

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.067.02 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛОГИИ
им. В.С. СОБОЛЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ НАУК**

Аттестационное дело № _____
Решение диссертационного совета от 27 сентября 2022 г. N 02/13

О присуждении **Карповичу Захару Алексеевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата геолого-минералогических наук.

Диссертация «**Нарастание кристаллов алмаза на лонсдейлитсодержащие фрагменты импактных алмазов Попигайской астроблемы в статических условиях высоких давлений и температур**» по специальности 25.00.05 – «минералогия, кристаллография» принята к защите 25 июля 2022 г., протокол № 02/11, диссертационным советом Д 003.067.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (630090, г. Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3), приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель **Карпович Захар Алексеевич**, 1996 года рождения, В 2018 г. окончил с отличием Новосибирский государственный технический университет по направлению «Материаловедение в машиностроении». В период подготовки диссертации соискатель Карпоаич Захар Алексеевич работал в лаборатории экспериментальной петрологии и геодинамики (№ 449) ИГМ СО РАН (с 2018 по 2019 г. на должности лаборанта, с 2019 по 2022 г. – инженера-исследователя, с 2022 г. по настоящее время - инженера).

Диссертация выполнена в лаборатории экспериментальной петрологии и геодинамики (№ 449) ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Научный руководитель – **Жимулев Егор Игоревич**, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной петрологии и геодинамики (№ 449) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), доктор геолого-минералогических наук.

Официальные оппоненты:

1) **Васильев Евгений Алексеевич**, доктор геолого-минералогических наук ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»; 2) **Винс Виктор Генрихович**, доктор физико-математических наук. Директор ООО «ВЕЛМАН», дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН, г. Москва), в своем положительном отзыве, подписанном **Луканиним Олегом Александровичем**, доктором геолого-минералогических наук, главным научным

сотрудником, руководителем Лаборатории геохимии мантии Земли ГЕОХИ РАН указала, что представленная диссертация посвящена весьма актуальной теме, обладает новизной и является законченной научно-исследовательской работой, основанной на большом объеме новых экспериментальных результатов, комплексных аналитических данных, полученных на высоком научно-методическом уровне; диссертационная работа отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант З. А. Карпович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата геолого-минералогических наук.

Соискатель З. А. Карпович имеет 25 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, баз данных Web of Science и Scopus и 1 патент РФ:

1. Грязнов И.А., **Карпович З.А.**, Ишутин И.А., Жимулев Е.И. Растворение макрокристов оливина в кимберлитовом расплаве при высоких Р-Т параметрах // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2019. Т. 28. С. 34-47.

2. **Карпович З.А.**, Жимулев Е.И. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования в системе Fe-C-S при высоких Р-Т-параметрах // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2020. Т. 34. С. 67–81.

3. Жимулев Е.И., Бабич Ю.В., **Карпович З.А.**, Чепуров А.И., Похilenko Н.П. Об образовании малоазотных алмазов в системе Fe–C–S // Доклады Российской академии наук. 2020. Т. 494 (1). С. 39–42.

4. Чепуров А.И., Жимулев Е.И., Сонин В.М., Чепуров А.А., **Карпович З.А.**, Горяйнов С.В., Афанасьев В.П., Похilenko Н.П. Морфология кристаллов, нарастающих на импактные алмазы Попигайской астроблемы (экспериментальные данные) // Доклады Российской академии наук. 2021. Т. 498. № 1. С. 42-45

5. **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

6. Yelisseyev A.P., Zhimulev E.I., **Karpovich Z.A.**, Chepurov A.A., Sonin V.M., Chepurov A.I. Characterization of the nitrogen state in HPHT diamonds grown in Fe-C system with a low sulfur addition. CrystEngComm. 2022. 24. P 4408–4416.

