Считают, что лонсдейлит даже тверже алмаза [Harder than Diamond ... , 2009]. Уникальные свойства лонсдейлита не были показаны экспериментально, так как не была выделена или синтезирована чистая фаза лонсдейлита и во всех случаях продукт содержал алмаз. В связи с этим возникает следующий вопрос: может ли алмаз в условиях статических давлений нарастать на лонсдейлитсодержащие фрагменты импактных алмазов и как это отражается на морфологии растущих кристаллов?

С целью исследования взаимоотношений лонсдейлитсодержащих импактных алмазов Попигайской астроблемы с алмазом было проведено экспериментальное изучение особенностей нарастания алмаза на лонсдейлитсодержащие фрагменты в статических условиях в системе Fe-Ni-C при 5,5 ГПа и 1450 °С.

### Методика исследования

Эксперименты были проведены на многопуансонном аппарате высокого давления «разрезная сфера», разработанном в Институте геологии и минералогии СО РАН в соответствии с государственным заданием. Ячейка изготовлена в форме параллелепипеда размером 23×20,5 мм с усеченными ребрами прессованием порошков тугоплавких оксидов ZrO<sub>2</sub> и CaO. В центре ячейки в цилиндрической отверстии устанавливали графитовый нагреватель в форме тонкостенной трубки (0,5 мм) с внутренним диаметром 10 мм. Графитовые и молибденовые диски, установленные сверху и снизу нагревателя, использовали в качестве электрических контактов. Температуру в ячейке высокого давления измеряли с помощью Pt-Rh (30/6) термопары. Точность измерения температуры термопарой ±2 °С, но точность определения температуры в центре реакционного объема ячейки ±25 °С. Температуру в ячейке поднимали со скоростью около 200 °С/мин. Давление калибровали предварительно с построением зависимости между давлением в ячейке и давлением масла в гидравлической системе аппарата. Давление калибровали с использованием PbSe, Ba и Bi, размещенных на гранях ячейки. Коррекцию на возрастание давления при нагревании производили в соответствии с известным положением линии равновесия графит – алмаз при 5 ГПа и 1400 °С [Kennedy, Kennedy, 1976; Day, 2012]. Давление поднимали в каждом опыте со скоростью 0,2 ГПа/мин, и точность определения давления составляла ±0,2 ГПа.

В качестве затравочных кристаллов, на которые наращивали алмаз, использовали обломки кристаллов (фрагменты) импактных алмазов Попигайской астроблемы (рис. 1). Затравки для проведения экспериментов представляли собой светлые, прозрачные фрагменты кристаллов лонсдейлитсодержащих паракристаллов импактных алмазов Попигайской астроблемы размером 0,1–0,3 мм.

Как правило, затравочные кристаллы имели пластинчатый облик и были уплощенными по базальной плоскости исходного графита (1000), как описано в [Kvasnytsya, Wirth, 2013]. Затравки располагали таким образом, чтобы рост алмаза происходил по плоскости пинакоида, поскольку плоскость графита (0001), по которому сформировались параморфозы алмаза, как полагают, соответствует плоскости (111) алмаза [Там же]. Перед опытом затравки исследовали с помощью КР-спектроскопии для определения содержания лонсдейлита. По соотношению интенсивности полос КР лонсдейлита и алмаза [Morphology of Crystals Growing ... , 2021] установлено, что содержание лонсдейлита в затравках варьировало от 0 до 25 %. На подложке из смеси ZrO и CsCl, расположенной в нижней части кристаллизационного объема, помещали 9 затравок. Пластины импактного алмаза запрессовыва-

лись в подложку ZrO и CsCl, так что края пластин находились в веществе подложки и оказывались изолированными от Fe-Ni сплава (36 мас. % Ni). Сверху затравки покрывали кусочками Pt фольги с целью защиты затравок от растворения в металлическом сплаве. Выше располагали диск из Fe-Ni сплава (36 мас. % Ni) и источник углерода – графит МГ ОСЧ (99,99 мас.% С). Всю сборку кристаллизационного объема размещали в капсуле из спрессованного порошка MgO.

