

*На правах рукописи*



ЗУБОВ Александр Анатольевич

**МИНЕРАЛОГИЯ РАСПЛАВНЫХ ИМПАКТИТОВ КАРСКОЙ  
АСТРОБЛЕМЫ**

Специальность 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия,  
геохимические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Сыктывкар – 2023

Работа выполнена в Институте геологии имени академика Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

**Научный руководитель:** **Шумилова Татьяна Григорьевна**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией минералогии алмаза Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Сыктывкар

**Официальные оппоненты:** **Афанасьев Валентин Петрович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений Института геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск

**Бадюков Дмитрий Дмитриевич**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией метеоритики и космохимии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 7 февраля 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а  
e-mail: amosova@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, адрес сайта: <http://www.igc.irk.ru/ru/zashchita>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.х.н.



А.А. Амосова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Импактный метаморфизм очень многогранен, характеризуется формированием обширного разнообразия импактитов (Масайтис, 1980; Stöffler, Namann et al., 2018; Фельдман, Глазовская, 2018; и др.). Группа расплавных импактитов представляет особый интерес, поскольку в ходе их формирования вещество пород мишени претерпевает наиболее значительные изменения – плавление с последующей солидификацией с разной степенью кристаллизации в зависимости от условий остывания. В гигантских кратерах в зоне контакта ударника с породами мишени температуры могут достигать 10000 °С и давления до первых сотен ГПа (Melosh, 1989; Langenhorst, Deutsch, 1994; Вишневецкий, 2007; Stöffler, Namann et al., 2018; и др.), что существенно превышает параметры регионального и контактового метаморфизма и приводит к плавлению и частичному испарению вещества мишени и тела самого ударника. Согласно современной международной классификации, импактиты, образовавшиеся из импактного расплава, подразделяются на расплавные импактиты богатые обломками, бедные обломками и безобломочные, а также выделяются вариации с разным содержанием аморфной компоненты (Stöffler, Namann et al., 2018).

Расплавные импактиты Карской астроблемы являются в разной степени изученными природными образованиями, возникшими из ударного расплава, обладающими различными структурно-текстурными, химическими и минералогическими особенностями. Массивные расплавные импактиты (тагамиты) Карской ударной структуры ранее изучались многими исследователями (Масайтис и др., 1980; Мащак, 1990; Юшкин, Лысюк, 2001; Мальков, Андреев, 2010; Фельдман, 2005; Фельдман, Глазовская, 2018; и др.). Были описаны формы, текстурно-структурные характеристики, петрохимические особенности, цветовая характеристика, кристаллы пироксена в аморфной матрице, отмечена разная степень изменения стёкол, сопоставлены стёкла Карской и Усть-Карской астроблем, а также выделен ряд типов и разновидностей стёкол (Селивановская и др., 1990; Гурович, 1993; Vadjukov et al., 1998; Мальков, Андреев, 2010). Также, упоминались лентовидные стёкла разной окраски, которые относили к тагамитам (Мащак, 1989; Мальков, 2010), однако данные тела не были ранее детально изучены. Третья разновидность расплавных импактитов Карской астроблемы, представленная бомбами размером первые десятки сантиметров в поперечнике, также является слабо изученной (Vadjukov et al., 1989; Кашкаров, Назаров и др., 2000; Юшкин, Лысюк, 2001).

В настоящее время отсутствует детальный анализ многообразия минерального парагенезиса и сопоставление структурно-вещественных особенностей гетерогенных тел расплавных импактитов на микроуровне с

применением современных методов и подходов. Поскольку крупные астроблемы часто являются источниками полезных ископаемых (Grieve, Masaitis, 1994; Koeberl, 2020), то развитие направления импактитогенеза имеет важное не только фундаментальное, но и практическое значение, включая вопросы систематизации, специфики образования, анализ структурно-вещественных характеристик и выявление признаков разновидностей импактитов для потенциального использования в поисковых технологиях, что особенно важно для обнаружения и изучения крупных погребенных ударных структур. Кроме того, повышенный интерес к расплавленным импактитам вызван тем, что они являются потенциальными концентраторами космического вещества за счет тела ударника.

**Цель работы:** выяснение парагенезиса минералов в разновидностях расплавленных импактитов Карской астроблемы.

**Задачи исследований:**

- 1) изучение геологического положения, текстурно-структурных, минералого-петрографических особенностей массивных, жильных тел и бомб расплавленных импактитов Карской астроблемы;
- 2) анализ петро- и геохимических особенностей разновидностей;
- 3) микроструктурная и минералогическая характеристика матрицы;
- 4) определение соотношения кристаллической и аморфной компонент в разновидностях расплавленных импактитов;
- 5) анализ минеральных ассоциаций и выявление последовательности минералообразования;
- 6) выявление минералогической специфики силикатной компоненты в жильных расплавленных импактитах;
- 7) спектроскопическая характеристика и сравнение силикатных стекол твердофазного и закалочного механизмов формирования;

**Научная новизна.** Впервые для Карской астроблемы выполнена детальная комплексная характеристика структурно-вещественных особенностей трёх типов тел расплавленных импактитов, определён минеральный состав основных компонентов и аксессуаров, установлено соотношение кристаллической и аморфной компонент импактитов. Впервые для расплавленных массивных, жильных тел импактитов и бомб Карской астроблемы выполнена микроструктурная характеристика их матрицы. Проведён сравнительный анализ вещественных и структурно-текстурных особенностей тел расплавленных импактитов, что позволило выявить различия в условиях солидации импактного расплава. Установлена последовательность минералообразования для разновидностей расплавленных импактитов Карской астроблемы. Выявлены структурные различия в диаплектовых и расплавленных стёклах.

**Практическая значимость работы.** Проведена детальная характеристика трёх типов тел расплавных импактитов Карской астроблемы как одного из уникальных объектов импактного метаморфизма, проявленного в гигантских масштабах. Полученные данные могут быть использованы при изучении крупных импактных структур, являющихся потенциальными объектами на различные виды полезных ископаемых. Расплавные импактиты могут содержать в себе существенную долю космического вещества, в связи с этим они имеют особое значение среди других импактитов. Впервые выявлен тип силикатных стёкол с отсутствием трёхчленных колец  $\text{SiO}_4$ , который может быть использован как прототип для создания новых материалов.

**Фактический материал и методы исследований.** Каменный материал отобран автором в естественных обнажениях на рр. Анарога, Кара, Хановой-Яха и руч. Кердорсашор в 2017, 2021 гг. В ходе работы были исследованы 127 образцов расплавных импактитов. Часть каменного материала предоставлена Т.Г. Шумиловой в количестве 7 образцов (материал полевого сезона 2015 г.).

Методы исследования расплавных импактитов включают: наблюдение морфологии геологических тел расплавных импактитов с фото- и видеодокументацией коренных обнажений, в том числе с использованием квадрокоптера, макроскопическое изучение штуфных образцов и пришлифованных пластин, микроскопическое изучение петрографических шлифов (~100 шт.), спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) (200 спектров), инфракрасная спектроскопия (ИКС) (24 спектра), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) (24 анализа), силикатный анализ на 14 компонентов (11 анализов), рентгеновская дифрактометрия порошковых проб (30 анализов), рентгеновская вычислительная микротомография (РВТ) (4 образца), термический анализ (24 анализа), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) (> 700 изображений) и цветная катодолуминесценция (>100 изображений), энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) (>800 анализов).

**Личный вклад автора.** В основу диссертации положены результаты работ, выполненных диссертантом в период 2017 - 2023 гг в лаборатории минералогии алмаза ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Автор принимал участие в экспедиционных работах на Карской астроблеме в 2017 и 2021 гг., лично производил фото- и видеодокументацию обнажений, в том числе с использованием квадрокоптера, геологическое описание обнажений, отбор проб расплавных импактитов Карской астроблемы. Работы по изучению расплавных импактитов выполнялись лично автором, в том числе – отбор мономинеральных фракций, пробоподготовка к аналитическим работам, изучение шлифов методом оптической микроскопии, обработка и интерпретация данных СЭМ, КР и ИК спектроскопии, рентгеновской

дифрактометрии, рентгеновской вычислительной микротомографии. Основные положения диссертации, выводы и заключение сформулированы автором самостоятельно.

**Защищаемые положения:**

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

2. Минералообразование из неомогенного 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 – коэсит – 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  $\text{SiO}_4$ .

**Публикации и апробация работы.** По результатам исследований лично и в соавторстве опубликовано 23 работы, в том числе 9 статей в изданиях рекомендуемых ВАК, 7 материалов докладов на научных конференциях.

Основные результаты работы докладывались на научных конференциях: 20-я научная конференция «Геолого-археологические исследования в Тимано-Североуральском регионе» (Сыктывкар, 2017); Новое в познании процессов рудообразования (Москва, 2017); Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения - 2018) (Сыктывкар, 2018); Человек и окружающая среда (Сыктывкар, 2021); XI Всероссийская молодежная научная конференция «Минералы: строение, свойства, методы исследования»; Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: 30-я научная конференция; IV Всероссийская (XIX) молодежная научная школа-конференция «Молодежь и наука на Севере – 2022»; Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2022).

