

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

Институт геологии  
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

На правах рукописи

Зубов Александр Анатольевич

## МИНЕРАЛОГИЯ РАСПЛАВНЫХ ИМПАКТИТОВ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

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

Научный руководитель:  
д.г.-м.н. Т.Г. Шумилова

Сыктывкар – 2023

## Оглавление

Словарь терминов и сокращений .....	3
Введение.....	6
Глава 1. Состояние изученности расплавных импактитов .....	12
1.1. Условия плавления вещества при ударном процессе .....	13
1.2. Классификация импактитов .....	16
1.3. Импактные стёкла и высокобарные минералы.....	24
Глава 2. Карская астроблема .....	33
2.1. История изучения.....	33
2.2. Геологическое строение .....	36
2.3. Импактиты.....	43
2.4. Постимпактные преобразования импактитов.....	49
2.5. Минералогия продуктов импактитогенеза .....	51
Глава 3. Методика изучения расплавных импактитов Карской астроблемы .....	57
Глава 4. Характеристика геологических тел расплавных импактитов Карской астроблемы.....	61
4.1. Общая характеристика расплавных тел.....	61
4.2. Структурно-вещественная характеристика .....	71
4.2.1. Петро- и геохимическая характеристика .....	71
4.2.2. Соотношение кристаллической и аморфной компонент импактитов.....	82
4.2.3. Микроструктуры матрицы .....	85
Глава 5. Минералогия тел расплавных импактитов Карской астроблемы .....	97
5.1. Общая характеристика.....	97
5.2. Выявление и реконструкция рентгеноконтрастных фаз .....	102
5.3. Специфика кристаллической компоненты .....	111
5.4. Последовательность минералообразования .....	134
5.5. Особенности силикатной компоненты .....	140
Заключение.....	155
Список литературы .....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	194

## Словарь терминов и сокращений

**Девитрификация** – процесс раскристаллизации стекла (Геологический словарь..., 2010).

**Диаплектовое стекло** – изотропное вещество, сохранившее морфологию исходного кристалла, который подвергся интенсивному ударному сжатию и последующей разгрузке. Не является результатом ударного плавления минерала, для которого необходимо более значительное сжатие. Отличается от ударного стекла отсутствием флюидальной структуры, газовых пузырьков, значительной плотностью и коэффициентом двупреломления. Может подвергаться последующей рекристаллизации под воздействием высокой послеударной температуры (Геологический словарь, 2010).

**Дистальные импактиты** – импактиты, возникающие в виде дистальных выбросов за пределами внешней границы непрерывного покрова выбросов (Stöffler, Namann et al., 2018).

**Зювит** – литифицированная брекчия, состоящая более чем на 10% из различной величины частиц, обломков, бомб, лепешек полиминерального импактного стекла (витрокластов), смешанного в различных соотношениях с обломками и фрагментами различных горных пород (литокластов) и минералов (грано- и кристаллокластов), сцементированными тем же тонкораздробленным (до 0,1 мм) материалом, частично или полностью литифицированным и иногда вторично измененным. Зювиты возникают при выбросе из импактного кратера и последующем осаждении массы обломков, перемешанных с каплями и частицами распыленного импактного расплава (Геологический словарь, 2010; Структуры и текстуры..., 1983; Масайтис и др., 1998).

**Импактит** – разновидность импактной горной породы, полностью или частично (>10%) состоящей из закаленных либо в разной степени раскристаллизованных продуктов охлаждения импактных расплавов. Среди импактитов выделяют тагамиты и зювиты. Импактиты обычно включают в себя витро- и эпикласты (грано-, кристалло- и литокласты) с признаками ударного метаморфизма и термического преобразования (Геологический словарь, 2010).

**Импактное стекло** – продукт закалки в той или иной мере гомогенизированного импактного расплава, появившегося за счет одной или нескольких горных пород; нередко

пористое, шлако- или пемзовидное (Геологический словарь, 2010; Структуры и текстуры..., 1983).

**Импактная бомба** – «фрагмент» застывшего импактного расплава с поперечником > 64 мм, выброшенного в пластичном состоянии при импактном взрыве и застывшего в полёте. Импактные бомбы имеют различную форму: лепешковидную, лентовидную, округлую, неправильную, а иногда обломаны в полёте. Наружная поверхность гладкая, рассечена трещинами или бороздчатая, несущая следы аэродинамического воздействия атмосферы. Внешняя корка может быть стекловатой, а центральная часть пористой. Встречаются импактные бомбы, состоящие из ядра, образованного какой-либо горной породой и окаймлённого оболочкой из стекла (бомбы обволакивания или окаймлённые) (Геологический словарь, 2010).

**Проксимальный импактит** – импактиты, возникающие в непосредственной близости от ударного кратера, т. е. внутри внешней границы сплошного покрова выброса (Stöffler, Namann et al., 2018).

**Расплавный импактит** (расплавная порода) – melt rock (в переводе с англ. языка – это продукт ударного плавления пород мишени наивысшей степени ударного метаморфизма (Stöffler, Namann et al., 2018). В данной работе под понятием «расплавный импактит» подразумеваются следующие разновидности тел: массивные, жильные, бомбы.

**Силикатный расплав** – в данной работе под силикатным расплавом понимается расплав SiO<sub>2</sub>.

**Силикатное стекло** – в данной работе под силикатным стеклом понимается стекло SiO<sub>2</sub> состава.

**Смектиты** – общее название для ди- и триоктаэдрических слоистых минералов с разбухающей решеткой (гр. монтмориллонита, нонтронита и сапонита), к которым ранее применяли название «монтмориллониты», «монтмориллонит-сапонит», «монтмориллоноиды». Часто образуют различные смешанослойные минералы (типа слюда-смектит, смектит-хлорит). Отличительная черта смектитов – исключительно малые размеры отдельных индивидов (как правило, < 1 мкм). Развиты в форме плотных агрегатов и землистых, глиноподобных масс (Геологический словарь, 2010).

**Тагамит** – массивная, реже пористая и атакситовая импактная расплавная порода афанитового облика, образовавшаяся из силикатного импактного расплава и состоящая

из стекловатой либо в той или иной мере раскристаллизованной матрицы, включающей 10-15% (реже 30%) обломков пород и минералов, несущих признаки ударного метаморфизма и взаимодействия с расплавом (Геологический словарь, 2010; Масайтис и др., 1998).

**Тектит** – природное стекло, встречающееся в виде небольших частиц (доли г), иногда более крупных тел (до нескольких кг), рассеянных чаще всего на поверхности Земли или в приповерхностных рыхлых отложениях. В некоторых районах земного шара тектиты вместе с микротектитами распространены в пределах тектитных полей рассеяния. Поверхность часто обладает специфическим рельефом (в частности, наличием фланцев), обусловленным аэродинамическим воздействием атмосферы на импактный расплав, из которого возникли тектиты. Они сложены плотным стеклом, нередко флюидалным, с нитевидными шлирами лешательерита, иногда извилистыми, что указывает на низкую вязкость расплава (Геологический словарь, 2010).

**КРС** – комбинационное рассеяние света

**РИ** – расплавный импактит

**РВТ** – рентгеновская вычислительная томография

**СЭМ** – сканирующая электронная микроскопия

## Введение

**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; Вишнеvский, 2007; Stöffler, Namann et al., 2018; и др.), что существенно превышает параметры регионального или 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 и обладающие 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, Андреичев, 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, Андреичев, 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 (Badjukov et al., 1989; Кашкаров, Назаров и др., 2000; Юшкин, Лысюк, 2001).

В настоящее время отсутствует детальный анализ многообразия минерального парастрезиса и сопоставление структурно-вещественных особенностей гетерогенных тел расплавных импактитов на микроуровне с применением современных методов и подходов. Детальное изучение особенностей минералообразования в карских расплавных импактитах позволяет решить на примере Карской астроблемы фундаментальную задачу исследования типоморфизма продуктов импактитогенеза расплавного ряда, а также получить комплексную характеристику трёх основных типов тел расплавных импактитов. 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 расплавным импактитами вызван тем, что они являются потенциальными концентраторами космического вещества за счет тела ударника.