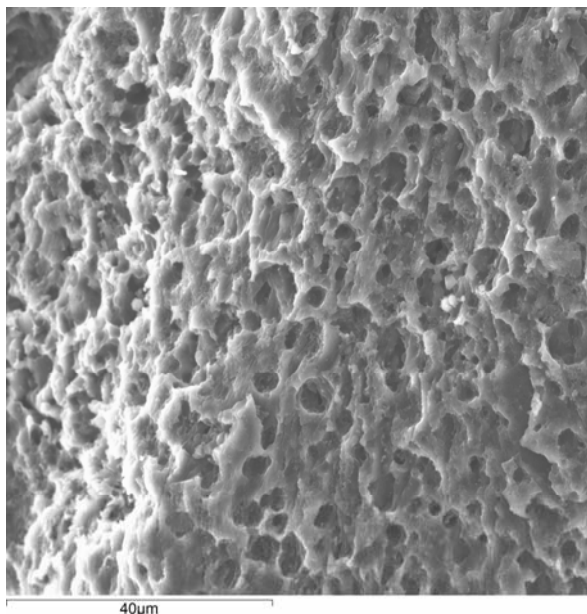


Рис. 1. Поверхность исходной затравки импактного алмаза

Предварительно в калибровочных опытах определили время, необходимое для растворения Pt фольги в металлическом расплаве в условиях эксперимента, что составило 1,5 ч. В опытах длительностью более 1,5 ч Pt пластинки фиксированной толщины полностью растворялась в Fe-Ni расплаве и на затравках отмечался рост алмаза. Был проведен эксперимент при давлении 5,5 ГПа и температуре 1450 °С продолжительностью 1,5 ч (без учета времени растворения защитного слоя из Pt фольги).

После опыта ячейку извлекали из аппарата высокого давления и разбирали. Образцы растворяли в смеси кислот HCl и HNO<sub>3</sub>, выделенные алмазы очищали в окислительной смеси (раствор K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> в концентрированной H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Затравки с наросшими кристаллами исследовали на оптическом (Olympus BX35) и сканирующем электронном микроскопах (СЭМ) MIRA LMU, а также на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100 в ЦКП ИГМ СО РАН. Спектры комбинационного рассеяния были записаны на спектрометре Horiba Jobin Yvon LabRam HR800 с 1024-многоканальным детектором CCD (Andor). Спектры КР возбуждались лазерным излучением UV линией 325 нм He-Cd-лазера и линией 532 нм неодимового лазера (Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) с мощностью излучения 5 МВт на образце.

## Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов, где в качестве затравочных кристаллов были использованы импактные алмазы Попигайской астроблемы, установлено нарастание кристаллов алмаза. По данным сканирующей электронной микроскопии (СКАН) в опыте при 5,5 ГПа и 1450 °С в течение 1,5 ч нарастающие кристаллы представлены кубической фазой, а лонсдейлит в затравочных кристаллах сохранился и соотношение лонсдейлит/алмаз не изменилось. Признаков лонсдейлита среди новообразованных кристаллов алмаза не обнаружено. Размер выросших индивидов алмаза в опыте длительностью 1,5 ч находился в диапазоне 0,2–0,5 мм. Средняя линейная скорость роста кристаллов алмаза в условиях опытов на затравочных кристаллах импактных алмазов составила 0,2 мм/ч. На рис. 2 показаны затравочные кристаллы импактного алмаза и выросшие на них кристаллы алмаза. Цвет выросших кристаллов кубического алмаза желтый и является типичным для алмазов, выращенных методом НРНТ в системе Fe-Ni-C. Морфология новообразованных кристаллов алмаза также в целом является обычной для данной металл-углеродной системы. Преобладающая морфологическая форма – октаэдр с второстепенными гранями гексаэдра, ромбододекаэдра, тетрагон-триоктаэдра (см. рис. 2). Грани кристаллов новообразованного алмаза плоские и гладкие. Отличием роста кристаллов на затравках импактных алмазов от роста на монокристаллической затравке алмаза является то, что зарождение кристаллов начиналось из разных точек затравки импактного алмаза. Ни в одном случае не отмечали рост монокристалла алмаза на затравке импактного алмаза. Наблюдался многоглавый рост, и в результате образовывался сросток кристаллов кубического алмаза (см. рис. 2).

Исходная поверхность затравочных кристаллов импактного алмаза имеет характерную ямочно-слоистую текстуру (см. рис. 1). Между участками затравки, где нарастали кристаллы алмаза, и участками затравки, запрессованной в подложку (недоступной для металла-растворителя), возникает узкая переходная зона. В этой зоне образующийся нарост алмаза взаимодействует с веществом импактного алмаза: поверхность затравки импактного алмаза частично оказывается растворенной, и на этой поверхности происходит нарастание тонких слоев алмаза. На общем обзоре сростков алмаза (ув. 200 мкм, рис. 2) на затравках импактного алмаза видна разориентировка выросших кристаллов алмаза (незакономерный сросток). Это заметно по сопряжению одноименных граней кристаллов и двойниковым границам. Нарращивание объемных субиндивидов алмаза позволяет масштабировать эффект разориентировки. Между мелкими субиндивидами в агрегате также присутствует угол разориентировки, но он менее заметен.