**Структура и объем работы.** Работа состоит из словаря терминов и сокращений, введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения

общим объёмом 200 страниц, содержит 63 рисунка, 15 таблиц, список литературы включает 332 наименования.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность за организацию полевых работ, постоянную помощь, внимание, научные консультации и методические рекомендации научному руководителю д.г.-м.н. Т.Г. Шумиловой; руководству ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в лице директора к.г.-м.н. И.Н. Бурцева за создание благоприятных условий при проведении исследований.

Большая благодарность выражается акад. А.М. Асхабову, к.г.-м.н. В.П. Лютоеву, д.г.-м.н. В.И. Ракину, д.г.-м.н. Е.А. Голубеву, д.г.-м.н. С.К. Кузнецову, к.г.-м.н. И.Х. Шумилову, к.г.-м.н. А.В. Журавлеву, д.г.-м.н. О.Б. Котовой и другим сотрудникам Института за обсуждение работы, критические замечания и ценные указания.

Автор выражает признательность за помощь в проведении аналитических работ к.г.-м.н. С.И. Исаенко (спектроскопия КР), Е.В. Сусол и А.Е. Шмырову (техническое содействие в пробоподготовке), Е.М. Тропникову (СЭМ и термический анализ), Б.А. Макееву (рентгенофазовый анализ), М.Ф. Самотолковой (инфракрасная спектроскопия), А.А. Штырляевой за выполнение рентгенотомографической съёмки, к.г.-м.н. А.В. Журавлеву за помощь в обработке данных вычислительной рентгеновской микротомографии, к.г.-м.н. Ю.С. Симаковой (рентгенофазовый анализ глин), А.С. Шуйскому и В.А. Радаеву (СЭМ, цветная катодolumинесценция), С.В. Бурдюх и другим сотрудникам аналитического центра Института геологии Карельского научного центра за выполнение анализов масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Особая благодарность выражается коллективу лаборатории минералогии алмаза за помощь на всех этапах проведения работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФ № 17-17-01080, проектов РФФИ № 17-05-00516, № 20-35-90065 (аспиранты), государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** кратко рассмотрен механизм и условия формирования расплавных импактитов при импактитогенезе. Проанализированы отечественные и зарубежные классификации импактитов.

**Вторая глава** посвящена истории изучения Карской астроблемы с точки зрения геологии, петрологии, минералогии, геофизики, петро- и геохимии Карской астроблемы. Анализируется история изучения импактитов в структуре коптогенного комплекса, включая зювиты, массивные расплавные импактиты (тагамиты), жильные тела (жильные тагамиты), бомбы, а также продукты постимпактного преобразования импактитов. Рассмотрены

результаты изучения минералогия продуктов импактитогенеза, описанная предыдущими исследователями.

**В третьей главе** описывается методика исследований, включающая полевые исследования с детальным описанием расплавных импактитов, фото- и видео документацией обнажений, изучением морфологии, пространственных взаимоотношений тел расплавных импактитов с зювитами, макроскопическое описание, опробование и описание аналитических методов.

**В четвёртой главе** представлены общая характеристика геологических тел трёх типов расплавных импактитов, их структурно-вещественные особенности, включая петро- и геохимическую характеристику, анализ соотношения кристаллической и аморфной компонент, описание микроструктур матрицы расплавных импактитов.

**Пятая глава** посвящена минералогии тел расплавных импактитов Карской астроблемы, приводятся данные рентгеновской дифрактометрии, рентгеновской томографии и комплекса локальных методов. Диагностированы и описаны минералы реликтового, синимпактного и постимпактного генезиса в трёх типах тел, установлена последовательность синимпактного минералообразования, выяснены особенности силикатной компоненты.

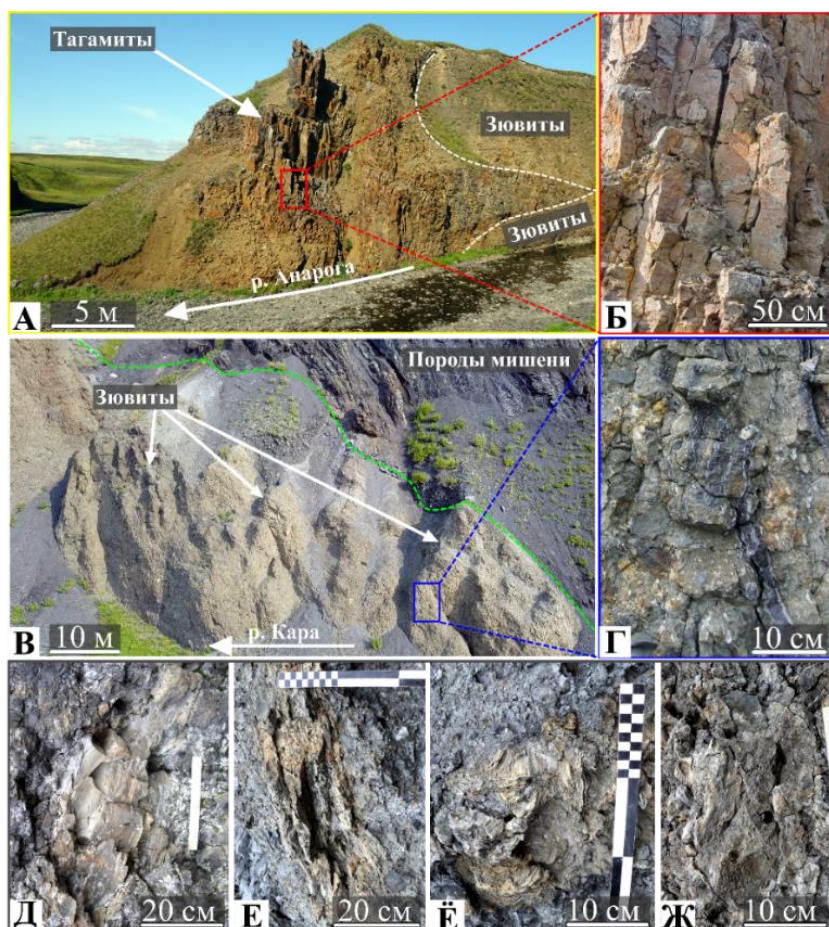
## **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

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

*Массивные расплавные тела* на р. Анарога представлены плащеобразным телом в тесном пространственном взаимоотношении с зювитом (рис. 1а, б). *Жильные тела* расположены в коренном выходе зювитов на правом и левом берегах р. Кара недалеко от устья руч. Тогорей (рис. 1в, г). Цвет стёкол преимущественно серый, чёрный с фиолетовым оттенком. *Жильные тела коричневого цвета* впервые обнаружены в обнажении зювитов на левом берегу р. Кара выше по течению от устья руч. Тогорей. Цвет стекла, по всей видимости, вызван интенсивным окислением матрицы с поверхности жильного тела. В тонком срезе коричневые жильные тела практически прозрачные и бесцветные. *Бомбы* имеют иную геологическую позицию по сравнению с массивными и жильными телами – они присутствуют в зювитах практически повсеместно в пределах Карской астроблемы, их размеры достигают 0.5 м в поперечнике. *Бомбы* относительно довольно разнообразны



морфологически и характеризуются в обнажениях субизометричной и существенно удлинённой линзовидной формой видимого сечения (рис. 1д-ж).



**Рисунок 1.** Коренной скальный выход массивного расплавленного импактита на р. Анарога (А-Б), зювитовый массив (В) с жильными телами вертикального направления (Г) на р. Кара и бомбы в зювите на р. Анарога (Д-Ж).

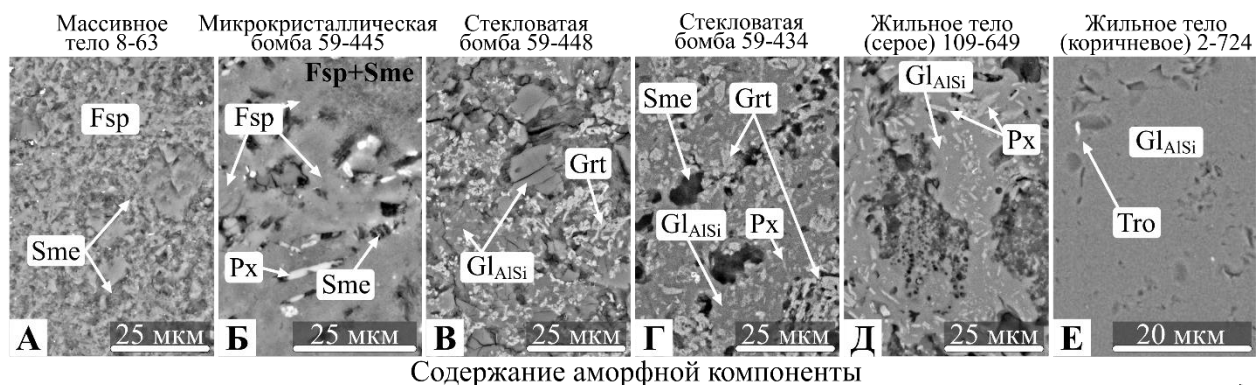
**Соотношение кристаллической и аморфной компонент** расплавленных импактитов определено по данным рентгенодифракционного анализа как отношение суммы площадей рефлексов кристаллической компоненты к площади аморфного гало на дифрактограммах по методике количественной оценки с помощью рентгенофазового анализа по формуле:  $C = I_C / (I_A + I_C) * 100$ , где  $C$  – кристалличность (%),  $I_C$  – интегральная интенсивность кристаллической фазы (сумма площадей всех пиков кристаллических фаз),  $I_A$  – интегральная интенсивность аморфной фазы (Rowe et al., 2012). Установлены интервалы соотношений для трёх типов расплавленных импактитов следующие: массивные тела – 80-100%, жильные тела серого цвета – <20%, жильные тела коричневого цвета – <10%, расплавленные бомбы – 10-100% (погрешность составляет ~10%).