**Цель работы:** выяснение парастрезиса минералов в разновидностях расплавных импактитов Карской астроблемы.

**Задачи исследований:**

- 1) изучение геологического положения, текстурно-структурных, минералогическо-петрографических особенностей массивных, жильных тел и бомб расплавных 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 расплавных импактитов;
- 5) анализ минеральных ассоциаций и выявление последовательности минералообразования;
- 6) выявление минералогической специфики силикатной компоненты в жильных расплавных 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 расплавных импактитов, определён минеральный состав основных компонентов и аксессуаров, установлено соотношение кристаллической и аморфной компонент импактитов. Впервые для расплавных массивных, жильных тел импактитов и бомб Карской астроблемы выполнена микроструктурная характеристика их матрицы. Проведён сравнительный анализ вещественных и структурно-текстурных особенностей тел расплавных импактитов, что позволило выявить различия в условиях солидификации импактного расплава. Установлена последовательность минералообразования для разновидностей расплавных импактитов Карской астроблемы. Выявлены структурные различия в диаплектовых и расплавных 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), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) (> 700 изображений) и цветная катодоллюминесценция (>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 коэзитсодержащие 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 – полевои шпат; 2) в жильных телах: циркон – коэзит – лешательерит – смектит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло, пирротин; 3) в бомбах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевои 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 (сканирующая электронная микроскопия и термический анализ), к.г.-м.н. 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 (сканирующая электронная микроскопия, 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 РНФ № 17-17-01080, проектов РФФИ № 17-05-00516, № 20-35-90065 (аспиранты), государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

## Глава 1. Состояние изученности расплавных импактитов

Импактитогенез с образованием крупных метеоритных кратеров является одним из важных и сложных природных явлений, существенно влияющих на региональную геологию и образование месторождений полезных ископаемых (Масайтис и др., 1980; Grieve, Masaitis, 1994; Масайтис и др., 1998). Так например, некоторые импактные структуры относятся к нетрадиционным углеводородным коллекторам, в связи с чем в настоящее время активно проводятся комплексные исследования астроблем с целью оценки их потенциала (Петровский, Анищенко и др., 2015; Левашов и др., 2016; Багрий, 2017; James, Chandran et al., 2022).

Процесс образования импактных структур, общая специфика и систематика импактитов были ранее описаны в многочисленных публикациях (Melosh, 1989; Масайтис, 1992; Stöffler & Grieve, 1994; Масайтис и др., 1998; French, 1998; Stöffler, Grieve, 2007; Вишневский, 2007; French, Koeberl, 2010; Osinski, Pierazzo 2013; Stöffler, Namann et al., 2018 и др.).

В современном Петрографическом кодексе России (2009) продукты импактных преобразований впервые в истории геологии были отнесены к особому (собственному) типу горных пород – ударно-метаморфические (коптогенные) породы, имеющие равнозначный таксономический ранг с осадочными, магматическими и метаморфическими породами (Петрографический..., 2009). В то же время, на современной стадии исследования импактных объектов становится понятно, что образование импактных структур является не только многоступенчатым по времени явлением, описанным в многочисленных моделях (French, 1969; Melosh, 1989; Jones, 2005; Collins et al., 2005; Вишневский, 2007; Масайтис и др., 1998; McCall, 2009; Reimold, Koeberl, 2014; Масайтис, 2016; Stöffler, Namann et al., 2018; Kenkmann et al., 2018 и др.), но и протекающим с проявлением разных механизмов преобразования вещества, отвечающих различным процессам и энергетическим условиям. При ударном воздействии происходит дробление, плавление и испарение вещества, а затем – конденсация пара, кристаллизация расплава, частичная перекристаллизация, перемещение и отложение продуктов дробления (Фельдман, Глазовская, 2018). Формирование импактитов является совокупностью процессов весьма разнородных по своим механизмам и параметрам. С учетом этого обстоятельства закрепившийся в литературе термин «ударный метаморфизм» представляется неудачным и его следовало

бы заменить на термин «импактитогенез» (Фельдман, Глазовская, 2018). Данный подход к пониманию и описанию образования импактитов является наиболее близко отражающим суть происходящих явлений при формировании астроблем и импактных пород. Поэтому далее в данной работе при анализе образования разновидностей импактитов мы используем термин «импактитогенез».

Современные общепризнанные модели образования метеоритных кратеров в целом отражают недостаточную степень изученности одной из наиболее важных ступеней минералообразования из расплавов, связанных с наивысшей степенью изменения и преобразования вещества мишени, при которой возможно образование специфичных минералов, высокобарных и высокотемпературных разновидностей минерального вещества, несмесимых расплавов и соответствующих минеральных ассоциаций, кристаллизовавшихся из расплавов разного состава (Osinski, 2005; 2007; Pratesi et al., 2005; Namann et al., 2013; 2018 и др.). Последние, с одной стороны, могут иметь характерные типоморфные особенности для последующего их использования при генетических реконструкциях конкретных астроблем, а с другой стороны, нельзя исключить находки новых минералов и практически важных веществ в качестве прототипов новых соединений и материалов.

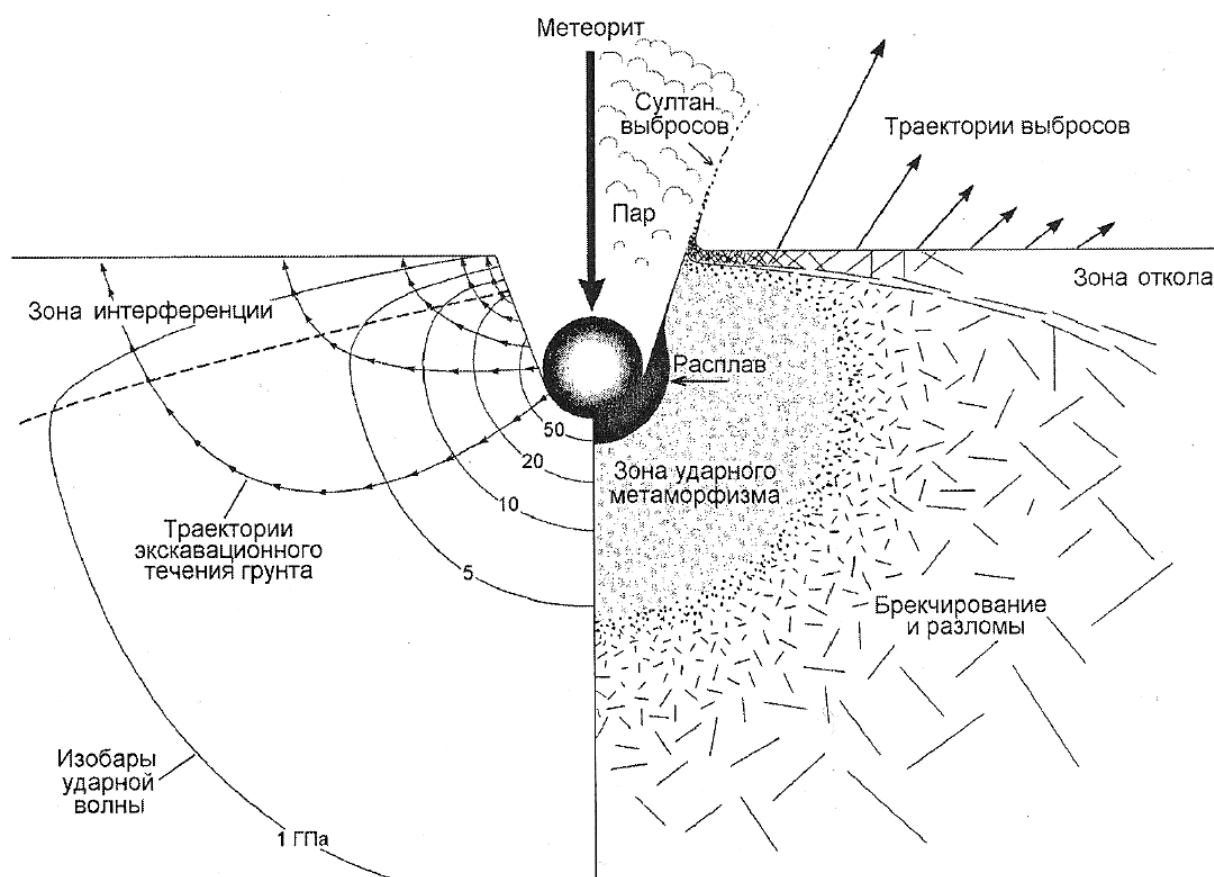
### **1.1. Условия плавления вещества при ударном процессе**

Импактитогенез – совокупность разнородных по своим механизмам и параметрам процессов преобразования вещества, происходящих при соударении космических тел. По сравнению с геологическими условиями, в которых нагрев и плавление пород происходит из-за кондуктивной теплопередачи, при ударно-волновой нагрузке скачкообразно нагревается весь объём сжимаемого вещества (Фельдман и др., 2018).

Достаточно крупные космические тела, достигая поверхности нашей планеты с высокими скоростями, частично или полностью сохраняют первоначальную скорость, при столкновении с породами мишени достигающей 1-5 км/с. В породах возникают ударные волны с экстремально высокой начальной плотностью энергии. При этом, непосредственно в зоне удара начальные давления могут достигать первых сотен ГПа, а температуры до 10000 °С (Melosh, 1989; Langenhorst, Deutsch, 1994; Вишнеvский, 2007; Stöffler, Namann et al., 2018; и др.). Ударная волна распространяется в виде скачка давления, плотности и температуры, что вызывает плавление и испарение вещества. В то

время, как ударная волна распространяется, давление на её фронте снижается. За фронтом распространения ударной волны при разгрузке в породах мишени происходит растрескивание, дробление, брекчирование (рис. 1.1). Под плавлением может подразумеваться частичное (в том числе селективное) плавление и полное плавление, возможен и перегрев расплава. Затухание ударной волны зависит от масштаба импактного события, что может охватывать временной промежуток от долей секунд до первых десятков секунд (Вишневецкий, 2007).