7. Чепуров А.А., Жимулев Е.И., Ишутин И.А., **Карпович З.А.**, Лин В.В., Сонин В.М., Чепуров А.И. Реакционная ячейка многопуансонного аппарата высокого давления и температуры для обработки алмаза. Патент РФ № 2 705 962. Дата подачи заявки: 09.04.2019. Опубликовано: 12.11.2019.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов (все положительные) от: 1) Павлушина А.Д., к.г.-м.н., старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 2) Сенютъ В. Т., к.т.н., ведущего научного сотрудника лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов Объединённого института машиностроения НАН Белоруси; 3) Витязь П. А., академика, д. т. н., проф., начальника управления аэрокосмической деятельностью НАН Белоруси; 4) Смирнова Е. В., к.г.-м.н., директора по региональной геологии Акционерного общества «Сибирский научно-

исследовательский Институт геологии, геофизики и минерального сырья»; 5) Хачатрян Г. К., д.г-м.н, ведущего научного сотрудника отдела минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ»; 6) Гаранина В. К., лауреата Премии им. А. Е. Ферсмана, профессора РАН, академика РАЕН, д.г-м.н., научного руководителя Федерального государственного бюджетного учреждения науки Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана Российской академии наук направления, лауреата Премии Правительства в области науки и техники; 7) Зинчука Н. Н., проф., академика АН РС, д.г-м.н., председателя Западно-Якутского научного центра (ЗЯНЦ).

В отзывах отмечено, что диссертационная работа является серьёзным научным исследованием, решающим крупную научную проблему и вносящим огромный вклад в теорию образования алмаза. Подчеркивается значительный объем и качественная проработка аналитических данных, применение очень широкого круга современных аналитических методов исследования. Полученные соискателем результаты признаны мировым сообществом, что подтверждается их опубликованием в высокорейтинговых журналах, в большинстве статей – в качестве первого автора. Основные защищаемые положения достоверны и обоснованы.

Основные замечания и предложения по автореферату и диссертации касаются следующего:

1) Из отзыва ведущей организации (Луканин О. А.):

«В качестве замечания следует отметить недостаточно полное освещение дискуссии о существующих взглядах на природу лонсдейлита. Также следовало бы подробнее осветить известные данные о импактных алмазах других регионов.»

«В разделе 1.3.3. представлены две фазовые диаграммы Fe-C при давлениях из разных источников (рис.1.1 и 1.2.). Желательно было бы кратко сказать о причинах существенных расхождений оценках температур эвтектики (Fe-Fe₃C) и перитектики (L-Fe₃C+C) на этих диаграммах.»

«Следовало бы более подробно описать методику извлечения довольно мелких образцов и подготовки для их дальнейшего исследования различными методами».

«Желательно было бы привести графики градиента температуры для использованной ячейки».

«Следовало бы также рассмотреть вопрос вхождения или не вхождения азота в структуру импактных алмазов и если вхождение азота все же имело место, то на каком этапе эволюции процесса это могло происходить?».

2) Из отзыва официального оппонента В. Е. Васильева:

«Не приведено описание аппаратуры, на которой регистрировались спектры поглощения в УФ диапазоне. К сожалению, в разделе отсутствует описание процедуры определения доли лонсдейлита (по данным комбинационного рассеяния), которое в одном из образцов превысила 50 %.

«В материалах главы следовало бы привести описание и характеристики кристаллов, выращенных в тех же условиях, но без добавки серы.» «К сожалению, изложенные результаты заключаются исключительно в SEM изображениях, а основной объем этого раздела приходится на красивые иллюстрации. Хорошо было бы провести изучение углов разориентировки индивидов в полученных сростках (хотя бы графически)».

«К защищемому положению 1. Однако фраза «...не увеличивает РТ параметры» не несет позитивного смысла, а отрицательный смысл можно расширять долго....».

«К защищемому положению 2. Однако, формулировка этого положения могла быть более выверенной: предложение «Рост лонсдейлита не имеет места» не имеет смысловой законченности, и не несет позитивного смысла. Вместо этого предложения достаточно было добавить «только» перед «...кубической» в первом предложении».

«В представленной работе основное ключевое слово – «алмаз» используется в двух смыслах как минерал/фаза, и как отдельные индивиды (кристаллы, агрегаты) минерала.»