**Микроструктурная характеристика матрицы.** Массивные тела на рр. Анарога и Кара по данным СЭМ обладают неоднородной микроструктурой с микрокристаллической матрицей полевошпатового состава и варьирующимся характером распределения смектитовой компоненты (рис. 2а).

**Жильные тела** с коэситом характеризуются только расплавленной микроструктурой с преимущественно стекловатой матрицей

алюмосиликатного состава с микрокристаллами пироксена (авгит) (рис. 2д). В матрице присутствуют силикатные обособления (капли состава  $\text{SiO}_2$ ) со скоплениями в центральных частях монокристаллического коэсита. Жильные тела коричневого цвета отличаются относительной чистотой слагающей их аморфной матрицы (рис. 2е), безводностью (по данным термического анализа), прозрачностью в срезе, редкими включениями реликтов пород мишени, а также включениями пирротинов в виде округлых обособлений и обломков (рис. 4).

*Расплавные бомбы* обладают несколькими микроструктурами: преимущественно стекловатой с включениями удлинённых микрокристаллов пироксена, агрегатов граната и миндалинами заполненными смектитом (рис. 2в, г); криптокристаллической полевошпатовой микроструктурой, «затушёванной» смектитовой компонентой (рис. 2б); преимущественно смектитовой микроструктурой с рыхлой и пористой основной массой, главным образом состоящей из глинистых/смектитовых минералов (рис. би).



**Рисунок 2.** Микроструктурный ряд основной массы (матрицы) трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы по соотношению кристаллической и аморфной компонент (данные СЭМ, режим BSE).

По данным *рентгеновской дифрактометрии* массивные расплавные импактиты и жильные тела с коэситом образуют характерные группы, в каждой из которых вариативность минеральных фаз на дифрактограммах минимальна. Для *массивных тел* отмечаются рефлексы альбита и анортита, в некоторых случаях отмечается слабое аморфное гало. *Дифрактограммы жильных тел* характеризуются заметно более интенсивным гало, указывающим на наличие значительной доли аморфной составляющей, и присутствием рефлексов слюд, глинистой компоненты, кварца, альбита, кальцита, пироксена. *Дифрактограммы расплавных бомб* существенно более разнообразны, выделяются существенно стекловатые разновидности по наличию аморфного гало и представленные преимущественно смектитом. Для отдельных бомб характерно присутствие на дифрактограммах рефлексов

анортита, ортоклаза, альбита, кварца, кальцита, иногда граната. Практически всегда наблюдается присутствие смектитовой компоненты.

**Специфика кристаллической компоненты.** Минералы трёх типов расплавных импактитов были разделены на реликтовые, синимпактные и постимпактные. Ниже представлена таблица, в которой обозначены минеральные ассоциации расплавных импактитов (табл. 1), а также приведено описание наиболее важных и ранее менее изученных минералов в алфавитном порядке.

**Таблица 1.** Минеральные ассоциации расплавных импактитов Карской астроблемы.

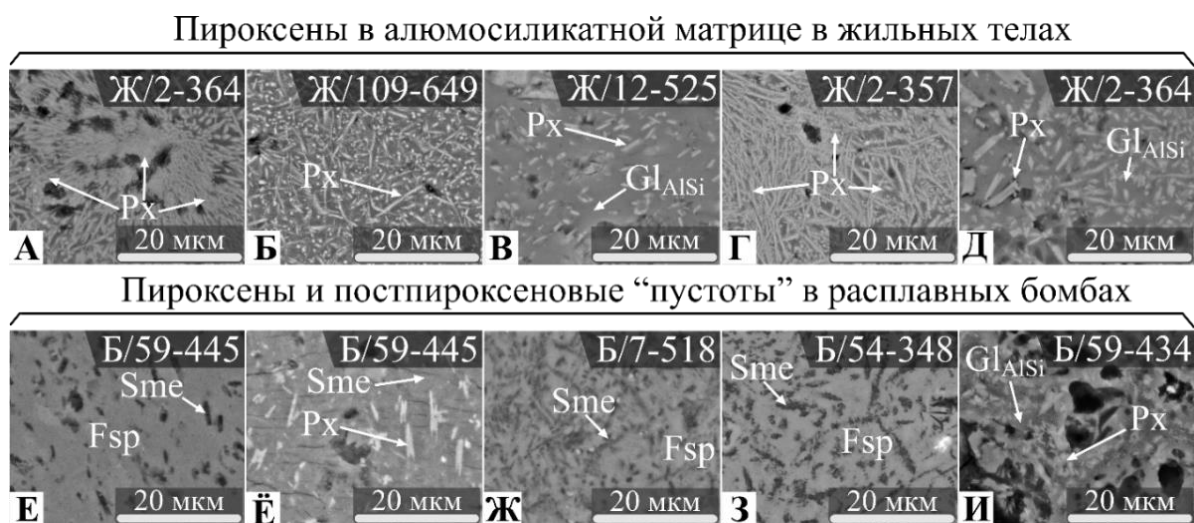
		Жильные тела	Массивные тела	Расплавные бомбы	
Минеральные ассоциации	Реликтовые	Циркон (2550°C)* Хромит (2180 °C) Родолит (~2000°C) Кварц (1710 - 1728°C) Полевой шпат (~1200°C) Пирротин (~1200°C)	Кварц (~1710°C) Полевой шпат (~1200°C) Магнетит (~1591°C) Циркон (обломочный, деформированный) (~2550°C) Сфалерит	Родолит (~2000°C) Титатнит (~1127-1386°C) Монацит (~1900–2100°C) Анаказ (?) (~1870°C)	
	Синимпактные	Циркон (2550°C) Коэсит (2400-2700°C) Шпинель Лешательерит (~1700°C) Ильменит (~1300°C) Смектит** Пироксен (~1200°C) Стекло алюмосиликатное (~1200°C) Пирротин (~1200°C)	Лешательерит (~1700°C) Ильменит (~1300°C) Стекло алюмосиликатное (~1120-1550°C) Полевой шпат (~1200°C)	Лешательерит (~1700°C) Пироксен (~1550°C) Стекло алюмосиликатное (~1200°C) Полевой шпат (КРС) (~1200°C)	
	ПТТ				
	Пост-импактные	Пирит Кальцит Цеолиты Смектит Барит	Пирит Кристаллит Цеолиты Смектит Халцедон Гематит	Барит Кальцит	Пирит Кальцит Цеолиты Пирохлор

Примечание: \* – в скобках указана температура плавления, \*\* – потенциально сформирован из импактного расплава, ПТТ – продукты твердофазной трансформации.

*Коэсит (синимпактный).* Коэсит в диаплектовом стекле был детально исследован сотрудниками института геологии Коми НЦ УрО РАН (Лютюев, Лысюк, 2015). Расплавная разновидность коэсита в импактитах Карской астроблемы была выявлена в жильных телах на р. Кара (Шумилова и др., 2018; Shumilova, Zubov et al., 2020). Коэсит в жильных расплавных телах находится в тесном пространственном взаимоотношении с «каплями» стекла SiO<sub>2</sub> (рис. 8г-е). Помимо коэсита в «каплях» присутствуют каплевидные выделения

сметита. Морфология кристаллов коэсита колеблется от изометричной до удлинённой. По данным ПЭМ коэсит имеет монокристаллическую структуру, не содержит механических дефектов, характеризуется редкими двойниками, свойственными для ростового двойникования (Shumilova, Zubov et al., 2020).

*Пироксен (синимпактный)* в массивном теле обнаружен только на р. Кара (рис. 6г). В жильных образованиях микрокристаллы пироксена по данным КРС представлены авгитом (рис. 3а-д) (Shumilova et al., 2019). В бомбах пироксены сохранились только в стекловатой разновидности (рис. 3и), в микрополевошпатовой разновидности бомбы пироксены подвержены разрушению (рис. 3е, ж, з).