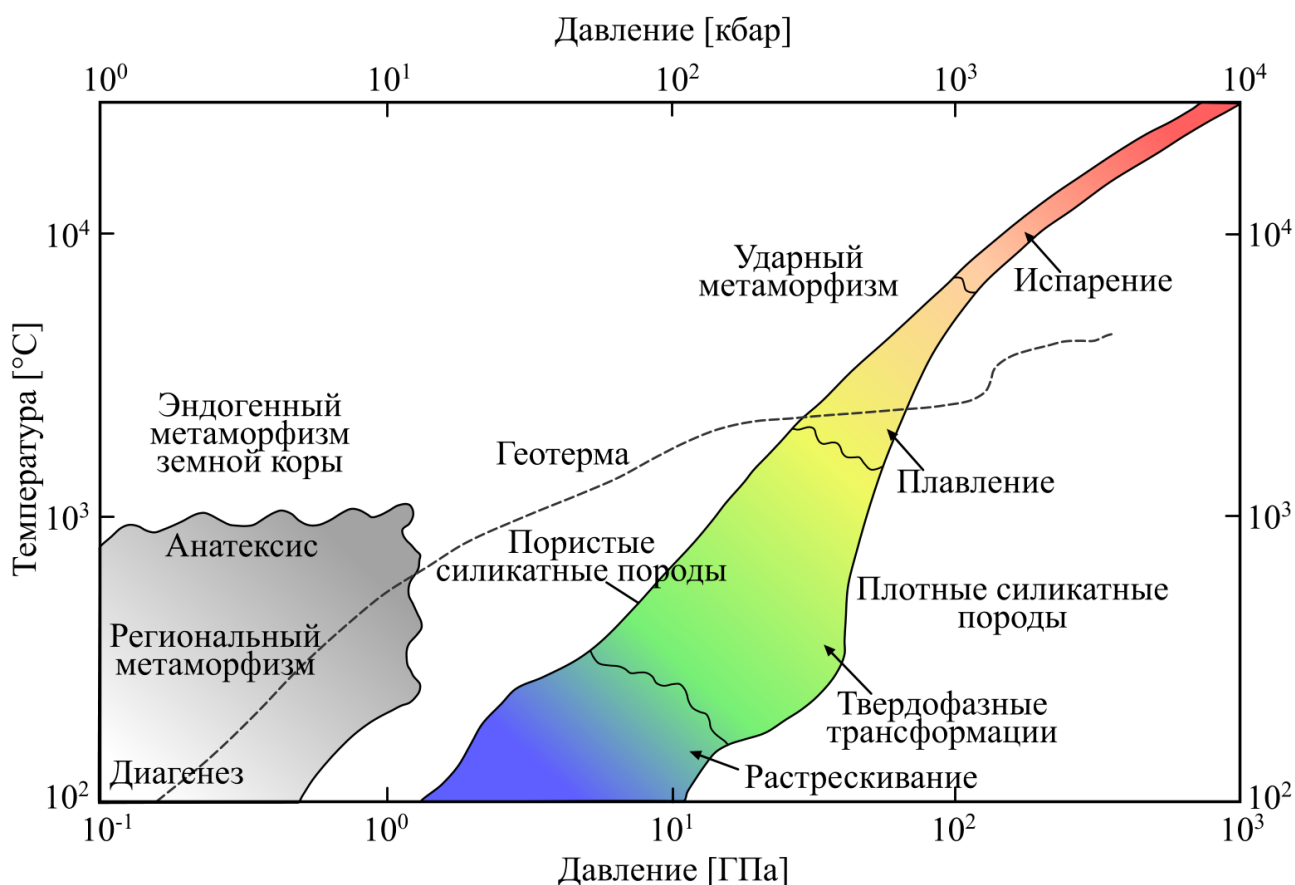
В зависимости от скорости остывания импактного расплава могут образовываться стёкла (закалка импактного расплава), а также разнообразные по соотношению кристаллической и аморфной компонент импактиты. Важным аспектом при формировании расплавных импактитов является текстура породы мишени, которая участвует в образовании импактного расплава. Например, высокая пористость сильно снижает ударное давление, при котором начинается плавление (Фельдман и др., 2018).



**Рисунок 1.1.** Схема затухания ударной волны и течения материала (слева), а также зоны ударного метаморфизма пород мишени (справа) (Вишневецкий, 2007).

Расплавные породы как продукт солидификации импактного расплава могут образовывать различные тела в зависимости от условий формирования, а также указывают на уровень перегрева над ликвидусом и скорость падения температуры. Присутствие в матрице расплавных импактитов реликтов пород мишени с признаками ударного метаморфизма может использоваться в качестве критерия для отнесения породы к импактным образованиям (Импактиты, 1981).

Сопоставление P-T условий ударного метаморфизма по сравнению с условиями эндогенного метаморфизма в случае Земли указывает на то, что поле P-T для статического метаморфизма горных пород крайне ограничено, при этом некоторые породы в редких случаях испытывают давление до 1–2 ГПа и температуру до  $1 \times 10^3$  °C по сравнению с экстремальными условиями до  $\sim 1 \times 10^3$  ГПа и  $\sim 0.5 \times 10^5$  °C при ударном метаморфизме (Stöffler, Namann et al., 2018) (рис. 1.2).



**Рисунок 1.2.** P-T область ударного метаморфизма силикатных пород в сравнении с условиями эндогенного метаморфизма земной коры (Stöffler, Namann et al., 2018; авторский перевод).

## 1.2. Классификация импактитов

Целенаправленное изучение космогенных структур на территории СССР началось после открытия в 1970 г. в Сибири Попигайской астроблемы, одной из крупнейших из известных в настоящее время на Земле, имеет диаметр около 100 км. Одновременно с изучением геологического строения структуры, характера залегания и состава выполняющих ее пород в ВСЕГЕИ начали разрабатываться принципы систематики, классификации и номенклатуры импактных образований.

Одна из первых отечественных схем систематики импактитов была разработана В.Л. Масайтисом (табл. 1.1) (Масайтис, 1983). Данная схема включает только литифицированные породы. Импактиты I рода (не перемешанный материал) известны только в виде включений в импактитах II рода (перемешанный материал), в то время, как различные породы, входящие в подкласс аутигенных брекчий, помимо нахождения в составе аллогенных брекчий и импактита II рода в виде глыб и обломков слагают и отдельные самостоятельные зоны в цоколе астроблем. Классы коптогенных пород выделены на основе степени преобразования исходного материала в процессе ударного метаморфизма и транспортировки и отражают общие генетические особенности процессов формирования этих классов, к которым принадлежат взрывные (импактные) брекчии и импактиты. По условиям залегания и степени гомогенизации материала выделены подклассы – аутигенные и аллогенные брекчии в составе класса взрывных брекчий и импактиты I и II рода в классе импактитов. Так как импактиты I рода распространены ограниченно и неизвестны в виде крупных геологических тел, по существу могут быть рассмотрены три основных подкласса коптогенных пород, в состав которых входят: 1) брекчированные породы и брекчии цоколя метеоритного кратера или астроблемы, образовавшиеся на месте залегания или частично испытавшие связанные перемещения без перемешивания материала (автохтонные). 2) брекчии, заполняющие кратер и образующие покров выбросов и являющиеся перемещенными образованиями (аллохтонные); 3) импактиты (II рода), образующие пластообразные тела внутри кратера могут быть различными (Масайтис, 1983).

Условная граница между импактитами и брекчиями определяется присутствием не менее чем 10 % продуктов ударного плавления в виде фрагментов или цементирующей обломки матрицы (Масайтис, 1998).



Группы среди коптогенных пород выделяются по составу. Взрывные брекчии подразделяются исходя из состава обломочного материала, импактиты II рода – исходя из их валового химического состава на ультраосновную, основную, среднюю и кислую группы, а также по щелочности. По особенностям матрицы среди импактитов II рода выделяются два ряда: тектический и тектокластический, в текстурном отношении отвечающие массивным и обломочным импактитам.

Семейства коптогенных пород определяются агрегатным состоянием матрицы, цементирующей обломки, которая незначительно развита или отсутствует в подклассе аутигенных брекчий. Во взрывных брекчиях матрица может быть эпикластической (кристаллокластической, литокластической) или же витроэпикластической (витрокристаллокластической, витролитокластической) с переходными разностями.

Виды коптогенных пород выделяются на основе характера состава и строения, главными из которых являются гранулометрия кластов, агрегатный состав, соотношение кластов разного состава, степень раскристаллизации тектической матрицы. Разновидности аутигенной брекчии отличаются степенью раздробленности материала и количеством импактного стекла или продуктов его изменения, что в целом зависит от степени ударного преобразования пород (Масайтис, 1983).