3) Из отзыва официального оппонента В. Г. Винса:

«Следовало бы подробнее осветить известные данные о импактных алмазах других регионов».

«Однако хочется сделать несколько замечаний, касающихся первого защищемого положения. Оно могло быть намного существеннее, если бы исследования по каталитическим свойствам серы: а именно предположение, что сера могла выступать в роли катализатора образования азотсодержащих ТУВ, не входя в их состав, но связывая азот системы в азотсодержащих ТУВ и таким образом выступая геттером азота, были доведены до логического завершения.»

«Кроме того, для его более четкого изложения экспериментальных данных, в следствие которых формулируется защищаемое положение, имело бы смысл убрать из текста диссертации параграф 3.3.1. Поскольку далее, в параграфе 3.3.3 содержатся такие же данные по ИК спектроскопии выращенных в системе Fe-C-S алмазов, изложенные, однако, более корректно и подробно, к тому же дополненные данными по поглощению алмазов в УФ и видимом диапазонах.»

«В частности, в ряде случаев не выделены показатели степеней (например, концентрация азота указана как: 2×1020 см⁻³), а некоторые расчетные формулы приведены в трудночитаемом виде, как например на стр. 76:(....формулу NC (ppm) = $22 \times \mu 1344$ (см⁻¹) от [Woods et al.,1990], где NC – концентрация азота в форме C, а $\mu 1344$ – поглощение в линии 1344 см⁻¹,.....)».

4) Из отзыва Н. Н. Зинчука:

«10 пункт заключения не несет ничего нового. Это естественный процесс при снижении Р-Т параметров среды кристаллизации лонсдейлита, а затем кубического алмаза».

5) Из отзыва Г.К. Хачатрян:

«Следует ли ограничивать результаты экспериментов затравками из конкретных объектов (в данном случае Попигая)? Очевидно, что полученные в работе данные имеют универсальный характер».

«В тексте автореферата и диссертации автор нередко называет затравочные импактные алмазы кристаллами. Терминологически это неправильно, т.к. импактные алмазы представляют собой лонсдейлитсодержащие поликристаллические агрегаты,...».

6) Из отзыва П.А. Витязь:

«Полученные диссидентом результаты помимо научной значимости обладают несомненной практической новизной, но к сожалению, не все они нашли отражение в заявках на изобретения и патентах».

7) Из отзыва В. Т. Сенють:

«На рис. 3 и рис.5 автореферата, на которых представлены данные КР-спектроскопии импактных алмазов, отсутствуют обозначения фаз углерода».

8) Из отзыва А. Д. Павлушкина:

«Вопрос к выводу 9 в заключении. Если лонсдейлит лишь дефект структуры кубического алмаза, то почему в таком случае его эпитаксиальная фаза не транслирует во время роста гексагональный мотив «лонсдейлиторых дефектов» заведомо присутствующих в подложке, наряду с такими отмеченными деформациями как разнообразные границы двойниковых срастаний, включая те же полисинтетические двойники?».

9) Из отзыва Е. В. Смирнова:

«В связи с этим хотелось бы услышать от автора, каким он видит направления дальнейших научных исследований» .

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что Винс Виктор Генрихович, Васильев Евгений Алексеевич являются высококвалифицированными специалистами в области экспериментальной и теоретической минералогии алмаза. Оппоненты имеют многочисленные публикации в высокорейтинговых изданиях в области исследования, соответствующей тематике диссертации и способны всесторонне и объективно оценить данную диссертационную работу.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что направление ее научно-исследовательской деятельности полностью соответствует тематике диссертации, а специалисты могут объективно и аргументированно оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненным соискателем исследований:

Разработан новый экспериментальный подход для моделирования кристаллизации искусственного алмаза на фрагментах импактных алмазов Попигайской астроблемы при высоких давлениях и температурах, позволивший выявить новые закономерности нарастания кубической фазы. Разработана методика наращивания алмазов на импактные лонсдейлитсодержащие алмазы из Попигайской астроблемы в системе Fe-Ni-C на многопуансонных аппаратах высокого давления типа «БАРС». Впервые в системе Fe-Ni-C при 5.5 ГПа и 1450 °C получены и изучены кристаллы алмаза, выросшие на затравках импактных лонсдейлитсодержащих алмазов из Попигайской астроблемы. Введены измененные трактовки взаимоотношений кубического алмаза с импактным алмазом и предложены новые представления о взаимодействии кубической фазы с лонсдейлитсодержащим алмазом на основе нетрадиционного экспериментального подхода. Показано зональное строение перехода между затравками импактного алмаза с новообразованными кристаллами алмаза. Установлено, что нарастание кристаллов кубической фазы (алмаза) на фрагменты импактных лонсдейлитсодержащих алмазов происходит одновременно из разных центров зародышеобразования с образованием сростков. Показано, что ориентация формирующих сростков кристаллов алмаза, зависит от исходного содержания лонсдейлита в затравочном кристалле алмаза: при 0-25 мол.% формируются параллельные и субпараллельные индивиды, при 45-55 мол.% – разноориентированные индивиды (незакономерные сростки). Доказано, что в системе Fe-S-C в присутствии серы в количестве 1 мас.% от массы металла происходит существенное уменьшение

содержания азота в кристаллизующихся алмазах. Сделано предположение, что обнаруженные на природных импактных алмазах микрокристаллы кубического алмаза, находящиеся в параллельной ориентировке, образовывались после импактного события по механизму перекристаллизации.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что доказаны следующие положения:

1. Введение серы в систему Fe-C в количестве 1 мас.% не увеличивает Р-Т параметры роста кристаллов алмаза, но существенно снижает концентрацию примесного азота. Алмазы растут в виде прозрачных, почти бесцветных кристаллов с содержанием примесного азота в диапазоне 20-40 ppm. Азот в алмазах находится, в основном, в азотно-вакансационных комплексах в разных состояниях заряда (NV^0 , NV^-) и, в меньшей степени, в A и H3 центрах.
2. При 5.5 ГПа и 1450°C в системе Fe-Ni-C на импактные лонсдейлиты содержащие паракристаллы алмаза происходит нарастание кубической алмазной фазы. Рост лонсдейлита не имеет места. Соотношение лонсдейлита/алмаз в затравочных паракристаллах сохраняется неизменным.
3. В системе Fe-Ni-C при 5.5 Гпа и 1450°C ориентация нарастающих микрокристаллов кубической алмазной фазы зависит от содержания лонсдейлита в исходных импактных паракристаллах: при 0-25 мол.% формируются параллельные и субпараллельные индивиды, при 45-55 мол.% – разноориентированные микрокристаллы новообразованной кубической фазы алмаза. Образование сростка субпараллельных микрокристаллов алмаза соответствует подобным образованиям на природных импактных алмазах Попигайской астроблемы с малым содержанием лонсдейлита.

Применительно к проблематике диссертации результативно использованы экспериментальные методики исследований при высоких температурах и давлениях на многопуансонном аппарате (АВД) типа разрезная сфера, а также комплекс современных методов исследования, включающий в себя оптическую и электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ, ИК-спектроскопию, КР-спектроскопию, XRD-анализ. В основу работы положены результаты экспериментальных исследований на многопуансонном аппарате высокого давления типа «БАРС». По теме диссертации проведено более 50 опытов при высоком давлении. В процессе работы автором разработаны новые ячейки высокого давления, созданы новые приемы и методики проведения экспериментов.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что: в результате исследования представлены

1. Новые экспериментальные данные, такие как:
 - Выращенные синтетические алмазы на импактных лонсдейлитах содержащих алмазах из Попигайской астроблемы в системе Fe-Ni-C характеризуют взаимодействие искусственного алмаза и металл-углеродных сплавов с импактными алмазами, что крайне важно для выяснения возможности использования их уникальных механических свойств и разработки различных видов алмазного инструмента.