В сростке (вид со стороны выросшего слоя) наблюдается переход от поверхности исходной затравки попигайского алмаза к наросту алмаза (см. рис. 2). Более детально зоны перехода от поверхности исходной подложки (ямочно-слоистая текстура) к наросту кубического алмаза представлены следующим образом. На снимке СКАН с увеличением от 200 до 10 мкм

можно видеть следующие зоны: ямочно-слоистая текстура исходной затравки (зона  $A_1$ ) → поверхность затравки с признаками частичного растворения (зона  $A_2$ ) → тонкослоистая текстура нарастающего алмаза с элементами огранки (зона Б) → агрегат мелкокристаллических индивидов новообразованного алмаза размером первые микрометры (зона В) → сросток более крупных субиндивидов размеров доли миллиметра (зона Г).

Зона А. Поверхность исходной пластины импактного алмаза (затравка) имеет ямочную слоистую текстуру (см. рис. 1). В отдельных участках она изменена в результате частичного растворения. Кое-где эти изменения незначительны, так как сохранилась ямочная текстура. В других местах ямочная текстура исчезла, но сохранилась слоистость. Участки более глубокого растворения характеризуются появлением каверн, заполненных металлом, который удаляется после опыта при обработке в кислотах. Каверны расположены между исходной затравкой и нарастающим слоем алмаза. В отдельных участках каверны имеют элементы огранки.

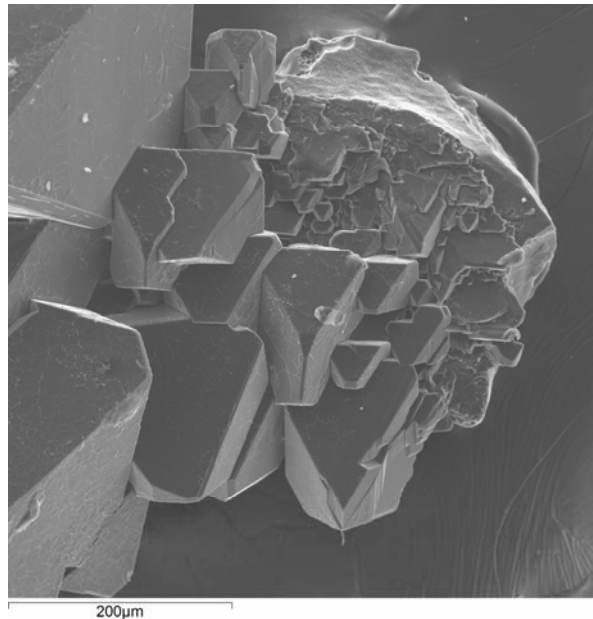


Рис. 2. Многоглавый рост кристаллов алмаза на импактный алмаз Попигайской астроблемы

Зона Б. Зона является переходной на границе поверхности исходной затравки (рис. 3, 4). В данной зоне наблюдается нарастание тонких слоев алмаза (толщины по 10–100 мкм) в одной ориентировке по плоскости (111), т. е. в субоктаэдрической ориентировке относительно плоскости затравки. Часть нарастающих слоев алмаза не имеет правильных геометрических очертаний, а часть слоев при удалении от границы раздела обнаруживает элементы огранки. Нарастающие слои алмаза покрывают ямочную поверхность, в отдельных участках видно срастание слоев алмаза с веществом исходной пластины (см. рис. 4). Каверны отчетливо выделяют контуры тангенциально нарастающих слоев.