**Таблица 1.1.** Схема систематики литифицированных коптогенных пород, образующих геологические тела (Масайтис, 1983).

Класс	Подкласс	Группа	Ряд	Семейство	Вид
Взрывные брекчии (главным образом продукты дробления мишени, неперемещенные и перемещенные)	Аутигенные брекчии (неперемещенный или незначительно перемещенный материал)	Мономиктовая		Эпикластическое	Брекчированные породы мишени Брекчии Коптокатаклазиты Коптомилониты
				Витроэпикластическое	Коптокатаклазиты со стеклом Коптомилониты со стеклом (псевдотахилиты)
	Аллогенные брекчии (перемещенный материал)	а) мономиктовая б) олигомиктовая в) полимиктовая		Эпикластическое	Крупноблоковые брекчии Грубообломочные брекчии Коптокластиты
				Витроэпикластическое	Крупноблоковые брекчии со стеклом Коптокластиты со стеклом
				Гиалиновое (кристаллическое)	Крупноблоковые брекчии с импактным цементом
	Импактиты (главным образом перемещенные продукты плавления мишени)	Импактиты I рода (неперемешанный материал)			Гиалиновое (кристаллическое)
Импактиты II рода (перемешанный материал)		а) ультраосновная б) основная в) средняя г) кислая	Тектический	Гиалиновое	Импактные стекла, шлаки, тагамиты
				Кристаллическое	
			Тектокластический	Витрокластическое Эпивинокластическое Витроэпикластическое	Зювиты

Другая отечественная классификация (Фельдман, 1990) представлена в таблице 1.2. В данной классификации для обозначения всех продуктов ударного метаморфизма предлагалось использовать термин «импактиты», которые по механизму преобразования пород мишени подразделяется на три класса: обломочные, расплавные и смешанные. В первый класс объединяются продукты дробящего воздействия ударной волны; во второй – образования, возникающие из импактного расплава; в третий – агрегаты, сформированные перемешиванием дробленого и расплавленного материала. Для обломочных пород характерны два подкласса по условиям залегания – аутигенные (неперемещенные) и аллогенные (перемещенные) породы.

Группы пород выделяются по составу, и, при этом, используются литологические (для обломочных) и петрохимические (для расплавных) критерии. Обломочные импактиты могут быть мономиктовыми (аутигенные и реже аллогенные), олигомиктовыми и полимиктовыми (аллогенные); расплавные – ультраосновными, средними, кислыми и ультракислыми в соответствии с общепринятыми границами по содержанию кремнезема; смешанные – всегда являются полимиктовыми (Фельдман В.И., 1990). Агрегатное состояние матрицы позволяет разделить импактиты на семейства, показывая в названии семейства характер цемента обломочных и смешанных пород (кластическое, витрокластическое, стекловатое) или основной массы расплавных пород (стекловатое, неполнокристаллическое и кристаллическое семейства). Породы «кластического семейства» могут иметь кристалло-, лито- либо смешанную – литокристаллокластическую матрицу.

В.И. Фельдман на огромном объеме фактического материала пришёл к обоснованному разделению разновидностей импактитов по литологическим (для обломочных импактитов) и петрохимическим (для расплавных импактитов) критериям, опираясь на геологическую обстановку, текстуру, структуру, агрегатное состояние вещества, а также механизм формирования, который играет основную роль. Система именования импактных пород, приводимая в данной классификации, позволяет сразу в названии отражать определяющие признаки разновидности импактита. Однако не совсем ясно, какой критерий был выбран для определения порогов содержания стекла (10%, 90%). Следует отметить, что на международном уровне подобное разделение пород (лишь по количеству стекла) не применяется для систематизации, но упоминается в общем виде (без указания точных процентов).

В.Л. Масайтис отмечал, что для обозначения различных видов обломочных пород кратера Рис наиболее широко используются громоздкие и отражающие лишь внешний вид пород названия, введенные в литературу первоисследователями Риса К. Гюмбелем, Е. Фраасом и Е. Зауером в конце XIX начале XX в. Отдельные авторы нередко вкладывают в один и тот же термин различный смысл (Масайтис, 1983).

**Таблица 1.2.** Схема систематики импактных горных пород по В.И. Фельдману (1990).

Класс	Подкласс	Группа	Семейство	Вид
Обломоч- -ный	аутигенный	мономиктовая	кластическое	импактированные породы мишени
				аутигенные брекчии
			витрокластическое	аутигенные брекчии
				стеклосодержащие (стекла до 10%) псевдотахилиты
	аллогенный	мономиктовая олигомиктовая полимиктовая	кластическое	аллогенные брекчии
			витрокластическое	аллогенные брекчии стеклосодержащие (стекла до 10%)
стекловатое			аллогенные брекчии со стекловатым цементом (стекла до 15%)	
Расплав- -ный		ультраосновная основная средняя кислая ультракислая	кристаллическое	тагамиты (стекла до 10%)
			неполнокристаллическое	тагамиты (стекла 10-90%)
			стекловатое	импактные стекла, шлаки, пемзы
Смешан- -ный		полимиктовая	кластическое	зювиты
			витрокластическое	
			стекловатое	псевдобрекчии

**Международная классификация импактитов.** Систематизация (классификационная схема) импактитов в первую очередь необходима для понимания всех процессов, происходящих во время импактного события и постимпактных преобразований. Для установления чёткой и стройной модели формирования импактитов как в целом, так и для отдельных астроблем необходима классификация импактитов, отвечающая современному уровню изучения импактитов, включая обширные геологические наблюдения и данные современных детальных исследований импактитов, включая высокоразрешающие методы исследований и экспериментальное моделирование.

В настоящее время в импактной тематике получила наиболее широкое признание зарубежная классификация Д. Штоффлера с соавторами (Stöffler, 1971; Stöffler, Grieve 2007; 2018). К середине 70-х гг. XX в. сформировалось мнение, что расплавные породы явно представляют лишь одну (частную) стадию ударного метаморфизма и термин «импактит» следует распространить на все породы, образовавшиеся при соударении космических тел. Не все геологи (как за рубежом, так и в России) были согласны с этим предложением, но в результате обсуждения на комиссии Международного геологического конгресса и ряде международных совещаний термин «импактит» был принят частью международной классификации метаморфических пород, в основу которой была положена классификация, предложенная Д. Штоффлером и Р. Гривом (Stöffler, Grieve, 2007). Данная классификация позволяет в единой системе рассматривать импактиты не только Земли, но и других планет, астероидов. Этому служит, прежде всего, второй раздел данной классификации – импактиты многократных ударов. Породы этого типа редки на Земле, но достаточно часто отмечаются на других планетах (Луне, Меркурии, Марсе), где широко известно перекрытие разновременных ударных структур. Важна также последовательно проведенная отдельная группировка пород по петрографическим и геологическим признакам.

В 2018 году Д. Штоффлер с коллегами провели уточнение систематики и геологического положения наземных, лунных, марсианских и астероидных «импактитов», возникающих в результате единичного или многократного воздействия (рис. 1.3) (Stöffler, Namann et al., 2018). Международная классификация в настоящее время является наиболее полной и отвечающей основным критериям выделения разновидностей импактитов.



**Рисунок 1.3.** Зарубежная классификация импактитов 2018 года, основанная на геологической обстановке, текстуре и степени ударного преобразования, составленная по наблюдениям ударных кратеров на Земле (Stöffler, Namann et al., 2018). Условные обозначения: \* – обычно мономиктовые, \*\* – в основном полимиктовые, но могут быть мономиктовыми (например свойственными одной породе мишени), \*\*\* – включая гиалиновые, гипокристаллические и голокристаллические разновидности.

Стоит отметить, что эта классификация включает разновидности расплавной породы: богатые обломками, бедные обломками и без обломков. Однако в данной систематике отсутствует порог содержания обломков для более корректного разделения, в связи с этим остаётся не ясно: на основе чего был выбран порог содержания обломков, чтобы провести подобное разделение. Но в целом данная классификация на текущий момент является наиболее полноценной.

Г. Осински и Р. Грив в своей работе «Classification of impact melt-bearing impactites: a discussion» затронули очень важный вопрос об актуальной проблеме систематизации импактитов, а именно: «Мы предполагаем, что разделение является искусственным, и что на самом деле существует континуум (непрерывный ряд) от не связанных с обломками когерентных ударных расплавленных пород до богатых обломками ударных расплавных пород, где различные фазы расплава смешаны с обломками» (Osinski, Grieve, 2009). Отвечая на данный вопрос, действительно – многие исследования различных астроблем показывают наличие непрерывных рядов разновидностей импактитов. Так, например, тагамит (расплавной импактит по отечественной классификации) может содержать разное количество аморфной компоненты (стекла). Зювиты также разнообразны по размеру обломков, содержанию различных компонентов (аморфная, карбонатная и т.д.), наличию модификаций минералов и т.д. Мысль Г. Осински и Р. Грива важна и в настоящее время обсуждается другими ведущими специалистами.