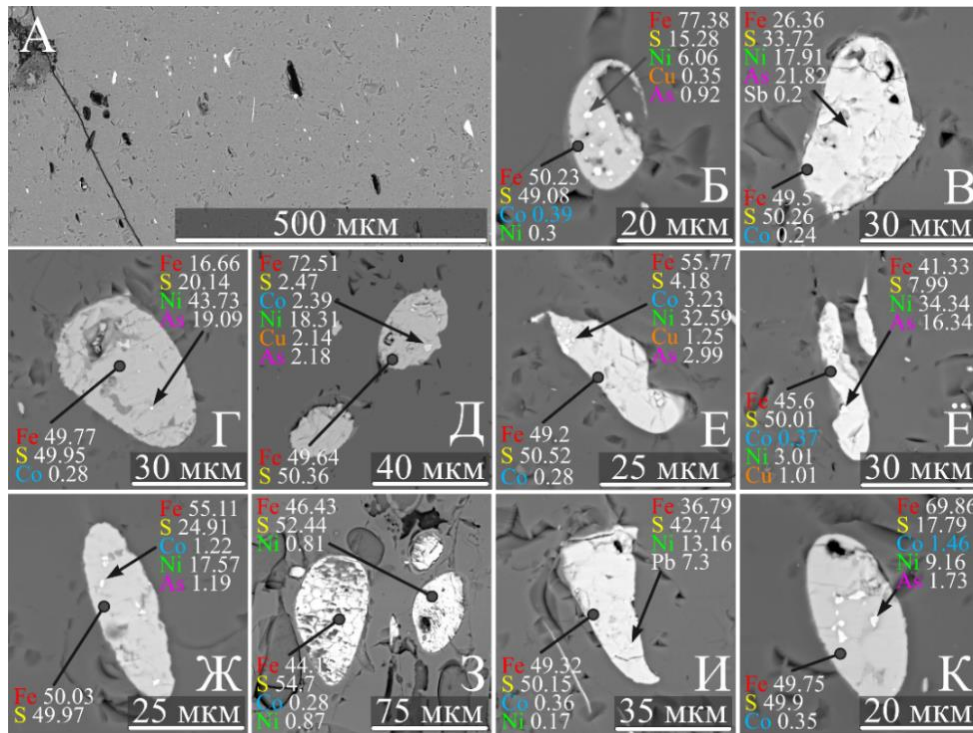


**Рисунок 3.** Пироксены в жильных телах и бомбах (А-Д, Ё, И), а также псевдоморфозы смектита по пироксену (Е, Ж, З) по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Sme – смектит, Px – пироксен, Fsp – полевошпат, Gl<sub>AlSi</sub> – алюмосиликатное стекло.

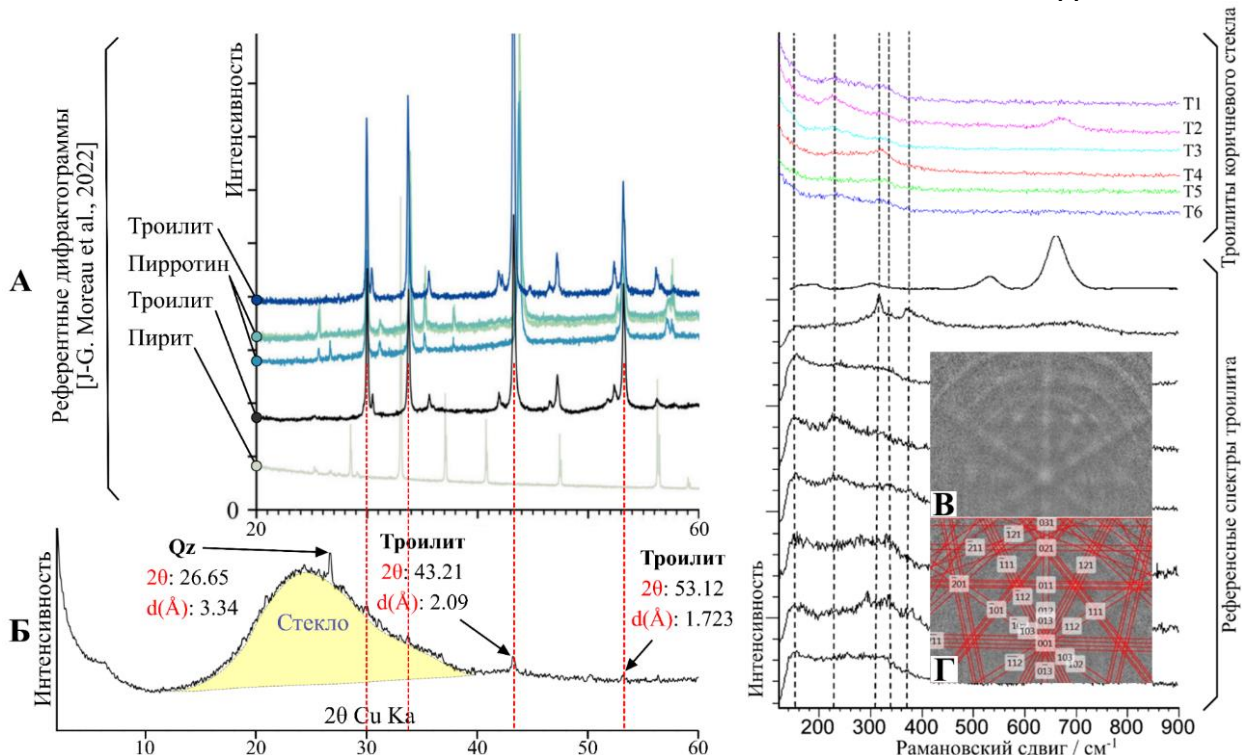
*Пирротин (троилит) (реликтовый и синимпактный)*. Обособления пирротинов в коричневых жильных телах представлены обломками и округлыми выделениями размером ~20 мкм с различным удлинением (рис. 4). Часто в пирротинах присутствуют сульфидные включения размерами в пределах первых микрометров. По данным рентгеновской дифрактометрии установлено присутствие троилита по наличию характерных рефлексов на углах  $2\theta$ :  $43.21^\circ$ ,  $53.12^\circ$ , что соответствует межплоскостным расстояниям для троилита согласно карточке дифракционного стандарта троилита [Joint Committee on Chemical Analysis..., 1950]. Спектры КР троилитов в целом сопоставимы с референтными спектрами природных троилитов (рис. 5а, б) [Avril et al., 2013]. Метод дифракции обратно рассеянных электронов также подтвердил присутствие троилита в коричневом стекле (рис. 5в, г).

*Титановые минералы (реликтовые и синимпактные)*. Выявлены три разновидности обособлений минералов титана: 1 – титанит с ильменитом, 2 – TiO<sub>2</sub> с ильменитом, 3 – самостоятельные обособления ильменита в том числе с грануляцией (рис. 6б, в, 7ё). В первых двух разновидностях титанит, либо в

некоторых случаях  $TiO_2$ , образуют центральную часть выделения с угловатой реликтовой морфологией. Ильменит образует вокруг центральной части обособления кайму с гранулярной морфологией.



**Рисунок 4.** Пирротины в алюмосиликатной матрице жильных тел коричневого цвета по данным СЭМ (режим BSE): А – алюмосиликатная матрица стекла, Б-К – пирротины, символ ● – точечный анализ преобладающего по объёму в выделении, символ → – точечный анализ ярких включений в пирротинах.



**Рисунок 5.** Рентгеновские дифрактограммы – эталонная (слева, А) [Moreau et al., 2022] и от порошковой пробы коричневого стекла (слева, Б), КР спектры троилита из жильных коричневых стёкол Карской астроблемы (Т1-Т6) в сравнении с референтными спектрами синтетического и природного троилитов по Avril и др. (справа) [2013], а также данные дифракции отражённых электронов для троилита в коричневом жильном стекле (справа, В) и интерпретация линий Кикучи по базе данных ICSD (справа, Г).

*Циркон (реликтовый и синимпактный).* Присутствие цирконов установлено в жильном и массивном расплавленных импактитах. В жильных телах циркон был обнаружен в 2018 г (Shumilova et al., 2018, 2020). Характер данных цирконов разнообразен: в виде обломков кристаллов, деформированных кристаллов и гранулированных агрегатов синимпактного происхождения (рис. 7а) (Shumilova et al., 2018, 2020).

*Шпинель (синимпактная).* Единственный случай выявления данного минерала относится к жильному расплавленному импактиту серого цвета. Представлена в виде кристаллов октаэдрического облика в обособлении слоистых силикатов (рис. 7г, д). Состав шпинели по данным ЭДС (вес. %): MgO – 16.43%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 60.9%, SiO<sub>2</sub> – 8.4%, FeO – 16.9%.

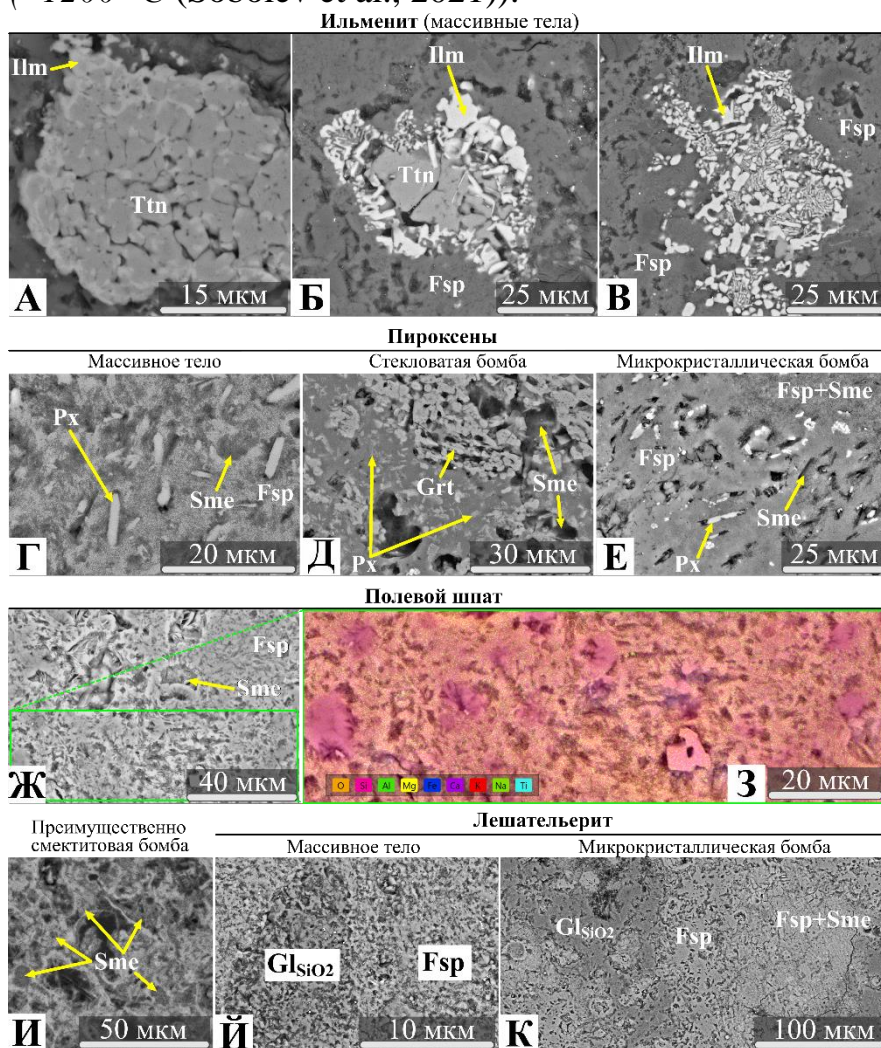
**2. Минералообразование из неомогенного импактного расплава в проксимальных расплавленных импактитах Карской астроблемы происходит в следующей последовательности – 1) в массивных расплавленных импактитах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевой шпат; 2) в жильных телах: циркон – коэсит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