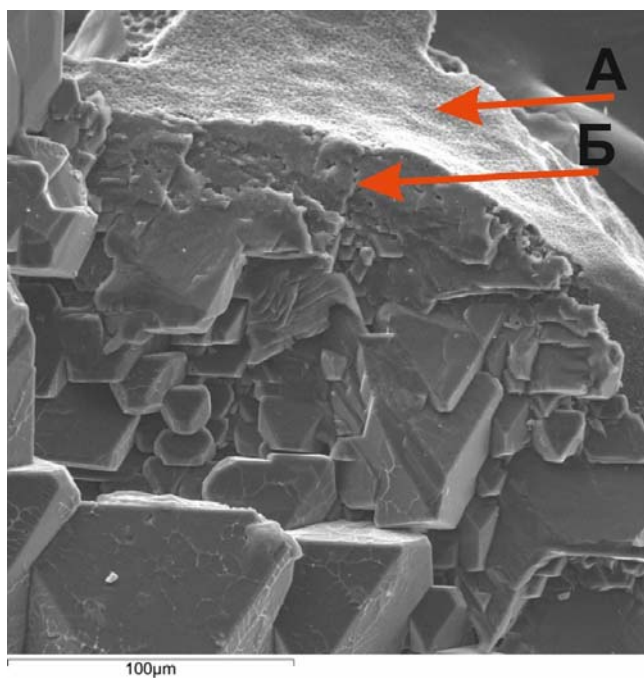


Рис. 3. Кристаллы новообразованного алмаза. Переход от зоны А к зоне Б

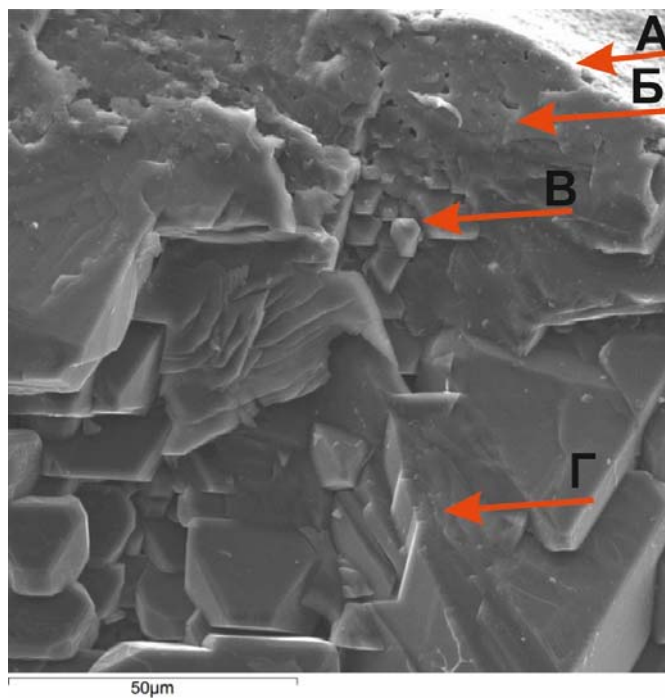


Рис. 4. Кристаллы новообразованного алмаза. Переход от зоны А к зоне Б и далее к зонам В и Г

Зона В. Слоистое строение сменяется агрегатом мелкокристаллических индивидов новообразованного алмаза размером первые микрометры (см. рис. 3, 4). По мере удаления от границы с запрессованным участком исходной затравки размер субиндивидов нарастающего алмаза увеличивается, число их уменьшается (рис. 5). Следует отметить, что во всех случаях растет агрегат кристаллов, а не единый монокристалл. Еще раз подчеркнем, что субиндивиды в сростках несколько разориентированы в разных участках затравочной пластины (см. рис. 2).

Зона Г. Зона нахождения наиболее крупных по размеру индивидов новообразованного алмаза с минимальным их количеством отмечается с удалением от границы перехода затравки попигайского алмаза к наросту алмаза (см. рис. 2, 4). В отдельных участках сростка близко расположенные кристаллы субпараллельны по всей ориентации относительно друг друга, а в разных участках сростка на пластине импактного алмаза они не совпадают по своим кристаллографическим направлениям, т. е. образуют незакономерный сросток.

