

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
Геологии и геохимии им. академика  
А.Н. Заварицкого, Уральского отделения  
Российской академии наук  
профессор РАН, д.г.-м.н.  
**Д.А. Зедгенизов**  
«18» января 2024 г.



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**на диссертационную работу Зубова Александра Анатольевича  
«МИНЕРАЛОГИЯ РАСПЛАВНЫХ ИМПАКТИТОВ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук  
по специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические  
методы поисков полезных ископаемых**

Диссертационная работа Зубова Александра Анатольевича посвящена изучению минералогии различных расплавных импактитов Карской астроблемы. Цель исследования направлена на выяснение парастерезиса минералов в разновидностях расплавных импактитов Карской астроблемы.

Повышенный интерес к расплавным импактитам определяется тем, что они в недостаточной степени изучены и представляют собой наивысшей степени ударно-преобразованное вещество мишени, сохранившееся в пределах кратера. Расплавные импактиты являются потенциальными концентраторами космического вещества за счет тела ударника и рассматриваются как возможный источник прототипов новых материалов благодаря экзотическим условиям формирования. Рассмотрение минералогии кристаллической и аморфной составляющих, образовавшихся в результате импактогенеза из расплава, представляет фундаментальное значение для геологии. Карская астроблема является одной из наиболее крупных астроблем, расположена в Арктической зоне и позиционируется как уникальный для России сырьевой и модельный объект импактогенеза. Актуальность диссертационной работы заключается в том, что на примере Карской астроблемы решается фундаментальная задача исследования типоморфизма продуктов импактогенеза расплавного ряда (проводится систематизация и выделение разновидностей импактитов, их структурно-вещественная характеристика, детальный анализ многообразия минерального парастерезиса, условий и последовательности образования минералов и расплавов) и предлагается использование выявленных типоморфных особенностей при генетических реконструкциях астроблем и поиске крупных погребенных ударных структур.

Диссертационная работа состоит из словаря терминов и сокращений, введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения; представлена на 200 страницах, содержит 63 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 332 наименований.

**В первой главе** (21 страница) проводится обзор литературных источников, отражающих состояние изученности расплавных импактитов: кратко описаны условия плавления вещества при ударном процессе, сопоставлены две российские и современная международная классификации импактитов, детально изложены известные данные об импактных стеклах и высокобарных минералах образцов астроблем и экспериментальных исследований. По ходу изложения главы выделены актуальные вопросы импактогенеза, разобраны терминологические различия и противоречия, сопоставлены существующие классификации и обоснован выбор объектов для диссертационной работы.

**Вторая глава** (24 страницы) посвящена обзору степени изученности Карской астроблемы по литературным данным – рассмотрена общая история обнаружения и исследования Карской астроблемы, вопросы генезиса пород, определения возраста импактного события, эволюции и характеристики вещества, приведено описание геологического строения кратера, проявленных импактитов и их состава, представлены полученные ранее данные о расплавных импактитах. Литературный обзор в первой и второй главах выполнен по российским и зарубежным источникам в достаточной мере подробно для постановки и решения актуальных для работы задач.

**В третьей главе** (4 страницы) кратко описаны пробоподготовка, методы и методики исследования образцов расплавных импактитов.

**В четвертой главе** (36 страниц) посвящена характеристике геологических тел (массивные, жильные и фрагменты-бомбы) расплавных импактитов Карской астроблемы по данным микроскопии, микроанализа, масс-спектрометрии, рентгеновской дифракции и мокрой химии: приводится общая, структурно-вещественная, петро- и геохимическая, характеристика тел, микроструктура, соотношение кристаллической и аморфной компонент расплавных импактитов, а также условия солидификации.

**Пятая глава** (60 страниц) посвящена характеристике минерально-фазового состава геологических тел расплавных импактитов Карской астроблемы по данным микроскопии, микроанализа, колебательной спектроскопии, рентгеновской дифракции и томографии: определен фазовый состав, описаны минералы реликтового, синимпактного и постимпактного генезиса, определен их химический состав и текстурно-структурные особенности, парастерезис минералов, определена последовательность синимпактного минералообразования, также проведено детальное исследование аморфного и кристаллического  $\text{SiO}_2$ , приведены новые индикаторные находки кристаллических и аморфных фаз, предложено описание условий и механизмов образования выделенных фаз.

**В заключении** резюмируется, что микроструктурные особенности расплавных импактитов Карской астроблемы (массивные, жильные и фрагменты-бомбы) отражают специфику их образования; петро- и геохимическая специфика массивных и жильных тел демонстрирует слабую вариативность в отличие от фрагментов-бомб; подчеркивается, что парастерезис расплавных импактитов представлен реликтовыми, синимпактными и постимпактными минералами и фазами, детальный анализ которых позволили установить последовательность их образования, а спектроскопическая характеристика диаплектовых и силикатных стекол – установить особенности степени их полимеризации.