В большинстве случаев, описывая характеристики той или иной астроблемы, исследователи предлагали схему классификационных признаков пород для конкретного случая (конкретной астроблемы), не определяя, как правило, содержания и границ того или иного термина или давая лишь краткое его определение. Поэтому названия возникающих при ударном метаморфизме горных пород часто оказываются сложно сопоставимыми у разных авторов. Стоит отметить, что разногласия начались ещё с выбора общего наименования всех продуктов ударного метаморфизма. Исторически первым термином было наименование «импактиты», которое было предложено еще в 30-х годах нашего века для обозначения стекол, возникающих из расплава при метеоритном ударе (Barns, 1940; Фельдман, 1990).

Проблема классификации импактитов – сложная задача, определяемая весьма сложными условиями образования пород, связанных с импактными объектами. Известные отечественные и зарубежные учёные, В.Л. Майсайтис, В.И. Фельдман, С.А. Вишнеvский, D. Stöffler, и др., на протяжении всего времени изучения импактной проблематики развивали систематизацию импактитов. Принятая в научных кругах большинством исследователей международная классификация позволила объединить драгоценные знания, полученные в ходе детальных исследований. Однако, многие вопросы систематизации до сих пор остаются нерешенными.

### **1.3. Импактные стёкла и высокобарные минералы**

В современном понимании стеклом называется твердое аморфное вещество, не обладающее высокоупорядоченной структурой кристаллов (Henderson, 2005; Yadav et al., 2015; Mysen, Richet, 2018 и др.). На текущий момент времени стекла остаются сложными для исследования и интерпретации.

На текущий момент известно о существовании довольно большого списка разнообразных по генезису стёкол (Cicconi, Neuville, 2019). Так, например известны стёкла закалки расплава (вулканические стёкла (Mameli et al., 2016), лунные стёкла), биостёкла, стёкла образующиеся в результате атомных взрывов (Wannier, de Urreiztieta et al., 2019), искусственные стёкла (например, для хранения ядерных отходов (Thorpe, Neeway, Pearce et al., 2021)), фульгуриты – продукты удара молнии в горную породу (Лысюк, 2006а; 2006б; 2009; Carter, Hargreaves et al., 2010; Block, 2011; Chiara, Jiangzhi et al., 2017), а также особую разновидность представляют стёкла, формирующиеся при импактитогенезе, включая конденсатные стёкла (Gornostaeva et al., 2019; Мохов и др., 2020; 2021; Горностаева и др., 2020).

Наиболее важное значение имеют стёкла состава  $\text{SiO}_2$  (далее по тексту «силикатные стёкла»). Силикатные и другие оксидные стекла обладают «полимерной» структурой (Shultz, 1985). Структура силикатных стёкол состоит из слегка искаженных тетраэдров  $\text{SiO}_4$ , соединенных друг с другом вершинами. Каждый атом кислорода в структуре чистого кварцевого стекла выступает в роли своеобразного «мостика» между соседними тетраэдрами и поэтому называется «мостиковым кислородом». В отличие от алюмосиликатных стёкол, структура



стёкол  $\text{SiO}_2$  полностью полимеризована (Colomban, 2003; Colomban, Tournie et al., 2006; X. Fu, A. Wang et al., 2017). При наличии примесных ионов в сетке стекла связи между тетраэдрами  $\text{SiO}_4$  могут разрываться с появлением немостиковых атомов кислорода, связность тетраэдрической сетки нарушается, изменяются вязкость стекла, электрическая проводимость и другие свойства (Mysen, Richet, 2018). Различные структурные состояния тетраэдров  $\text{SiO}_4$  описывают в терминах  $Q^n$ , где  $n$  – число мостиковых атомов кислорода.

Изучению силикатных синтетических и природных стёкол посвящено множество работ отечественных и зарубежных исследователей. Среди диаплектовых стёкол, наибольшее количество исследований проведено для маскелинита (алюмосиликатное диаплектовое стекло по полевому шпату) (пример Ahrens et al., 1969), в то время как чистые силикатные диаплектовые стёкла изучены в меньшей степени. Существуют работы по изучению структурных особенностей стёкол при больших давлениях (Hemley, Mao et al., 1986; Sugiura et al., 1992; и др.), выявлению специфики природных богатых кремнезёмом стёкол по данным инфракрасной (ИК) спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) (Faulques et al., 2005).

Минералогия кристаллических и некристаллических веществ, образующихся в ходе импактитогенеза из расплавов, представляет особый интерес в фундаментальном аспекте, что подтверждается работами многих отечественных и зарубежных исследователей. В эпицентре удара возникают критические условия изменения минерального вещества мишени, достигающие  $10000\text{ }^\circ\text{C}$  и выше, давлений до 35–90 ГПа и более (Langenhorst, 1994; Schmitt, 2000; Вишневский, 2007). Ударный процесс приводит к различной степени деформации вещества пород мишени, вплоть до образования диаплектовых стёкол, при наиболее сильном энергетическом воздействии – к плавлению и испарению минерального вещества мишени и, собственно, самого ударного тела. В научной литературе достаточно подробно рассмотрены условия ударного воздействия на различные минералы и разработана шкала с признаками, указывающими на те или иные термодинамические условия импактного метаморфизма вплоть до плавления вещества (Stöffler, Langenhorst, 1994; Langenhorst, 1994; Grieve et al., 1996; Сазонова и др., 2007; Osinski et al., 2007; Langenhorst, Deutsch, 2012; Pittarello et al., 2015 и др.).

Множество работ посвящено экспериментальным исследованиям в области импактитогенеза. Д.Д. Бадюковым в 1986 и 1987 годах проведены исследования по воздействию ударных волн на основные типы породообразующих минералов и выполнено экспериментальное моделирование ударного метаморфизма (Бадюков, 1986; 1987). В работе Л.В. Сазоновой с соавторами по ударному метаморфизму плагиоклаза и амфибола в области давления 26–52 ГПа было показано, что на твердофазной стадии преобразования в плагиоклазе и амфиболе начинается миграция некоторых химических элементов, усиливающаяся на стадии плавления (Сазонова и др., 2007). В 2007 году В.И. Фельдманом было подтверждено, что величина нагрузок, при которых начинается ударно-термическое разложение минералов, контролируются типом их кристаллической решетки (Фельдман, 2007). В результате экспериментов был установлен и описан эффект возникновения зоны миграции катионов Na, K, Ca при сохранении стехиометрических количеств Si и Al для плагиоклаза и полевых шпатов (Литвинов, 2014). Д.Д. Бадюковым с коллегами проводились экспериментальные исследования по сверхскоростному удару, в результате чего были получены агглютинатоподобные частицы, по текстуре близкие к лунным агглютинатам, которые составляют важную часть лунного грунта (Badyukov, Bezaeva et al., 2018). Е.С. Сергиенко с соавторами (2022) была проведена работа в области получения искусственных аналогов импактных стёкол и изучения их магнитных свойств. Предложена методика получения аналогов импактных расплавов из шихты, включающей породы астроблемы Жаманшин. Результаты исследования химического и структурно-фазового состава полученных стекол показали хорошее соответствие Жаманшинским импактным расплавам (Сергиенко, Янсон и др., 2020; Сергиенко, Костеров и др., 2020а; 2020б; Сергиенко, Янсон и др., 2022). Была отмечена зависимость магнитных и структурно-фазовых свойств полученных стекол от состава исходных горных пород, а также параметров остывания расплава (Сергиенко, Костеров и др., 2020б). Известно также большое число зарубежных работ, посвящённых экспериментальному моделированию ударного процесса (Grieve et al., 1996; Langenhorst, Deutsch, 1994; и др.).

В отечественной литературе довольно много исследований было посвящено изучению изменения вещества в ходе ударных преобразований. В.И. Фельдман

(1990) указывал на закономерную зависимость свойств минералов от условий их формирования (быстрое остывание, неустойчивость режима кристаллизации).

**Импактные стёкла.** Импактные силикатные стёкла интересны главным образом тем, что импактный метаморфизм протекает в широком диапазоне температур и давлений. При этом в точке контакта ударника с породами мишени температуры могут достигать 10000 °С и более, а давления доходят до первых сотен ГПа (Вишневский, 2007). Продукты импактного метаморфизма в большом количестве содержат стёкла различного вещественного состава, зависящего от вещества протолита (импактированных пород). Преимущественно это алюмосиликатные стёкла и силикатные стёкла (SiO<sub>2</sub>). По механизму формирования в импактитах присутствуют стёкла, образовавшиеся при закалке импактного расплава, и диаплектовые стёкла. Последние характеризуются отсутствием пористости, текстур течения, более высокой плотностью по сравнению с синтетическим силикатным стеклом, а также сохранением реликтовой морфологии угловатого зерна прекурсора (кварца) (Langenhorst, 2002).