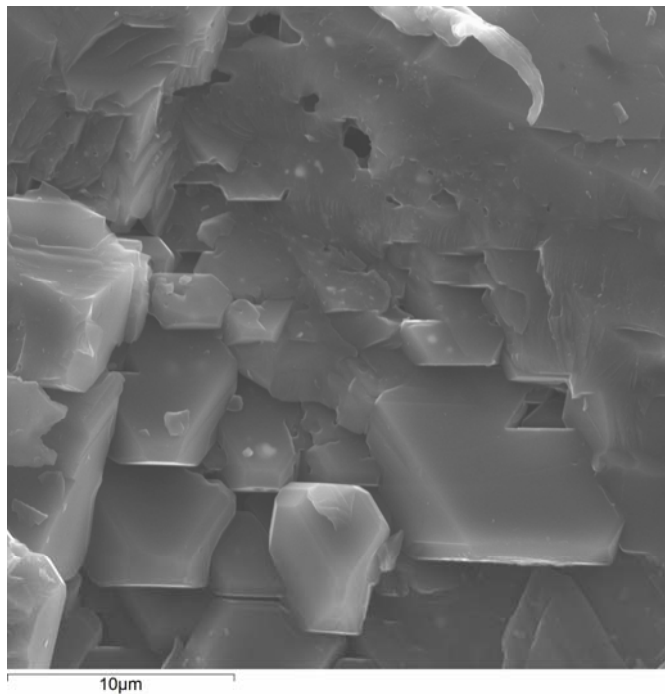


Рис. 5. Кристаллы новообразованного алмаза. Детали зоны В

Возникает вопрос: как объяснить нарастание слоев алмаза в одной ориентировке на нанокристаллической поверхности лонсдейлитсодержащего алмазного субстрата? Считают, что поверхность импактного алмаза гетерогенна и образована выходом нанокристаллического агрегата алмаза и лонсдейлита [Kvasnytsya, Wirth, 2013]. Один из вариантов объяснения заключается в том, что, возможно, в участках взаимодействия поверхности импакт-



ной затравки с Fe-Ni расплавом появляются структуры регенерации и происходит перекристаллизация лонсдейлитсодержащего алмазного субстрата. Если полагать, что лонсдейлит является дефектом кубического алмаза [Сохор, Футергендлер, 1974; Lonsdaleite is faulted ... , 2014] и на нем, как и на кубическом алмазе, нарастают слои алмаза, а слоистая текстура этого участка связана с историей его образования: исходный графит → импактное событие и образование параморфоз лонсдейлитсодержащего алмазного композита по графиту со слоистой текстурой → вторичные процессы растворения, коррозии и новообразования ямочной текстуры на поверхности параморфоз → перекристаллизация алмаза в опыте с унаследованием слоистой текстуры параморфоз, происходит послойный (тангенциальный) рост с формированием тонких слоев алмаза, которые замещают лонсдейлитсодержащий алмазный композит. Это подтверждается срастанием исходного лонсдейлитсодержащего алмазного субстрата с новообразованным алмазом (см. рис. 3, 4).

Относительно многоглавого роста и разориентировки субиндивидов кубического алмаза можно отметить следующее. Вероятно, исходная разориентировка точек зарождения субиндивидов приводит к многоглавому росту кристаллов в сростке в отличие от монокристалльного роста алмаза на монокристаллической затравке. Данные XRD [Сохор, Футергендлер, 1974] подтверждают совпадающую ориентировку индивидов алмаза в локальных участках сростка, но по данным СКАН наблюдается разнонаправленная ориентировка субиндивидов в разных участках сростка кристаллов алмаза. Следует учесть и взаимное влияние субиндивидов в друзовом агрегате (сростке) вследствие геометрического отбора кристаллов, растущих с разными скоростями в зависимости от их кристаллографического направления к источнику питания.

### **Заключение**

Таким образом, в результате проведенного исследования нами было установлено, что нарастание на импактный лонсдейлитсодержащий алмаз происходит посредством кубической фазы. Лонсдейлит в затравочных кристаллах сохраняется, и соотношение лонсдейлит/алмаз остается неизменным. Возможно, в участках взаимодействия поверхности импактной затравки с Fe-Ni расплавом появляются структуры регенерации и происходит перекристаллизация лонсдейлитсодержащего алмазного субстрата. Основным отличием роста кристаллов на затравках импактных алмазов от роста на монокристаллической затравке алмаза являлось то, что зарождение кристаллов начиналось из разных точек затравки импактного алмаза. Наблюдался многоглавый рост, и в результате образовывался сросток кристаллов алмаза. Вероятно, исходная разориентировка точек зарождения субиндивидов приводит к многоглавому росту кристаллов в сростке в отличие от монокристалльного роста алмаза на монокристаллической затравке.