**В работе представлено три защищаемых положения:**

1. Крайними членами микроструктурного ряда проксимальных расплавных импактитов Карской астроблемы по соотношению кристаллической и аморфной компонент являются высокобарные безводные коэзитсодержащие высоко восстановленные жильные импактные стёкла с троилитом и низкобарные существенно обводнённые криптокристаллические массивные импактиты.

2. Минералообразование из негомогенного импактного расплава в проксимальных расплавных импактитах Карской астроблемы происходит в следующей последовательности – 1) в массивных расплавных импактитах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевой шпат; 2) в жильных телах: циркон – коэзит – лешательерит – смектит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло, пирротин; 3) в бомбах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевой шпат.

3. Диаплектовые и расплавные силикатные импактные стёкла Карской астроблемы характеризуются аналогичными структурными признаками – высокой степенью полимеризации, присутствием четырёхчленных и многочленных колец  $\text{SiO}_4$ . Диаплектовые стёкла отличаются постоянным присутствием трёхчленных колец  $\text{SiO}_4$ .

Все защищаемые положения представляются обоснованными и полностью следуют из содержания диссертации. Доказательства **первого** защищаемого положения включают в себя определение кристаллической и аморфной компонент в расплавных импактитах по

данным рентгенодифракционного анализа, а также исследование минералогии расплавных импактитов. **Второе** защищаемое положение сформулировано на основании комплексной диагностики минералов их морфологических особенностей и пространственных взаимоотношений с учетом их референтных температур плавления и кристаллизации из расплавов. **Третье** защищаемое положение основано на исследовании диаплектового и расплавного силикатного стекла с помощью КР-спектроскопии.

**Достоверность** результатов, представленных в диссертации, не вызывает сомнений. Она подтверждается применением современного аналитического оборудования, описанного с указанием операционных параметров и использованных для градуировки и контроля качества стандартных образцов. Работа хорошо иллюстрирована, содержит значительное количество фотографий обнажений, образцов, шлифов, а также BSE- и CL-изображений. Автореферат отражает содержание и важнейшие выводы диссертации.

**Личный вклад автора** заключается в участии в экспедиционных работах, в документации обнажений и отборе проб расплавных импактитов Карской астроблемы. В основу работы положен большой фактический материал, представленный в виде коллекции из 127 образцов расплавных импактитов, отобранных автором в ходе полевых работ в 2017, 2021 гг. Автором выполнялись работы по изучению расплавных импактитов, в том числе пробоподготовка к аналитическим работам, изучение шлифов методом оптической микроскопии, а также обработка и интерпретация данных, полученных различными аналитическими методами. Автором самостоятельно сформулированы основные положения диссертации, выводы и заключение.

**Научная новизна** работы заключается в том, что для Карской астроблемы впервые выполнена детальная комплексная характеристика и проведено сравнение структурно-вещественных особенностей трёх типов тел расплавных импактитов, что позволило выявить различия в условиях солидификации импактного расплава. Кроме того, определён минеральный состав основных компонентов и аксессуаров, установлено соотношение кристаллической и аморфной компонент импактитов. Впервые для Карской астроблемы установлена последовательность минералообразования для разновидностей расплавных импактитов, а также выявлены структурные различия в диаплектовых и расплавных стёклах. **Практическая значимость** работы обусловлена тем, что полученные данные востребованы при изучении крупных импактных структур, с которыми могут быть связаны различные виды полезных ископаемых. Кроме того, для создания новых материалов в качестве прототипов предложено использовать обнаруженный тип силикатных стёкол с отсутствием трёхчленных колец  $\text{SiO}_4$ .

**Основное достоинство** диссертационной работы состоит в комплексности применяемых методов, охвате определяемых параметров и уникальности объекта. Необходимо отметить оригинальность работы в детальности характеристики силикатных стекол (микроструктура, степень полимеризации  $\text{SiO}_4$ -тетраэдров и условия формирования) и определении последовательности образования минералов из неомогенного импактного расплава на основе микроструктуры и температур плавления минералов, а также в выстраивании ряда по соотношению кристаллической и аморфной компонент в импактных расплавах. Особый интерес результаты диссертационной работы вызывают в связи с труднодоступностью Карской астроблемы, сложностью вывоза значительных объемов материала для всесторонней их характеристики, что успешно было осуществлено с участием автора диссертации и позволило выполнить детальные исследования.

**После ознакомления авторов отзыва с диссертацией осталось несколько вопросов и замечаний:**

1. Насколько полученные данные для расплавных импактитов Карского кратера применимы к другим кратерам в плане их зависимости от геологического строения мишени, энергии, размера и состава ударника? Иными словами, в каких кратерах могут быть схожие по характеристикам расплавные импактиты?

2. Автор зафиксировал, что жильные тела коричневого цвета содержат существенно в большем количестве восстановленное железо, чем в импактитах массивного и жильного типа. Каковы предположительные причины реализации восстановительных условий и их отличия в расплавных импактитах?

3. Можно ли на основании полученных данных предложить применение импактных расплавов, силикатных или алюмосиликатных стекол в промышленности? Если да, то какие?

4. Какие признаки выделения фрагментов расплава (бомб) в обнажениях являются надежными?