*Последовательность синимпактного минералообразования* из неомогенного импактного расплава установлена после комплексной диагностики минералов на основе анализа их морфологических особенностей и пространственных взаимоотношений в структуре расплавленных импактитов по данным СЭМ, просвечивающей электронной микроскопии и референтных температур плавления и кристаллизации минералов из расплавов (Зубов, Шумилова, 2023).

*В массивных расплавленных импактитах* установлены следующие синимпактные фазы в порядке их образования при снижении температуры неомогенного расплава: ильменит (здесь и далее в скобках – температура плавления (~1300 °C) – пироксен (~1200 °C (Thu et al., 1999)) – лешательерит (~1700 °C) – алюмосиликатное стекло (~1200 °C) – полевой шпат (~1200 °C). Кристаллы пироксена в массивных телах мало сохранились, единственное скопление кристаллов данного минерала было установлено в образце из тагамитового столба на р. Кара (Zubov, Shumilova, 2021) (рис. 6г). Полученная цветная карта ЭДС и СЭМ снимок матрицы массивного расплавленного импактита свидетельствуют о преобладании в массивном расплавленном импактите полевого шпата, что подтверждается данными спектроскопии КРС (рис. 6ж, з).

*В расплавленных бомбах* выявлено присутствие следующих синимпактных минералов в порядке их солидификации: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевой шпат. Исследованные бомбы

представлены несколькими разновидностями в зависимости от степени кристалличности и фазового состава: стекловатые, микрокристаллические полевошпатовые и смектитовые. *Стекловатая разновидность* представлена алюмосиликатной матрицей полевошпатового состава с большим количеством рассеянных в ней агрегатов (обломков) сильно дезинтегрированных минералов граната (родолита), микрокристаллами пироксенов и миндалинами со смектитом (рис. бд). В данном случае последовательность их образования, исходя из их морфологических взаимоотношений следующая: пироксен – алюмосиликатное стекло. *Микрокристаллическая разновидность* практически нацело представлена микрокристаллическим полевым шпатом с признаками замещения микрокристаллов пироксена смектитом (рис. бе). Данная разновидность характеризуется следующей последовательностью минералообразования из импактного расплава: пироксен (~1200 °C (Thy et al., 1999)) – полевой шпат (~1200 °C (Sobolev et al., 2021)).



**Рисунок 6.** Минералы и стёкла расплавленного парастерезиса в массивных телах (Ф-Г, Ж, З) и бомбах (Д, Е) Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Fsp – полевой шпат, Sme – смектит, Px – пироксен, Ttn – титанит, Ilm – ильменит, Grt – гранат. На рисунке З – карта ЭДС матрицы Ж образца массивного импактита на р. Анарога.

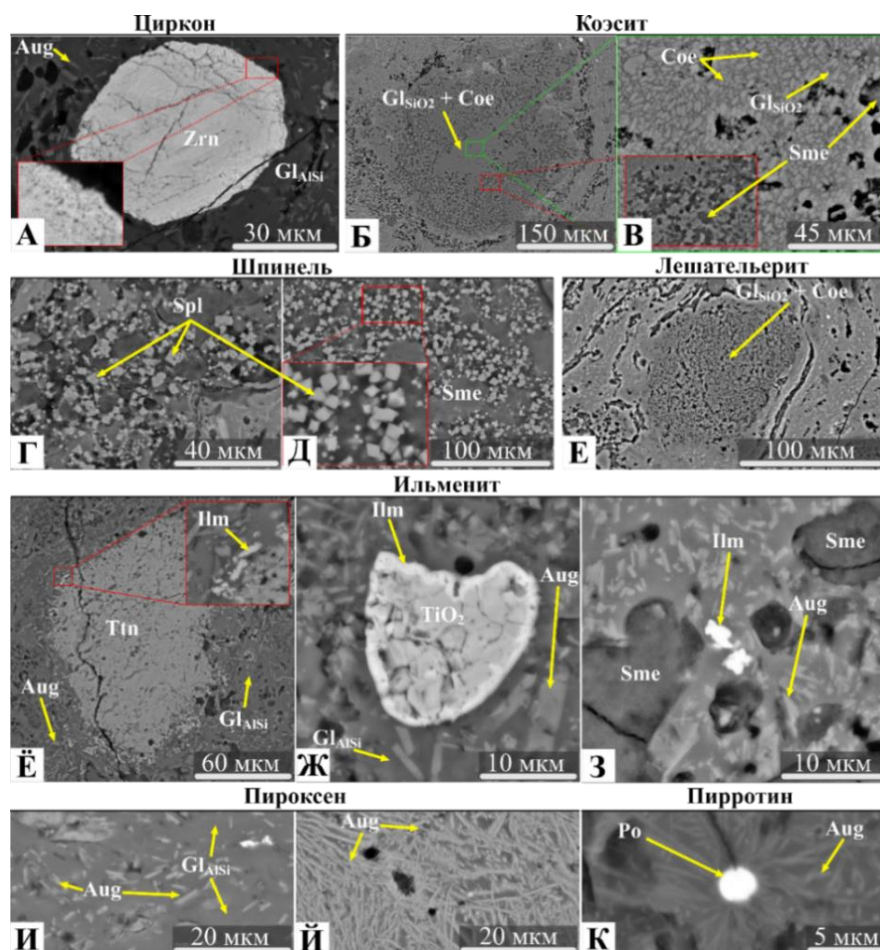
Для жильных расплавных импактитов парастерезис минералов дополнен и уточнена последовательность минералообразования: 1 – циркон (гранулярный) (здесь и далее по тексту в скобках температура плавления

~2500 °C (Nakamori et al., 2017)) встречается на границе реликтовых кристаллов циркона, которые зачастую дезинтегрированы (рис. 7а). Форма гранул циркона изометричная без признаков проявления идиоморфизма, размеры находятся в пределах до 1 мкм. Источником расплава, из которого сформировались гранулы, послужил непосредственно сам реликтовый циркон. 2 – *коэсит* (~2400-2700 °C (Kawata et al., 2018)) присутствует в структуре капель лешательерита в виде идиоморфных удлинённых кристаллов размером до 2 мкм в поперечнике (рис. 7в). В совместной системе с вмещающим коэсит лешательеритом, коэсит согласно пространственным взаимоотношениям и фазовой диаграмме SiO<sub>2</sub> сформировался раньше стекла. 3 – *лешательерит* (~1700 °C) представлен множеством силикатных капель в структуре алюмосиликатного стекла (рис. 7б, е). В каплях в большом количестве присутствуют микрокристаллы коэсита и миндалины заполненные смектитом. Опираясь на морфологию и пространственные взаимоотношения лешательерита, коэсита и смектита последовательность их формирования следующая – коэсит – стекло SiO<sub>2</sub> – смектит. 4 – *смектит* (~1600 °C). Температура указана на основе экспериментальных данных, полученных Х. Наказава с коллегами путём закалки высокобарного высокотемпературного гидротермального флюида, в ходе которого получена ассоциация смектита и коэсита (Nakazawa et al., 1992). Специфика нахождения смектита в структуре лешательерита в виде изолированных миндалин свидетельствует о том, что данный минерал имеет первичную природу и не связан с постимпактными вторичными преобразованиями минерального вещества импактита (рис. 7б, в). 5 – *ильменит* (~1300 °C (Habashi, 2016)) часто встречается в структуре алюмосиликатной матрицы – в виде небольших выделений вокруг зёрен титанита (рис. 7ё), каймой вокруг TiO<sub>2</sub> (рис. 7ж) и редко в виде обособлений (рис. 7з). Первые два варианта встречаются наиболее часто. Зачастую вместо титанита встречается фаза TiO<sub>2</sub>. Гранулярная морфология данного минерала и тесные пространственные взаимоотношения с вмещающей алюмосиликатной стекловатой матрицей обуславливают его синимпактную природу. 6 – *пироксен (авгит)* (~1200 °C (Thu et al., 1999)) в большом количестве распространены в стекле алюмосиликатного состава (рис. 7и, й, к). Идиоморфная морфология микрокристаллов и характер пространственного взаимоотношения указывают на явное формирование пироксена до солидификации (стеклования) окружающего алюмосиликатного расплава. 7 – *алюмосиликатное стекло полевошпатового состава* (~1200°C) занимает основную часть объёма жильного тела, имеет флюидальную текстуру и характеризуется отсутствием пористости (рис. 7а, е, з, и). 8 – *пирротин* (~1200 °C (Nakazawa et al., 1992)) встречается относительно редко, имеет округлые очертания и в некоторых случаях обрамляется по периферии



кристаллами пироксенов перпендикулярной ориентировки к поверхности пирротина (рис. 7к).