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИГМ СО РАН.*

### Список литературы

- Квасница В. Н., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Типоморфизм микрокристаллов алмаза. М. : Недра-Бизнесцентр, 1999. 224 с.
- Сохор М. И., Футергендлер С. И.* Рентгенографическое исследование образования кубический алмаз – лонсдейлит // Кристаллография. 1974. Т. 19, № 4. С. 758–762.
- Структура и свойства лонсдейлитсодержащих алмазов / А. М. Налетов, В. И. Непша, Ю. А. Клюев [и др.] // Тр. ВНИИалмаза. 1985. С. 75–83.
- Ударно-метаморфогенные минералы углерода / А. А. Вальтер, Г. К. Еременко, В. Н. Квасница, Ю. А. Полканов. Киев : Наукова думка, 1992. 172 с.
- Якутиты – импактные алмазы Попигайской астроблемы / В. П. Афанасьев, С. С. Угапьева, А. П. Елисеев, С. А. Громилов, А. Д. Павлушин // Руды и Металлы. 2019. № 2. С. 30–37.
- Bundy F. P., Kasper J. S.* Hexagonal Diamond – A New Form of Carbon // Journal of Chemical Physics. 1967. Vol. 46. (9). P. 3437–3446.
- Day H. W.* A revised diamond-graphite transition curve // Am. Mineral. 2012. Vol. 97 (1). P. 52–62. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3763>.
- First-principles, UV Raman, X-ray diffraction and TEM study of the structure and lattice dynamics of the diamond-lonsdaleite system / V. N. Denisov, B. N. Mavrin, N. R. Serebryanaya, G. A. Dubitskiy, V. V. Aksenkov, A. N. Kirichenko, N. V. Kuzmin, B. A. Kulnitskiy, I. A. Perezhogin, V. D. Blank // Diamond and Related Materials. 2011. Vol. 20. P. 951–953. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.05.013>
- Frondel C., Marvin U. B.* Lonsdaleite, a Hexagonal Polymorph of Diamond // Nature. 1967. Vol. 214. P. 587–589.
- Graphite in rocks of the Popigai impact crater: residual or retrograde? / V. Afanasiev, S. Gromilov, V. Sonin, E. Zhimulev, A. Chepurov // Turkish Journal of Earth Sciences. 2019. Vol. 28. P. 470–477. <https://doi.org/10.3906/yer-1808-6>
- Harder than Diamond: Superior Indentation Strength of Wurtzite BN and Lonsdaleite / Z. Pan, H. Sun, Y. Zhang, C. Chen // Physical Review Letters. 2009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.055503>
- Kennedy C. S., Kennedy G. C.* The equilibrium boundary between graphite and diamond // J. Geophys. Res. 1976. Vol. 81. P. 2467–2470.
- Kvasnytsya V., Wirth R.* Micromorphology and internal structure of apographitic impact diamonds: SEM and TEM study // Diamond and Related Materials. 2013. Vol. 32. P. 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.11.010>
- Lonsdaleite is faulted and twinned cubic diamond and does not exist as a discrete material / P. Nemeth, L. A. J. Garvie, T. Aoki, N. Dubrovinskaia, L. Dubrovinsky, P. R. Buseck // Nature Communications. 2014. Vol. 20. P. 1–5. <https://doi.org/10.1038/ncomms6447>.
- Masaitis V.L.* Impact diamonds of the Popigai astrobleme: Main properties and practical use // Geology of Ore Deposits. 2013. Vol. 55, N 8. P. 607–612. <https://doi.org/10.1134/S1075701513080084>
- Morphology of Crystals Growing in Impact Diamonds of the Popigai Astrobleme (Experimental Data) / A. I. Chepurov, E. I. Zhimulev, V. M. Sonin, A. A. Chepurov, Z. A. Karpovich, S. V. Goryainov, V. P. Afanasiev, and Academician N. P. Pokhilenko // Doklady Earth Sciences, 2021. Vol. 500, Part 1. P. 734–737. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21090063>
- Nanocrystalline hexagonal diamond formed from glassy carbon / T. B. Shiell, D. G. McCulloch, J. E. Bradby, B. Haberl, R. Roehler, D. R. McKenzie // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep37232>.
- Nanosecond formation of diamond and lonsdaleite by shock compression of graphite / D. Kraus, A. Ravasio, M. Gauthier, D. O. Gericke, J. Vorberger, S. Frydrych, J. Helfrich, L. B. Fletcher, G. Schaumann, B. Nagler, B. Barbrel, B. Bachmann, E. J. Gamboa, S. GoËde, E. Granados, G. Gregori, H. J. Lee, P. Neumayer, W. Schumaker, T. DoËppner, R. W. Falcone, S. H. Glenzer & M. Roth // Nature Communications. 2016. <https://doi.org/10.1038/NCOMMS10970>

Raman identification of lonsdaleite in Popigai impactites / S. V. Goryainov, A. Y. Likhacheva, S. V. Rashchenko, A. S. Shukin, V. P. Afanas'ev, N. P. Pokhilenko // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2014. Vol. 45. P. 305–313. <https://doi.org/10.1002/jrs.4457>