Исследования диаплектовых стёкол приобрели наибольшую популярность в ходе изучения процессов импактитогенеза. Здесь большой вклад внесли Д. Штофлер и Ф. Лангенхорст (Stöffler, 1984; Langenhorst, 2002). Экспериментальная работа по изучению при помощи КРС ударной трансформации кварца позволяет проследить изменение спектроскопических характеристик в широком диапазоне давлений вплоть до аморфизации (Kowitz et al., 2013). Несмотря на довольно длительную историю изучения импактных стекол детального сравнительного анализа диаплектовых и расплавных импактных стекол не проводилось. Одним из наиболее удачных объектов для сравнительного анализа являются силикатные стекла в жильных телах Карской астроблемы. Присутствующие в жильных расплавных телах одновременно и диаплектовые, и расплавные силикатные стёкла позволяют «in situ» выполнить сопоставление структурных особенностей принципиально различных по механизму формирования стёкол. В связи с малыми размерами однородных участков силикатных стёкол (не более 50 мкм), их исследование выполнено с использованием спектроскопии КР.

Исследованию импактных стёкол различных астроблем посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных исследователей, в том числе стёкол

кратера Жаманшин и лунных стёкол (Горностаева, Мохов и др., 2016; 2017; 2019). Так, например, установлено, что многие расплавные и конденсатные ударные стёкла, как земные, так и лунные, похожи по внутреннему строению и составу (Gornostaeva, Mokhov et al., 2019). Отдельно можно отметить исследование конденсационного процесса при импакте (Мохов, Рыбчук и др., 2020; Мохов, Горностаева и др., 2020). В 2020 году впервые в земном импактном кратере Лонар был обнаружен высокотемпературный конденсат (Горностаева, Мохов и др., 2020). Выявлены 105 новых для Луны минеральных фаз, 43 из которых впервые открыты в природных условиях (Мохов, Карташов и др., 2021). Произведено изучение петрографических особенностей и микровключений в расплавных импактитах кратера Жаманшин, а также выполнены исследования в области вторичных изменений и магнитных свойств импактитов (Сергиенко, Янсон и др., 2019; Sergienko, Yanson et al., 2020; 2021). В 2023 году В.В. Уляшевым с соавторами импактные стекла были получены экспериментально путем плавления алюмосиликатной и кварцевой компонент горных пород мишени Карской астроблемы при давлении 90 ГПа и температуре 7000 °С. Проведенные исследования показали, что в результате экстремальных условий воздействия образуются стекла специфического состава, содержащие высокую долю Са и углерода (Уляшев, Шумилова и др., 2023).

По вещественному составу стёкла подразделяются на мономинеральные и полиминеральные. По механизму формирования – расплавные, диаплектовые и конденсатные. Последние образуются в результате твердофазной трансформации минералов без плавления и представляют особый интерес (Arndt, Hummel et al., 1982; Stöffler, 1984; Fritz, Fernandes et al., 2019).

Среди импактных стёкол, помимо работ связанных с исследованием силикатных и алюмосиликатных стёкол плавления, изучению тектитов (небольших моно/полиминеральных стёкол в виде капель с аэродинамической морфологией поверхности) также отводится большая роль (Kord, Werner et al., 2010). Выполнялись спектроскопические исследования лешательерита, тектита и ливийского пустынного стекла (Gucsik, Koeberl, 2004). Большое количество работ связано с изучением структурно-текстурных, вещественных, спектроскопических свойств импактных стёкол, а также продуктов их девитрификации для кратера Рис

(Германия) (Engelhardt, 1972; Stähle, 1972; Osinski, 2004), а также других астроблем в целом (Dressler, Reimold, 2001; Osinski, 2003; Osinski et al., 2008a; 2008b; Горностаева, Мохов и др. 2017; 2019 и др.).

В целом для силикатных стёкол известны работы по расшифровке их спектров комбинационного рассеяния света (Mysen, Finger, 1982; Seuthe, Grehn et al., 2013), описанию структуры стекла по данным КРС (McMillan, Piriou, 1983), изучению влияния ОН-групп в силикатном стекле на спектры КР (McMillan, Remmele, 1986).

**Высокобарные минералы импактитов.** Динамические ударные волны приводят к ряду изменений пород мишени, а именно растрескиванию, дроблению, твердофазным трансформациям, плавлению и испарению (Масайтис и др., 1979; Melosh, 1989; Фельдман, Глазовская, 2018). На фронте ударной волны происходят сдвиговые деформации, затем за ней возникает область разрежения, в которой происходят структурно-фазовые изменения. Расплавы при понижении температуры консолидируются в новые фазы (Melosh, 1989; French, Koeberl, 2010; Kenkmann et al., 2014; Наумов и др., 2004), в том числе образуются высокобарные минералы (Chao et al., 1960; 1967; 1968; Stöffler, Langenhorst, 1994; 1998; 2002; Wackerle, 1962; Stöffler, 1971; Масайтис и др., 1979; Масайтис и др., 1998; Соболев, 2006; Фельдман и др., 2007; Глазовская, Щербаков, 2018; Глазовская, 2018; Фельдман, Глазовская, 2018; Shumilova et al., 2018, 2019, 2020).

Наиболее характерными высокобарными минералами являются полиморфные модификации кварца ( $\text{SiO}_2$ ) – *коэсит* и *стишовит* (Coes, 1953; Chao et al., 1960; Stöffler, 1971; Chopin, 1984; Ross, Shu et al., 1990; и др.), полиморфные модификации углерода – *алмаз* и *лонсдейлит* (Езерский, 1986; Вишневецкий и др., 1997; Масайтис и др., 1970; 1998; и др.), *меджорит* ( $\text{MgSiO}_3$ ) (Badyukov, 1985; Chen, Sharp et al., 1996; и др.), *рингвудит* ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) (Diaz-Martinez et al., 2001; Глазовская, Трубкин, 2005; и др.), *рейдит* ( $\text{ZrSiO}_4$ ) (Wittmann et al., 2006; Osinski, Pierazzo, 2012; и др.).

В данном разделе более подробно рассматриваются только те высокобарные минералы, которые встречаются в Карской астроблеме – алмаз и коэсит.

Кремнезем в зависимости от условий образует целый ряд кристаллических фаз – кварц (низко- и высокотемпературный), тридимит, кристобалит, лешательерит, коэсит (Фельдман, 1990; Лютоев, Лысюк, 2015 и др.; Фельдман, Глазовская, 2018), позволяющие довольно четко определять условия ударного процесса.

*Коэсит* является единственным высокобарным минералом, который присутствует в импактитах Карской астроблемы. Это одна из высокобарных полиморфных модификаций кремнезема, впервые фаза была синтезирована и описана Коэсом (Coes, 1953). О первой находке коэсита в метеоритном кратере (штат Аризона) сообщили Чао и др. (Chao et al., 1960). Позднее о находках коэсита многократно сообщалось и в связи с другими импактными структурами. В целом изучению коэсита в импактитах различных астроблем посвящено множество работ (Chen, Xiao et al., 2010; Yin, Sharp et al., 2021; Campanale, Mugnaioli et al., 2021; и др.). Коэсит в импактитах обычно представлен агрегатами прожилковой или неправильной формы в диаплектовом кварцевом стекле. Экспериментальные данные и данные моделирования показывают, что коэсит кристаллизуется из импактного расплава при 4-15 ГПа, в природных импактных процессах на основании геологических и минералогических данных давления достигают 30-55 ГПа (Фельдман, Сазонова и др., 2007). Потенциальный мартенсито-подобный механизм образования коэсита приводится в работе Ф. Кампанеллы с соавторами (Campanale, Mugnaioli et al., 2019). Полиморфные модификации кремнезёма, включая коэсит и стишовит, были исследованы в импактитах в ударных расплавных породах импактной структуры Янисъярви с выделением последовательности их образования (Zamiatina, Zamyatin et al., 2023).

Необходимо отметить, что коэсит может образовываться не только при импактном событии, но при метаморфизме в земной коре. Так, например, известен коэсит в пироповых гранатах из метаосадочных пород высокой степени метаморфизма в Западных Альпах (Chopin, 1984), в цирконах Кумдыкольского месторождения алмазов (Sobolev, Shatsky et al., 1994; Соболев, 2006).

*Импактные алмазы* значительно отличаются от алмазов эндогенного происхождения, встречающихся в кимберлитах и лампроитах. При этом длительное остывание крупных тел импактного расплава (тагамитов) приводит к частичному выгоранию алмазов при высоких температурах (Граханов, 2001). Алмазы образующиеся при импактитогенезе по прекурсоры подразделяются на апографитовые, апоугольные и как особую разновидность можно выделить алмазные параморфозы по органическим остаткам, обнаруженную в импактитах Карской астроблемы (Shumilova, Ulyashev et al., 2020).