Таким образом, установлена последовательность синимпактного минералообразования в расплавных импактитах: 1) в массивных расплавных импактитах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевои шпат; 2) в жильных телах: циркон – коэзит – лешательерит – смектит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло – пирротин; 3) в бомбах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевои шпат.



**Рисунок 7.** Минералы и стёкла расплавного парастрезиса жильных расплавных импактитов Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения:  $Gl_{SiAl}$  – алюмосиликатное стекло полевошпатового состава,  $Gl_{SiO_2}$  – силикатное стекло (лешательерит), Sme – смектит, Po – пирротин, Spl – шпинель, Coe – коэзит, Aug – авгит, Ttn – титанит, Ilm – ильменит, Zrn – циркон.

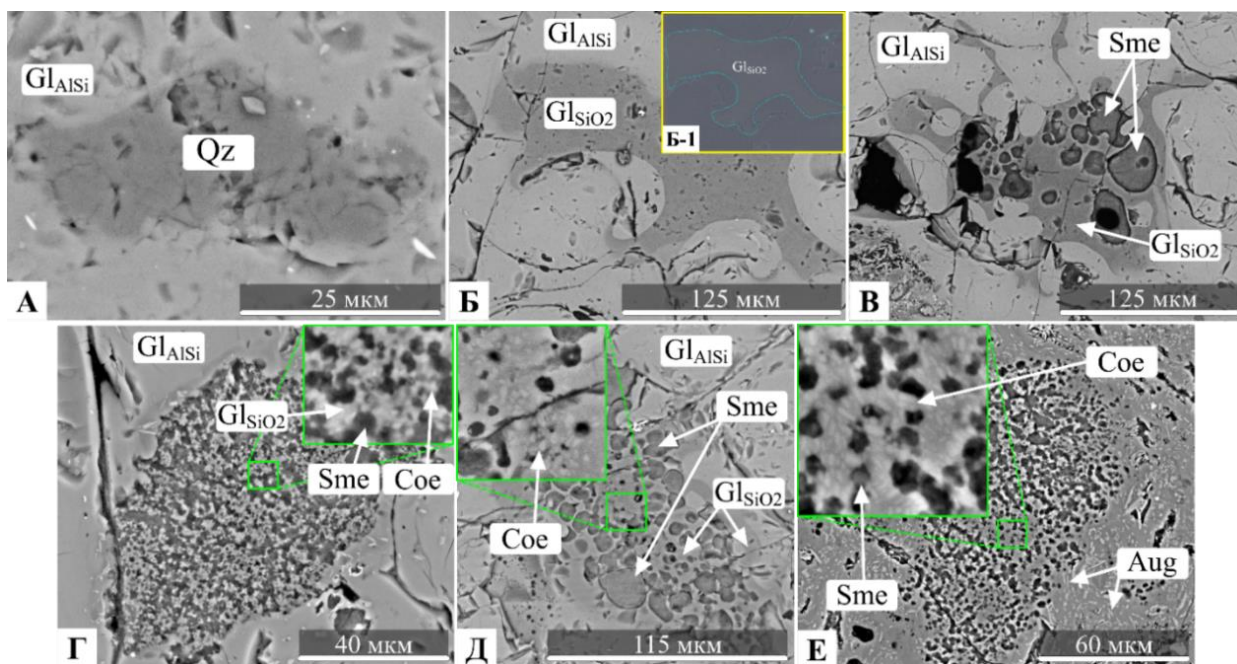
**3. Диаплектовые и расплавные силикатные импактные стёкла Карской астроблемы характеризуются аналогичными структурными признаками – высокой степенью полимеризации, присутствием четырёхчленных и многочленных колец  $SiO_4$ . Диаплектовые стёкла отличаются постоянным присутствием трёхчленных колец  $SiO_4$ .**

**Особенности силикатной компоненты.** В работе в качестве силикатной компоненты подразумеваются кристаллические и аморфные обособления  $SiO_2$ , и их полифазные системы. Силикатная компонента расплавных импактитов Карской астроблемы довольно однотипна для массивных тел, которые содержат в малом количестве реликтовые обломки кварца, силикатные стёкла, а также новообразованный кристобалит. При рассмотрении системы  $SiO_2$  в расплавных импактитах Карской астроблемы

наибольший интерес представляют жильные тела серого цвета, а также коричневые жильные тела (Зубов, Шумилова и др., 2023).

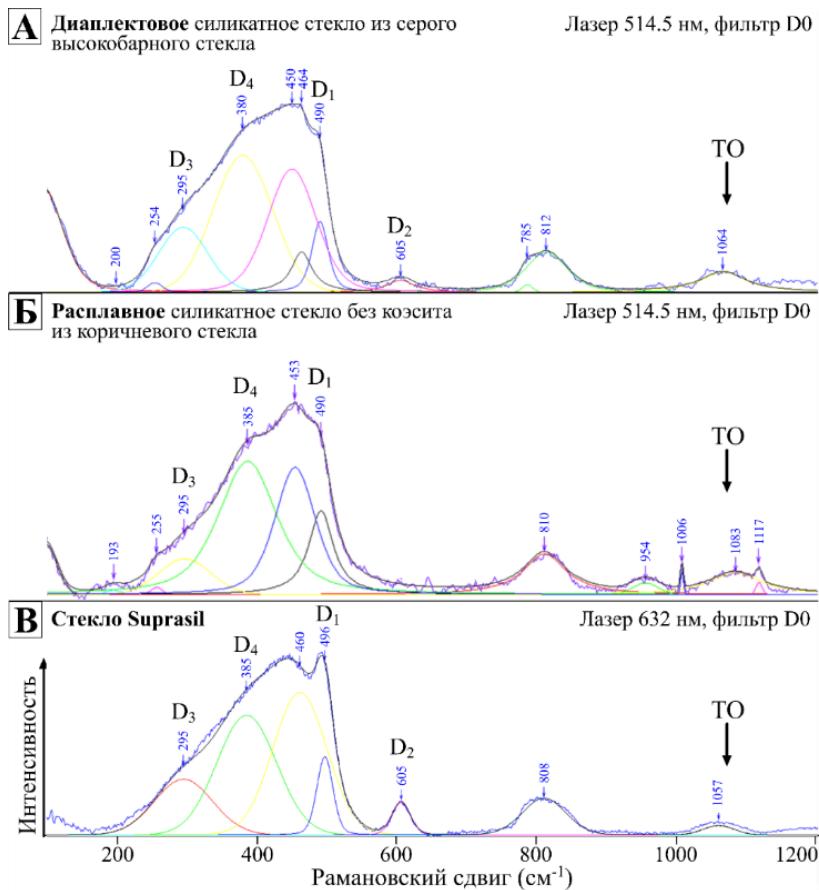
**Реликтовая обломочная силикатная компонента** в жильных расплавленных телах представлена только редкими обломками кварца, неравномерно распределенными в алюмосиликатной матрице альбитового состава, имеет размеры в поперечнике до 100 мкм (рис. 8а). Встречается только в коричневых жильных стеклах.

**Расплавная система.** Продукты закалки и частичной кристаллизации силикатного импактного расплава в жильных стеклах представлены тремя ассоциациями: 1) *монофазные расплавные стёкла*  $\text{SiO}_2$  обнаружены только в коричневых жильных стёклах, находятся внутри алюмосиликатной матрицы, имеют сложную морфологию и микронеоднородности, а также размер до 200 мкм (рис. 8б); 2) *расплавные ксеноморфные силикатные стёкла с каплевидными включениями смектита* встречаются в жильных коричневых стёклах (рис. 8в); 3) *расплавные силикатные стёкла с коэситом и каплевидными выделениями смектита* присутствуют в жильных телах серого (рис. 8е) (Shumilova et al., 2017; 2018; 2019) и коричневого цвета (рис. 8г, д). Смектит в миндалинах силикатных «капель» по данным рамановской спектроскопии идентифицирован как монтмориллонит (Shumilova, Zubov et al., 2020).



**Рисунок 8.** Разновидности силикатной компоненты жильных тел расплавленных импактитов Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE). А – реликтовый обломок кварца, Б – силикатное стекло ( $\text{SiO}_2$ ) и его цветная катодолуминесценция (Б-1), В – силикатное стекло ( $\text{SiO}_2$ ) со смектитом, Г-Е – силикатное стекло с коэситом и каплевидными образованиями смектита,  $\text{GlAlSi}$  – алюмосиликатное стекло,  $\text{GlSiO}_2$  – силикатное стекло, Coe – коэсит, Sme – смектит, Aug – авгит, Qz – кварц. А-Д – коричневое стекло, Е – жильное стекло.