## Growth Diamond on an Impact Lonsdaleite-bearing Diamond from the Popigai Astrobleme

Z. A. Karpovich, E. I. Zhimulev, A. I. Chepurov

*V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*

**Abstract.** The Popigai astrobleme contains huge reserves of diamonds with unusual properties. In impact diamonds from the Popigai astrobleme, the cubic phase and lonsdaleite are intergrown. In order to study the relationship of lonsdaleite-bearing impact diamonds with diamond, an experimental study of the features of diamond growth on lonsdaleite-bearing fragments was carried out. The experiments were carried out on a high-pressure apparatus of the “BARS” type at 5.5 GPa and 1450 °C in the Fe-Ni-C system (nickel 36 wt.%). Impact Popigai diamonds were used as seed crystals. As a result of the study, it was found that the newly formed crystals are represented by a cubic phase, while the lonsdaleite in the seed crystals was preserved and the lonsdaleite / diamond ratio did not change. The newly formed cubic diamond in its main properties (Raman spectra, morphology, color, etc.) corresponds to synthetic diamonds grown in the iron-nickel system. The difference between the growth of crystals on seeds of impact diamonds and growth on a single-crystal seed of diamond was that the nucleation of crystals began from different points of the seed of the impact diamond. Multi-headed growth was observed and, as a result, an intergrowth of diamond crystals was formed. Probably, the initial misorientation of the points of nucleation of subindividuals leads to multi-headed growth of crystals in an intergrowth, in contrast to single-crystal growth of diamond on a single-crystal seed.

**Keywords:** impact diamonds, lonsdaleite, high pressure and temperature, experiment.

**For citation:** Karpovich Z. A., Zhimulev E. I., Chepurov A. I. Growth Diamond on an Impact Lonsdaleite-bearing Diamond from the Popigai Astrobleme. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2021, vol. 38, pp. 41-53. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.41> (in Russian)

### References

- Kvasnytsya V.N., Zinchuk N.N., Koptil V.I. *Tipomorfizm mikrokristallov almaza* [Typomorphism of diamond microcrystals]. Moscow, LLC “Nedra-Business Center” Publ., 1999, 224 p. (in Russian)
- Sohor M.I., Futergender S.I. Rentgenograficheskoe issledovanie obrazovaniya kubicheskogo almaza – lonsdeylit [X-ray study of the formation of cubic diamond-lonsdaleite] *Kristallografiya* [Crystallography], 1974, vol. 19, no. 4, pp. 758-762. (in Russian)
- Naletov A.M., Nepsha V.I., Klyuev Y.A. et al. Structura i svoystva lonsdeylitsoderzhashihalmazov [Structure and properties of lonsdaleite-bearing diamonds]. *Tr. VNIImalmaza*, 1985, pp. 75-83. (in Russian)
- Valter A.A., Eremenko G.K., Kvasnytsya V.N., Polkanov Y.A. *Udarno-metamorfogennye mineraly ugleroda* [Impact-metamorphogenic carbon minerals]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1992, 172 p. (in Russian)
- Afanasiev V.P., Ugapieva S.S., Eliseev A.P., Gromilov S.A., Pavlushin A.D. Yakutiti – impaktnie almazy Popigyasky astroblemi [Yakutites – Impact Diamonds of the Popigai Astrobleme]. *Rudy i Metally* [Ores and Metals], 2019, no. 2, pp. 30-37. (in Russian)
- Bundy F.P., Kasper J.S. Hexagonal Diamond – A New Form of Carbon. *Journal of Chemical Physics*, 1967, vol. 46, no. 9, pp. 3437-3446.

Day H.W. A revised diamond-graphite transition curve. *Am. Mineral*, 2012, vol. 97, no. 1, pp. 52-62. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3763>

Denisov V.N., Mavrin B.N., Serebryanaya N.R., Dubitsky G.A., Aksenkov V.V., Kirichenko A.N., Kuzmin N.V., Kulnitskiy B.A., Perezhogin I.A., Blank V.D. First-principles, UV Raman, X-ray diffraction and TEM study of the structure and lattice dynamics of the diamond-lonsdaleite system. *Diam. Relat. Mater.*, 2011, vol. 20, pp. 951-953. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.05.013>

Fronzel C., Marvin U.B. Lonsdaleite, a Hexagonal Polymorph of Diamond. *Nature*, 1967, vol. 214, pp. 587-589.