2. Разработанные методы выращивания синтетических кристаллов алмаза на многопуансонном аппарате высокого давления типа «БАРС» в системах Fe-C-S и Fe-Ni-C могут быть применены для получения алмазов с новыми физическими свойствами.

3. Кроме того, полученные экспериментальные данные являются новыми и важными для развития представлений об особенностях и условиях формирования импактных алмазов Попигайской астроблемы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Высокая степень достоверности и обоснованности результатов проведенных исследований, обобщенных в виде защищаемых положений и выводов диссертации З.А. Карповича, определяется эффективным использованием современных методов экспериментального моделирования в решении проблем генезиса алмаза в серосодержащей металл-углеродной системе (Fe-C-S), а также многосторонним изучением взаимодействия новообразованной кубической фазы углерода (алмаза) с лонсдейлитсодержащими импактными алмазами Попигайской астроблемы в системе Fe-Ni-C при высоких Р-Т параметрах и обоснованы калибровками. Показана воспроизводимость результатов исследования и полученные в ходе экспериментов образцы детально изучены на сертифицированном оборудовании с применением оптической и электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, ИК-спектроскопии, КР-спектроскопии, XRD-анализа. Результаты исследований обсуждались на российских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых журналах.

Теоретическое обобщение построено на основе результатов комплексного экспериментального исследования алмазообразования в железо-серо-углеродной системе, а также изучения взаимодействия новообразованной кубической фазы углерода (алмаза) с лонсдейлитсодержащими импактными алмазами Попигайской астроблемы в системе Fe-Ni-C при высоких Р-Т параметрах. Экспериментальные данные согласуются с опубликованными результатами изучения природных импактных алмазов. Идеи диссертации базируются как на общепринятых моделях и концепциях, касающихся проблематики – роли металл-серо-углеродных расплавов в алмазообразовании в мантии Земли, так и на вновь развивающихся гипотезах. Результаты не противоречат ранее опубликованным, и во многом дополняют экспериментальные данные по этой теме.

Установлена согласованность результатов исследования с данными, представленными в независимых источниках и полученными при изучении природных импактных алмазов Попигайской астроблемы, исследовании их свойств и взглядов на механизмы их образования.

Личный вклад соискателя. Автором проведен детальный анализ существующей научной литературы по тематике диссертации. На основании проведенного анализа соискатель сформулировал цель исследования и задачи, актуальность которых не вызывает сомнения. Для решения поставленных задач автором лично были разработаны методики проведения экспериментов и уникальные подходы к анализу образцов после экспериментов. Разработанные автором методики позволили ему провести широкий спектр экспериментальных и аналитических исследований при высоких давлениях и температурах, направленных на решение поставленной цели и задач. При участии автора получены новые результаты по кристаллизации алмаза в системе железо – сера–углерод при высоких Р-Т параметрах, а также по наращиванию кубической фазы

углерода (алмаза) на лонсделитсодержащие импактные алмазы Попигайской астроблемы в системе Fe-Ni-C при высоких Р-Т параметрах. Им детально изучено взаимодействие подложки импактного алмаза с новообразованными кристаллами алмаза и показано зональное строение перехода между ними. Доказано, что нарастание кристаллов кубической фазы (алмаза) на фрагменты импактных лонсдейлитсодержащих алмазов происходит одновременно из разных центров зародышебразования с образованием незакономерных сростков, при этом ориентация формирующих сросток кристаллов алмаза, зависит от исходного содержания лонсдейлита в затравочном кристалле алмаза. В ходе работы автором опубликовано 6 статей, входящих в список ВАК, получен патент РФ; результаты исследований доложены и апробированы на российских и зарубежных конференциях.

На заседании 27 сентября 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Карповичу Захару Алексеевичу учёную степень кандидата геолого-минералогических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 9 докторов наук по специальности 25.00.05, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» - 15, «против» - 1, «недействительных бюллетеней» - 0.

И. о. председателя диссертационного совета
академик РАН

Н.П. Похilenко

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.г.-м.н.

О.Л. Гаськова

29.09.2022 г.