Рамановские спектры образцов расплавленного стекла содержат широкие полосы 200-500, 750-900 и 1000-1100  $\text{см}^{-1}$ , в целом довольно схожие по форме и соотношению интенсивностей с эталонным расплавленным и диаплектовым стеклом (рис. 9). При этом форма наиболее интенсивной полосы 200-500  $\text{см}^{-1}$  заметно варьирует. Кроме того, в некоторых случаях заметна полоса 970  $\text{см}^{-1}$ , наблюдаемая в спектрах всех диаплектовых стекол. Полоса 605  $\text{см}^{-1}$  ( $D_2$ ) в расплавленном стекле отсутствует, не на всех спектрах наблюдается полоса 495  $\text{см}^{-1}$ . Спектры также содержат ряд малоинтенсивных узких линий (кристаллических фаз) 640, 740, 1005 и 1113  $\text{см}^{-1}$ , относящихся к пироксену.



**Рисунок 9.** Разложенные на компоненты спектры комбинационного рассеяния света диаплектового силикатного стекла (А), расплавленного силикатного стекла без коэсита (Б) и синтетического эталона стекла  $\text{SiO}_2$  (В) (Suprasil) (справа).

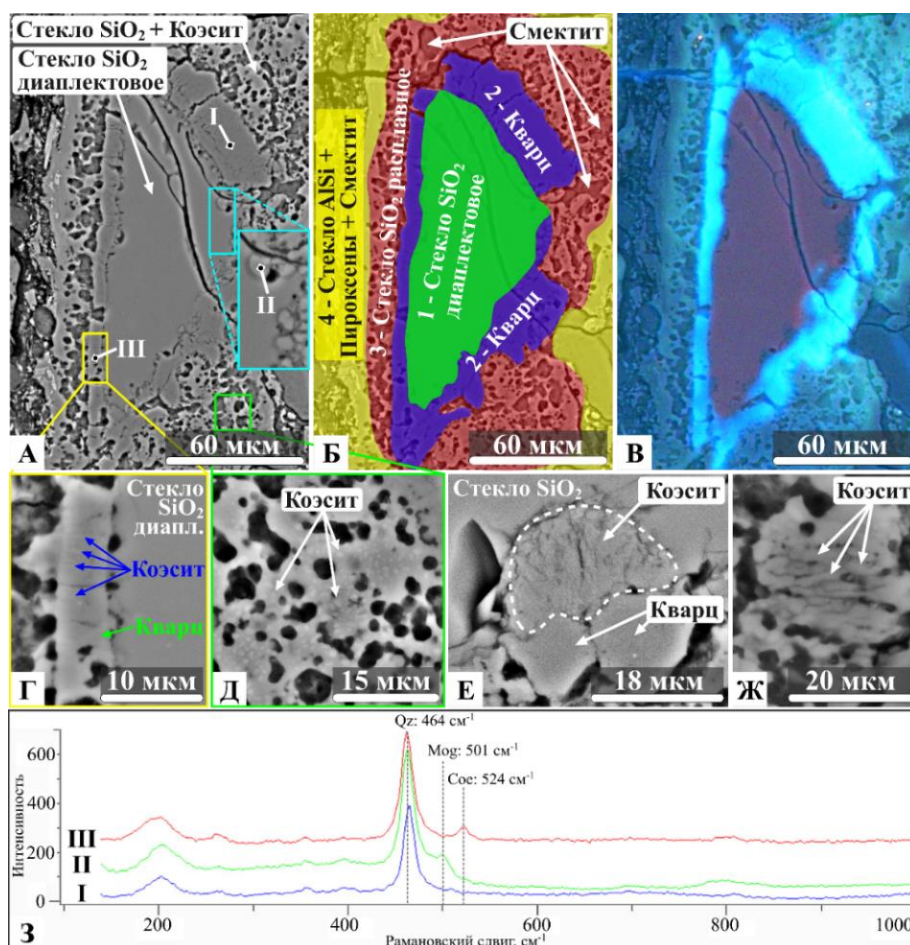
**Твердофазно-расплавная силикатная система** представлена в виде угловатых структур зонального строения в расплавленных импактитах в прикраевой зоне жильных тел серого цвета.

В центральной части обособления располагается диаплектовое стекло, которое характеризуется однородным строением, не содержит видимых на микроуровне включений других минералов, что подтверждается данными КР, ЭДС и СЭМ (рис. 9, рис. 10а), а также характеризуется красным цветом катодолюминесценции (рис. 10в). В некоторых случаях в спектрах КР диаплектового стекла присутствует главная полоса кварца 464  $\text{см}^{-1}$ .

Рамановские спектры получены для четырех обособлений диаплектового стекла в виде профилей с шагом профилирования – 2 мкм. Наиболее интенсивной является асимметричная полоса в интервале 200-500  $\text{см}^{-1}$  с положением около 445  $\text{см}^{-1}$  (рис. 9а). Она осложнена двумя узкими полосами 200 и 464  $\text{см}^{-1}$  кристаллического кварца и относительно узкой полосой 495  $\text{см}^{-1}$  на высокочастотном крыле полосы. Существенно менее интенсивные

широкие полосы присутствуют в диапазонах 750-900 и 1000-1100  $\text{см}^{-1}$ , максимумы которых, соответственно, приходятся на 445, 605, 800-820, 970, 1064  $\text{см}^{-1}$ . Соотношение интенсивностей и форма основных широких полос в целом хорошо выдержаны для разных обособлений, при этом, заметные вариации демонстрирует полоса 495  $\text{см}^{-1}$ .

В целом рамановские спектры диаплектового стекла по форме полос и соотношению их интенсивностей очень близки к спектрам синтетического плавленного кварца Suprasil. Отличие состоит в меньшей относительной интенсивности полосы 495  $\text{см}^{-1}$ , наличии дополнительной полосы 970  $\text{см}^{-1}$ , а также присутствии полос кварца в диаплектовом стекле.



**Рисунок 10.** Сложное зональное силикатное обособление с диаплектовым стеклом в центральной части (1), халцедоновой промежуточной зоной (2), расплавленным стеклом во внешней зоне (3) и зоной алюмосиликатного стекла с пироксенами и смектитом (4) из жильного расплавленного импактита Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE) и цветной катодолуминесценции (V).

*Промежуточная зона* обособления, окаймляющая центральную зону диаплектового силикатного стекла, является  $\alpha$ -кварцем (рис. 10з). В некоторых участках диагностируется слабоинтенсивная полоса 504  $\text{см}^{-1}$ , которая может быть отнесена к могоаниту (рис. 10з) (Jackson et al., 2016). По данным СЭМ и КР спектроскопии в кварце местами фиксируется присутствие мелких кристаллов коэсита размером до 1 мкм (рис. 10г, 9ж). Данная зона имеет ярко выраженное голубовато-белое свечение катодолуминесценции (рис. 10в).

*Внешняя зона* – силикатное расплавленное стеклом с коэситом и каплевидными обособлениями смектита (рис. 10д).

Наблюдаемые в спектре референтного стекла широкие полосы с максимумами вблизи 445, 800, 1060, 1200  $\text{см}^{-1}$  относятся к полосам фундаментальных колебаний в сетке «сухого» силикатного стекла (чистого  $\text{SiO}_2$ ) (рис. 9в). Структура стекла полностью полимеризована, т.е. четыре атома кислорода всех тетраэдров  $\text{SiO}_4$  являются мостиковыми ( $\text{Q}^4$ ). Интерпретация рамановских полос в стеклах основана главным образом на выделении спектральных мод симметричных и асимметричных валентных колебаний связей Si-O и деформационных колебаний O-Si-O или Si-O-Si кольцевых структур в сетке стекла (Paleari, 2000; Kalampounias et al., 2006; Henderson et al., 2009; Chligui et al., 2010 и др.).

Основная широкая полоса с центральным положением около 445  $\text{см}^{-1}$  отражает характер аморфного состояния вещества (Henderson et al., 2009), она объясняется симметричными растягивающими/деформационными колебаниями 6-ти и более многочленных  $\text{SiO}_4$  колец, определяющих основной мотив структуры стекла  $\text{SiO}_2$ . Согласно М. Члигуи с соавторами дополнительно выделяются полосы  $\text{D}_3 \approx 295 \text{ см}^{-1}$  и  $\text{D}_4 \approx 380 \text{ см}^{-1}$ , которые относятся к широкой R-полосе (Chligui et al., 2010). Различие в ширине основной полосы и наличие  $\text{D}_3$ - и  $\text{D}_4$ -полос указывают на степень структурной неоднородности стекла. В расплавных стёклах данные полосы закономерно проявляются с разным соотношением интенсивностей в разных точках анализа, что, вероятно, является результатом локально неоднородных условий стеклообразования, в то время как для диаплектовых стёкол данная область спектра является более выдержанной.

Малоинтенсивные полосы  $\text{D}_1$  и  $\text{D}_2$  (490 и 605  $\text{см}^{-1}$ ), регистрируемые обычно в рамановских спектрах референтных силикатных стекол (получаемых плавлением кварца и закалкой при атмосферном давлении), в настоящее время уверенно относят к симметричным валентным колебаниям  $\text{SiO}_4$  в четырех- и трехчленных кольцах соответственно (Henderson, 2005; Henderson et al., 2009; Mysen, Richet, 2018). Полосы  $\text{D}_1$  и  $\text{D}_2$  называют полосами «дефектов». Интересно, что в рамановских спектрах диаплектового стекла эти полосы в разной степени всегда проявляются, в то время, как в расплавном силикатном стекле коричневых тел они не обнаруживаются.