*Апографитовые алмазы*, приводя в пример Попигайскую астроблему, подразделяют на аутигенные, заключенные в графитсодержащих гнейсах и находящиеся на месте их возникновения, а также аллотигенные, включённые в стекловатую или раскристаллизованную матрицу тагамитов, во фрагменты импактного стекла, входящего в состав зювитов или брекчий (Масайтис и др., 1998). *Аутигенные алмазы* больше сохраняют элементы морфологии и внутреннего строения, унаследованные от исходного графита, *аллотигенные алмазы* несут признаки взаимодействий с интенсивно нагретой окружающей средой, приобретая морфологические особенности, несвойственные исходному графиту (Масайтис и др., 1998). Размеры данных алмазов не большие – в коренных породах от 0,05 до 1,5-2 мм, в россыпях до 8-10 мм. Позднее было установлено, что алмаз образовавшийся из графита является тончайшим агрегатом двух основных фаз – обычного алмаза с кубической структурой и лонсдейлита с гексагональной структурой (Афанасьев, Похиленко, 2013; Kvasnytsya, Wirth, 2013; Németh, Garvie et al., 2014). Импактные алмазы обладают исключительной абразивной прочностью, которая в 1.8-2.4 раза выше, чем у синтетических алмазов (Afanasiev, Pokhilenko et al., 2019; Витязь, Сенють и др., 2019), что вызывает большой интерес с точки зрения практического применения. Особо стоит выделить обширный труд В.Л. Масайтиса с соавторами по алмазоносным импактитам, в котором в том числе Г.И. Шафрановским рассматриваются алмазы попигайской астроблемы (Masaitis, 2019; Shafranovsky, 2019).

Особое внимание последнее время уделяется изучению якутитов. Якутиты относят к импактным алмазам, которые образовались в эпицентре взрыва, вертикально выброшенные зерна вернулись обратно в кратерную воронку, а радиально выброшенные были разбросаны по большой площади на расстояния до 500 км от центра кратера. Принципиальным отличием якутитов является "закалочный" характер образования, в то время как попигайские алмазы из тагамитов характеризуются относительно более длительным отжигом (Вишневский, Афанасьев и др., 1997; Афанасьев и др., 2019; Угапьева, Молотков и др., 2022).

*Апоугольные алмазы* менее распространены и изучены в меньшей степени. В 1982 году в импактитах Карской астроблемы В.А. Езерским было изучено ударно метаморфизованное углистое вещество, названное тогоритом, с необычными

свойствами. Выделены два типа углеродистого вещества: обломки сажистого агрегата с матовым блеском и обломки с сильным блеском (Езерский, 1982; 1986). Более подробные данные об исследовании апоугольных алмазов представлены в обзорном разделе 2.5.

Дополнительно стоит отметить такой минерал как циркон, поскольку он является важным минералом, благодаря которому при высоких ударных нагрузках возможно образование таких фаз как бадделеит и высокобарный рейдит ( $ZrSiO_4$ ). Уже подтверждено, что рамановская спектроскопия является эффективным методом при исследовании степени повреждения, идентификации фаз, тогда как разориентацию цирконов лучше всего исследовать при помощи EBSD (Zamyatin, 2022). На текущий момент рейдит в импактитах Карской структуры не обнаружен.



## Глава 2. Карская астроблема

Карская астроблема — это одна из наиболее крупных астроблем известных на суше, она расположена на северо-восточном крыле Пай-Хойского антиклинория в Арктической зоне России (прибрежная зона Северного Ледовитого океана, побережье Карского моря, НАО, ЯНАО, Россия). Карский метеоритный кратер расположен в бассейнах рек Кара, Сибирчата-Яга, Сопча-Ю, Пут-Ю, Саа-Яга. Структура астроблемы имеет типичное строение крупного сложного кратера с центральным поднятием. В настоящее время возраст астроблемы считается принятым около 70 млн. лет (Koeberl et al., 1990; Trieloff et al., 1998). Состав мишени характеризуется преимущественно осадочными породами О–Р возраста, в том числе черными сланцами.

Большой вклад в ее изучение внесли Масайтис В.Л., Пономарёв Г.Я., Маслов М.А., Мащак М.С., Селивановская Т.В. (Масайтис, 1980; Мащак, 1990; Селивановская, 1990), Шишкин М.А. (Шишкин и др., 2012), а также ряд других исследователей (Галимов и др., 1980; Nazarov et al., 1989; Koeberl et al., 1990; Trieloff et al., 1998; Юшкин, 2001; Бадюков, Райтала, 2001; Koeberl, 2014 и др.) и др.

Процессы неотектоники, длительной эрозии и накопления толщ кайнозойских отложений трансформировали Карский импактный кратер во впадину, известную ныне как Карская депрессия. На текущий момент существует две точки зрения о размерах кратера. По одной версии существуют два кратера: непосредственно Карский диаметром 60 км и Усть-Карский диаметром 25 км (Mashchak, 1991). Другая версия предусматривает существование только одного импактного кратера диаметром 120 км – Карского, что впервые было высказано М.А. Назаровым с соавторами (Koeberl et al., 1990; Карская ударная..., 1993; Бадюков, Райтала, 2001; Ohman et al., 2002; Raitala et al., 2003; Тимонин, 2006). При этом данные гравитационного поля указывают на присутствие большого Карского кратера без каких-либо признаков наличия Усть-Карского (Raitala et al., 2003).

### 2.1. История изучения

Данный раздел посвящён краткой истории предыдущих исследований в рамках изучения импактитов Карской ударной структуры. В данном объекте представлен довольно обширный ряд продуктов преобразования вещества пород мишени. Их

изучению, а также исследованию признаков импактного метаморфизма посвящено множество работ, включая выяснение генезиса Карской структуры, параметры и возраст импактного события, геологическое строение, изучение геохимических особенностей, петрологические исследования, постимпактная гидротермальная минерализация в импактитах, а также минералогию продуктов импактитогенеза.

***Генезис Карской структуры.*** Выходы брекчий на р. Кара изначально были отнесены к тиллитам (Баклунд, 1911). Позднее данные выходы описывали как вулканические брекчии, агломераты или туфобрекчии, генезис депрессии связывали с фреатическим извержением (Иорданский, 1933; Рысюков, 1939; Устрицкий, 1953). Следующей появилась гипотеза о вулcano-тектоническом происхождении структуры (Еномян, 1970; Ваганов, 1985; Маслов, 1973; Маслов, 1974). Впервые предположение о метеоритном происхождении Карской структуры было выдвинуто П.С. Вороновым (Воронов, 1970). В 1971 г. В.Л. Масайтисом в образцах из данного объекта были обнаружены признаки ударного метаморфизма (Масайтис, 1973; Масайтис, 1974), которые позволили подтвердить ударно-взрывное происхождение впадины. Данный вывод был поддержан М.А. Масловым и Г.Я. Пономаревым, которые занимались глубинным изучением данной территории (Маслов, 1977). В 2010 г. В.В. Удоратиным с соавторами для Карской кольцевой структуры геофизическими исследованиями было подтверждено отсутствие следов наличия глубинных очагов частичного плавления горных пород и каналов поставки глубинного вещества. Таким образом подтверждено, что формирование данной структуры связано с падением крупного метеорита (Удоратин, Конанова и др., 2010).

***Карское импактное событие.*** Наиболее общепринятым считается, что Карская ударная структура имеет диаметр около 65 км, отмечается также вероятность наличия на побережье Карской губы субсинхронного ударного кратера меньшего размера (Мащак, 1990; Masaitis, Mashchak et al., 1989; Gottwald et al., 2022), другие предполагают билатеральную симметрию кратера и его большие размеры – 100–150 км (Nazarov, Vadjukov, 1989; Бадюков и др., 2001; Ojala, Vadjukov et al., 2002; Raitala et al., 2003; Тимонин, 2006). Расчетная глубина зоны экскавации составляла порядка 5.5-6.0 км, зона плавления была значительно пологой и не углублялась в подошву пермских отложений, т.е. на 2,0-2,5 км (Masaitis, Mashchak et al., 1989). В ряде работ обсуждался сценарий и параметры Карского импактного

события с определением траектории падения болида и его размеров (Юшкин, Лысюк, 2001; Лысюк, 2001; Юшкин, Лысюк, 2003; Тимонин, 2006).

М.А. Назаровым с соавторами в 1989 году рассмотрен вопрос о характере и количестве внесенного в импактиты *вещества ударника*, а также о распределении этого вещества в указанном объеме расплавленных и дробленых пород. Геохимические исследования указывают на возможное поступление Ir, Ni, Cr и Co за счет вещества тела ударника. Поступление сидерофильных элементов в импактиты (зювиты и стёкла) не коррелирует с количеством заключенных в них продуктов расплава. Большая часть поступающих компонентов ударника находится в тонкодисперсном состоянии в пелитовой матрице зювитов или на поверхности обломков. Последнее указывает на то, что большая часть компонентов конденсировалась из паров во взрывном облаке на поверхности мелких обломков и тонких частиц, а затем частично захватывалась ударным расплавом. Существенно пониженное соотношение поступающего никеля и хрома по сравнению с хондритом объясняется тем, что при конденсации произошло фракционирование элементов, связанное с их разной летучестью (Nazarov, Badjukov, 1989).