5. В тексте диссертации и автореферате под термином «микронзондовый анализ» подразумевается сканирующая электронная микроскопия с использованием энергодисперсионного спектрометра, что не является общепринятым. В области микроанализа под этим термином подразумевается рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализ с использованием волновых спектрометров и применением стандартных образцов для измеряемых элементов. Автору стоило бы использовать другой термин или сделать пояснение, что именно подразумевается под использованным термином, поскольку метрологические характеристики методов значительно отличаются.

6. Автор не приводит данные о погрешностях измерения содержания химического состава по данным сканирующей электронной микроскопии с использованием ЭДС и РЗЭ по данным ИСП-МС, что создает препятствие для понимания значимости разброса и перекрывания полей содержаний на диаграммах и в таблицах, но не является критичным для сделанных выводов.

7. Полученные данные по составу основных компонентов и лантаноидов в расплавных импактитах нуждаются в более тщательной интерпретации. Кажется логичным и закономерным сопоставить составы основных компонентов и РЗЭ в расплавных импактитах и в породах мишени. Возможно ли это сделать?

8. Таблица 4.5 с содержанием Co, Ni, Ir, Pt, Au в расплавных импактитах приведена без комментариев в тексте. Кроме того, отсутствует сопоставление результатов исследования геохимических особенностей расплавных импактитов с более ранними исследованиями, которые приведены во второй главе.

9. Интенсивности компонентов КР-спектров силикатных стекол сопоставимы с уровнем шума, в некоторых спектрах присутствие той или иной линии не очевидно (диссертация, рис.5.32, 5.35: автореферат, рис.9). Использовал ли автор диссертации количественные критерии выделения той или иной линии на фоне шума в спектре с использованием математической обработки? Каким образом вычиталась фоновая линия при обработке спектров? Почему при разложении спектров использовалось разное количество линий? Являлась ли фотолюминесценция препятствием при регистрации КР-спектров?

10. Автором значительное внимание уделяется вопросу полимеризации силикатных стекол посредством анализа КР-спектров, при этом количественные характеристики параметров разложения не приводятся. Для сделанных выводов это не требуется, но построение диаграмм взаимосвязи количественных параметров КР-спектров расплавных, диалектовых и стандартных силикатных стекол позволило бы выработать более объективные количественные критерии типизации и диагностики импактных стекол.

11. Температура плавления минерала в значительной степени зависят от внешнего давления. При определении последовательности образования минералов из неомогенного импактного расплава автором приводятся температуры плавления минералов по данным статических экспериментов, которые, могут применяться к импактиту лишь на качественном уровне. Опора на данные ударных экспериментов и фазовые диаграммы позволили бы получить больше деталей об условиях образования и РТ-тренде в последовательности образования минералов. При определении последовательности образования минералов ключевым фактором являлись микроструктура и

пространственные отношения минералов или температуры плавления минералов в статических условиях?

12. Методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) подтверждено присутствие троилита и приведены параметры его элементарной ячейки. Эти параметры были измерены методом EBSD или взяты из карточки базы данных?

13. Диссертация содержит опечатки и ошибки, которые не затрагивают сущности диссертации и не умаляют ее значимости.

Необходимо отметить, что замечания не являются критическими и не влияют на общее позитивное впечатление от диссертации; многие из замечаний носят дискуссионный или редакционный характер. В целом диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне, выглядит логически связанным и завершенным научным исследованием. Работа А.А. Зубова вносит значимый вклад в области минералогии ультравысоких давлений и температур, исследования импактогенеза как явления, и, несомненно, является одной из ключевых работ в истории изучения Карской астроблемы.

Диссертация содержит результаты оригинальных работ. Основные результаты опубликованы в 9-ти рецензируемых статьях из перечня ВАК и Scopus, докладывались на научных конференциях. Исследования проводились в рамках госбюджетной темы ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и были поддержаны двумя грантами РФФИ и одним РНФ.

**Представленная квалификационная работа Зубова А.А. является законченным научным исследованием и отвечает требованиям существующего Положения ВАК о присуждении ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.**

Замятин Дмитрий Александрович  
канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией  
Лаборатория физических и химических методов исследования  
Федеральное бюджетное учреждение науки  
Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого  
Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН)  
620110, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, д. 15, <http://www.igg.uran.ru/>

Я, Замятин Дмитрий Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

18 января 2024

Замятина Дарья Александровна  
канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник  
Лаборатория физики минералов и функциональных материалов  
Федеральное бюджетное учреждение науки  
Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого  
Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН)  
620110, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, д. 15, <http://www.igg.uran.ru/>

Я, Замятина Дарья Александровна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

18 января 2024

Отзыв на диссертационную работу Зубова А.А. заслушан и одобрен на заседании ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН), протокол №1 от 18 января 2024 года.

Председатель ученого совета ИГГ УрО РАН,  
Доктор геолого-минералогических наук Д.А. Зедгенизов



Ученый секретарь,  
кандидат геолого-минералогических наук И.А. Готтман