Afanasiev V., Gromilov S., Sonin V., Zhimulev E., Chepurov A. Graphite in rocks of the Popigai impact crater: residual or retrograde? *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2019, vol. 28, pp. 470-477. <https://doi.org/10.3906/yer-1808-6>

Pan Z., Sun H., Zhang Y., Chen C. Harder than Diamond: Superior Indentation Strength of Wurtzite BN and Lonsdaleite. *Physical Review Letters*, 2009, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.055503>

Kennedy C.S., Kennedy G.C. The equilibrium boundary between graphite and diamond. *J. Geophys. Res.*, 1976, vol. 81, pp. 2467-2470.

Kvasnytsya V., Wirth R. Micromorphology and internal structure of apographitic impact diamonds: SEM and TEM study. *Diam. Relat. Mater.*, 2013, vol. 32, pp. 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.11.010>

Nemeth P., Garvie L.A.J., Aoki T., Dubrovinskaia N., Dubrovinsky L., Buseck P.R. Lonsdaleite is faulted and twinned cubic diamond and does not exist as a discrete material. *Nat. Commun.*, 2014, vol. 20, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1038/ncomms6447>

Masaitis V.L. Impact diamonds of the Popigai astrobleme: Main properties and practical use. *Geol. Ore Deposit.*, 2013, vol. 5, no. 8, pp. 607-612. <https://doi.org/10.1134/S1075701513080084>

Chepurov A. I., Zhimulev E. I., Sonin V. M., Chepurov A. A., Karpovich Z. A., Goryainov S. V., Afanasiev V. P., and Academician Pokhilenko N. P. Morphology of Crystals Growing in Impact Diamonds of the Popigai Astrobleme (Experimental Data). *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 500, part 1, pp. 734-737. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21090063>

Shiell T.B., McCulloch D.G., Bradby J.E., Haberl B., Roehler R., McKenzie D.R. Nanocrystalline hexagonal diamond formed from glassy carbon. *Sci Rep-Uk.*, 2016, vol. 6. pp. 1-8. <https://doi.org/10.1038/srep37232>

Kraus D., Ravasio A., Gauthier M., et al. Nanosecond formation of diamond and lonsdaleite by shock compression of graphite. *Nat. Commun.*, 2016. <https://doi.org/10.1038/NCOMMS10970>.

Goryainov S.V., Likhacheva A.Y., Rashchenko S.V., Shukin A.S., Afanas'ev V.P., Pokhilenko N.P. Raman identification of lonsdaleite in Popigai impactites. *J. Raman Spectrosc.*, 2014, vol. 45, pp. 305-313. <https://doi.org/10.1002/jrs.4457>

**Карпович Захар Алексеевич**

аспирант

Институт геологии и минералогии

им. В. С. Соболева СО РАН

Россия, 630090, г. Новосибирск,

просп. Академика Коптюга, 3

e-mail: [zkarpovich@yandex.ru](mailto:zkarpovich@yandex.ru)

**Karpovich Zakhar Alekseevich**

Postgraduate

V. S. Sobolev Institute of Geology and

Mineralogy SB RAS

3, Academic Koptyug av., Novosibirsk,

630090, Russian Federation

e-mail: [zkarpovich@yandex.ru](mailto:zkarpovich@yandex.ru)

**Жимулев Егор Игоревич**

доктор геолого-минералогических наук,

старший научный сотрудник

Институт геологии и минералогии

**Zhimulev Egor Igorevich**

Doctor of Sciences (Geology and

Mineralogy), Researcher

V. S. Sobolev Institute of Geology and

*им. В. С. Соболева СО РАН  
Россия, 630090, г. Новосибирск,  
просп. Академика Коптюга, 3  
e-mail: ezhimulev@igm.nsc.ru*

**Чепуров Анатолий Ильич**  
*доктор геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Институт геологии и минералогии  
им. В. С. Соболева СО РАН  
Россия, 630090, г. Новосибирск,  
просп. Академика Коптюга, 3  
e-mail: chepurov@igm.nsc.ru*

*Mineralogy SB RAS  
3, Academic Koptug av., Novosibirsk,  
630090, Russian Federation  
e-mail: ezhimulev@igm.nsc.ru*

**Chepurov Anatoly Il'ich**  
*Doctor of Sciences (Geology and  
Mineralogy), Leading Researcher  
V. S. Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS  
3, Academic Koptug av., Novosibirsk,  
630090, Russian Federation  
e-mail: chepurov@igm.nsc.ru*