Широкие полосы в области 800, 1060 и 1200  $\text{см}^{-1}$  в обоих типах стекол можно интерпретировать симметричными и асимметричными колебаниями валентных связей Si-O. Соотношение интенсивностей полос 445, 800 и 1060  $\text{см}^{-1}$  в спектрах как диаплектового, так и расплавного стекол соответствует спектрам референтного образца чистого  $\text{SiO}_2$  стекла, поэтому можно считать, что изучаемые стекла являются практически полностью полимеризованными, и все тетраэдры  $\text{SiO}_4$  находятся в конфигурации  $\text{Q}^4$ .

Сравниваемые диаплектовое и расплавное стёкла характеризуются аналогичным набором основных спектральных полос, указывающих на высокую степень полимеризации. Различающиеся профили спектров

отражают неоднородное строение изучаемых стекол, вызванное, по всей видимости, исключительно неравновесными условиями стеклообразования. При этом, диаплектовые стекла в отличие от расплавных всегда содержат малоинтенсивные полосы  $D_1$  и  $D_2$ , отвечающие за колебания в четырех- и трёхчленных кольцах  $SiO_4$ . Кроме того, в диаплектовых стеклах весьма часто наблюдается основная диагностическая полоса кварца ( $464\text{ см}^{-1}$ ). В целом, наблюдаемые различия в спектрах диаплектовых и расплавных стекол можно объяснить различными условиями стеклообразования, согласно фазовой диаграмме состояния  $SiO_2$  (Mysen, Richet, 2018) расплавные образуются при существенно более высоких температурах и давлении – порядка 2500-2700 °С и 4-8 ГПа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований определено положение изученных разновидностей расплавных импактитов в международной классификации. Расплавные *массивные тела (тагамиты)* относятся непосредственно к «melt rock» со всеми разностями (по обломкам). *Жильные тела с коэситом* и *расплавные бомбы* относятся к безобломочной разновидности «melt rock», при этом присутствующие в них редкие литокласты пород мишени являются захваченными импактным расплавом в приграничной области.

Микроструктурные особенности рассмотренных разновидностей расплавных импактитов Карской астроблемы отражают специфику условий их образования. Жильные тела с коэситом образовались в ультравысокобарных высокотемпературных условиях. Массивные расплавные импактиты и бомбы не несут в своей структуре явных признаков ультравысокобарной солидификации импактного расплава. Массивные тела благодаря своим большим размерам, обладают преимущественно крипстокристаллической микроструктурой с участками стекловатой. Маломощные жильные тела с коэситом характеризуются явно свежей первичной преимущественно стекловатой микроструктурой с формированием силикатных капель с монокристаллами коэсита и агрегатами смектита. Расплавные бомбы характеризуются наибольшим разнообразием микроструктур от полностью микрокристаллических до практически полностью стекловатых.

Петро- и геохимическая специфика трёх типов тел демонстрирует слабую вариативность состава как массивных, так и жильных тел, в то время как вещественный состав расплавных бомб более вариативен. Жильные тела коричневого цвета содержат существенно в большем количестве восстановленное железо чем в импактитах массивного и жильного типа. Отмечается преобладание лёгких РЗЭ по отношению к тяжёлым. При этом, для массивных тел средние содержания тяжёлых РЗЭ (Gd-Lu) заметно занижены по отношению к жильным телам и расплавным бомбам, а для

расплавных бомб отмечается повышенное количество элементов ряда La-Er. Содержания Co, Ni, Ir, Pt и Au в трёх типах тел расплавных импактитов по абсолютным значениям достаточно близки.

Парастерезис трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы представлен реликтовыми, синимпактными и постимпактными минералами, находящимися в тесной пространственной ассоциации. Реликтовые минералы в массивных телах представлены кварцем, полевым шпатом, магнетитом, цирконом, сфалеритом; в бомбах – родолитом, титанитом, монацитом и анатазом; в жильных телах – цирконом, хромитом, родолитом, кварцем, полевым шпатом, пирротином. К синимпактным относятся минералы и стёкла, сформированные из гетерогенного импактного расплава в массивных телах – лешательерит, ильменит, алюмосиликатное стекло и полевой шпат; в бомбах – лешательерит, пироксен, алюмосиликатное стекло, полевой шпат; в жильных телах ряд минералов более разнообразен: циркон, коэсит, шпинель, лешательерит, ильменит, смектит, пироксен, алюмосиликатное стекло, пирротин. Помимо минералов, сформированных из расплава, к синимпактным относятся минералы и фазы, образованные при твердофазной трансформации углеродного вещества пород мишени: в массивных телах и бомбах – стеклоподобный углерод, алмаз и графит; в жильных телах – стеклоподобный углерод и алмаз. Постимпактная ассоциация минералов включает – пирит, кальцит, цеолит, смектит, барит во всех типах тел. Для массивных тел также характерны гематит, кристобалит, халцедон, для бомб – пирохлор, гётит, гематит, мусковит.

На основе пространственных взаимоотношений и температур плавления синимпактных минералов установлена последовательность их формирования из гетерогенного импактного расплава в проксимальных расплавных импактитах Карской астроблемы.

Спектроскопическая характеристика диаплектовых и расплавных силикатных импактных стёкол Карской астроблемы позволила установить, что они характеризуются аналогичными структурными признаками – высокой степенью полимеризации, присутствием четырёхчленных и многочленных колец  $\text{SiO}_4$ . Диаплектовые стёкла отличаются присутствием трёхчленных колец  $\text{SiO}_4$ . Установлен разный характер катодолюминесценции расплавных и диаплектовых силикатных стекол. Впервые выявлены коэситсодержащие высокобарные безводные алюмосиликатные стёкла с троилитом, содержащие обособления силикатных стёкол со специфичным характером стеклообразующих структурных элементов.

Полученные данные могут быть использованы при изучении крупных импактных структур, являющихся потенциальными объектами на различные виды полезных ископаемых. При этом расплавные импактиты могут содержать в себе существенную долю космического вещества, в связи с этим они имеют особое значение среди других импактитов.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях списка ВАК, WOS, Scopus

1. **Зубов А.А.**, Шумилова Т.Г., Исаенко С.И. Сравнительная характеристика диаплектовых и расплавных силикатных стёкол Карской астроблемы // Вестник геонаук. – 2023. – № 9. – DOI: 10.19110/geov.2023.9.4.
2. **Zubov A.A.**, Shumilova T.G., Zhuravlev A.V., Isaenko S.I. X-ray computed microtomography of diamondiferous impact suevitic breccia and clast-poor melt rock from the Kara astrobleme (Pay-Khoy, Russia) // American Mineralogist. – 2021. – 106. – P. 1860-1870. – DOI: 10.2138/am-2021-7578.
3. Shumilova T.G., **Zubov A.A.**, Isaenko S.I., Karateev I.A., Vasiliev A.L. Mysterious long-living ultrahigh pressure or secondary impact crisis // Scientific Reports. – 2020. – 10:2591. – DOI: 10.1038/s41598-020-59520-3.
4. Shumilova T., Lutoev V., Isaenko S., Kovalchuk N., Makeev B., Lysiuk A., **Zubov A.**, Ernstson K. Spectroscopic features of ultrahigh-pressure impact glasses of the Kara astrobleme // Scientific Reports. – 2018. – 8. – DOI: 10.1038/s41598-018-25037-z.
5. Шумилова Т.Г., Исаенко С.И., Макеев Б.А., **Зубов А.А.**, Шанина С.Н., Тропников Е.М., Асхабов А.М. Ультравысокобарная ликвация импактного расплава // Доклады Академии Наук. – 2018. – Том 480. – № 1. – С. 90-93. – DOI: 10.7868/S0869565218130182.

### Публикации в иных изданиях Scopus

1. Zubov A.A., Shumilova T.G. Comparative Characteristics of Structural-Textural, Mineralogical and Petrochemical Features of Melt Rock Impactites of the Kara Astrobleme. Preliminary Data (Pay-Khoy, Russia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 906. – 2021. – 012020. – DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012020.
2. Shumilova T., Isaenko S., Maximenko N., Zubov A. UHPHT glasses in bottom suevite facies (Ust`-Kara, Arctic Ocean, Russia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 609. – 012052. – DOI: 10.1088/1755-1315/609/1/012052.
3. Shumilova T., Maximenko N., Zubov A., Kovalchuk N., Ulyashev V., Kis V. Varieties of Impactites and Impact Diamonds of the Kara Meteorite Crater (Pay-Khoy, Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 362 (1). – DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012043.
4. Shumilova T., Zubov A., Isaenko S., Shanina S. Mineralogical Features of Ultrahigh Pressure Impact Glasses of the Kara Astrobleme (Pay-Khoy, Russia) // In IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2019. – DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012041.

### Другие статьи

1. **Зубов А.А.**, Шумилова Т.Г. Геохимические особенности массивных, жильных и фрагментных расплавных импактитов Карской астроблемы по данным ИСП-МС // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 11 (125). – С. 78.
2. **Зубов А.А.**, Шумилова Т.Г. Синимпактное минералообразование в расплавных импактитах Карской астроблемы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – №10 (136). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.58.