Целый ряд работ предшественников посвящен определению *возраста Карского события*, оценки которого существенно расходятся у разных авторов. Анализ возраста по тагамиту и кварцевым стёклам из Карского и Усть-Карского кратеров возраст ударного события составляет  $65,8 \pm 1,1$  млн. лет (Kolesnikov, Nazarov et al., 1988). Проведённая Д.Д. Бадюковым с соавторами экспериментальная работа по установке возраста Карского события на основе палеомагнитных данных не дала результатов, поскольку данных было недостаточно (Badjukov, Vazhenov et al., 1989).

Согласно работам (Nazarov, Badjukov, 1989; Nazarov et al., 1991) время образования Карской астроблемы согласуется с датой 65,7 млн. лет (K-Ar метод) и предполагает возможную связь между Карской структурой и К/Т-граничным событием.

Работа К. Коберла с соавторами по датировке импактного события  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ -методом указывает на возраст  $>70$  млн. лет., что, возможно, близко к возрасту кампанско-маастрихтской границы (C. Koeberl, V.L. Sharpton et al., 1990).

В 1992 году М.А. Назаровым и Д.Д. Бадюковым с соавторами произведено сравнение вещественного состава пород кратера Кара и стёкол границы К/Т на Гаити. В результате установлено, что породы кратера Кара и стекла К/Т демонстрируют несколько отличаются по составу. При этом, как отмечается (Nazarov, Badjukov et al., 1992a) что имеющееся сходство еще не доказывает предполагаемую связь между Карским событием и импактными событиями границы-К/Т, но в то же время может указывать на их взаимосвязь. Позже сделан вывод о том, что прямая связь между событиями в Каре и К/Т кажется наиболее правдоподобной, а также о том, что структура достаточно велика, чтобы привести к значительным биотическим последствиям (Nazarov, Badjukov et al., 1992b).

В 1994 году Л.Л. Кашкаровым с соавторами было произведено датирование импактных стекол Карской астроблемы по трекам осколков деления  $^{238}\text{U}$ . Фрагменты стекол имеют различные плотности спонтанных и индуцированных треков. Это связано с различиями в содержании урана и степени сохранности треков. Последнее слабо коррелирует с химическим составом стекол. Установленный трековый возраст Карской структуры составляет  $64.57 \pm 1.56$  млн. лет (Кашкаров, Назаров и др., 1994).

Позже на базе стекловатых и кристаллических расплавных импактитов при помощи  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  метода был установлен возраст Карской астроблемы  $70.3 \pm 2.2$  млн. лет. (Trieloff, 1998). Данная датировка в настоящее время считается наиболее приемлемой и учитывается в базах данных ударных структур.

## **2.2. Геологическое строение**

В геологическом строении района, где располагается Карский импактный кратер, участвуют два структурных этажа: нижний – позднепротерозойский и верхний – палеозойский. Тектонически Карская астроблема представляет собой космогенную структуру, наложенную на структуры Карского синклинория и отчасти Пайхойского антиклинория. В свою очередь, Карский синклинорий и Пайхойский шарьяж-антиклинорий входят в структуру Новоземельско-Уральского складчато-надвигового пояса. Более детальное описание приводится на основе (Шишкин и др., 2012).

Строение астроблемы изучено при геологическом картировании и геофизических исследованиях данной территории М.А. Масловым и Г.Я. Пономаревым и др. (Маслов, Пономарев, 1976; Пономарев, Булатова и др., 1977; Масайтис и др., 1980; Мащак, 1990; Импактные кратеры..., 1990; Удоратин, Конанова и др., 2010). Обширный материал геологических и петрологических исследований коптогенного комплекса, в том числе зювитов и тагамитов (массивных расплавных импактитов), представлен в коллективных монографиях российских ученых под руководством В.Л. Масайтиса – «Геология астроблем» (Геология астроблем, 1980) и «Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя» (Импактные кратеры..., 1990).

Днище Карской депрессии представлено плоской, местами всхолмлённой эрозионно-аккумулятивной равниной, понижающейся в северо-восточном направлении. Поверхность истинного дна кратера в юго-западной части срезает породы нижнего и среднего палеозоя, а в северо-восточной – верхнего палеозоя. В рельефе выделяются центральное поднятие и окружающий его кольцевой желоб диаметром около 22–26 км. Кольцевой желоб имеет широкое плоское днище, внешние склоны которого в 2–3 раза положе внутренних с наклоном около  $5\text{--}10^\circ$ . Карская впадина является наиболее северной, малой по размерам, сложной по структуре и глубоко срезанной эрозией отрицательной структурой наложенной на структуру Предуральского краевого прогиба (Юдин, 1992).

Карская астроблема совпадает с контурами депрессии и хорошо выделяется по характеру магнитного и гравитационного полей. Она чётко фиксируется отрицательным гравитационным полем округлой формы с ярко выраженной градиентной зоной вдоль бортов. Гравитационный минимум центральной части осложнён положительной аномалией, совпадающей с контуром центрального поднятия (диаметр 10 км). Магнитное поле в пределах Карской астроблемы имеет также концентрически-зональное строение. Внешний контур выделяется изометричными, иногда знакопеременными аномалиями. Положительный гравитационный максимум совпадает с магнитным минимумом (Импактные кратеры..., 1990; Шишкин и др., 2012).

В строении астроблемы можно выделить четыре основных структурно-литологических комплекса: *цокольный, коптогенный, заполняющий* и

*перекрывающий* (рис. 2.1), а также комплекс кластических «даек» (трещин заполнения) описание которых приводится в соответствии с (Мащак, 1990; Шишкин и др., 2012).

**Цокольный комплекс (породы мишени)** представлен сложнодислоцированными отложениями палеозойского структурного этажа от перми до ордовика и дайками Хенгурского габбро-долеритового комплекса.

*Осадочный комплекс мишени* имеет мощность около 5 км. Литологически данный комплекс представлен карбонатными, глинистыми, кремнисто-глинистыми, слюдисто-кремнистыми и другими осадочными породами от ордовика до карбона включительно, терригенными песчано-глинистыми породами с прослоями и линзами известняков и углей перми, а также интрузивными породами – долеритами и габбро-долеритами позднего девона. Породы цокольного комплекса были раздроблены и претерпели пластические деформации.

По данным Шишкина М.А. и др. (2012) хенгурская свита выделена в составе базального горизонта конгломератов и песчаников, толщи известняков и верхней ассоциации сланцевого состава. Мощность свиты варьирует в пределах 400–1160 м. Тальбейтывисская свита, мощностью 400–600 м, представлена однородной ритмичнослоистой ассоциацией известковистых песчаников и глинисто-кремнистых, кремнисто-глинистых сланцев. Сопчинская свита, с мощностью 450–600 м: нижняя толща - переслаивание кремнистых известняков и сланцев глинисто-кремнистых, кремнисто-глинистых, средняя толща - известняки кремнистые, верхняя толща переслаиванием известняков детритовых, глинисто-кремнистых петельчатых и сланцев глинисто-кремнистых, кремнисто-глинистых. Оюская свита - преимущественно черносланцевые образования. Мощность свиты колеблется от 270 до 370 м. Ливановская свита нижняя толща – карбонатно-черносланцевая, верхняя толща – известняковая. Падейская свита представлена толщей ритмичного переслаивания глинистых сланцев и кварцевых песчаников. Путьюская свита представлена характерной ассоциацией из трехчленных ленточнослоистых циклитов, содержащих: пиритизированные глинисто-карбонатные алевролиты (или глинисто-алевролитистые известняки) с косослоистыми и более сложными текстурами, серые листоватые карбонатно-кремнисто-глинистые и черно-темно-серые слабоуглеродистые кремнисто-глинистые сланцы. Мощность данной свиты

варьируется в пределах 50–90 м. Громашорская свита представлена выдержанным кремнисто-карбонатным разрезом мощностью 240–270 м. Силоваяхинская свита мощностью 190–220 м представлена карбонатно-кремнистой ассоциацией пород с ритмичным переслаиванием фтанитов, черных сланцев, силицитов и кремнистых, углеродисто-кремнистых известняков. Путьюская, громашорская и силоваяхинская свиты аналогичны вышеописанным. Сибирчатаяхинская толща: нижняя подтолща - ритмичные пачки глинистых плитчатых известняков, часто с поясками и линзами черных кремней, верхняя подтолща - ритмичное переслаивание плитчатых кремнистых известняков с линзами и прослоями черных кремней. Общая мощность сибирчатаяхинской толщи составляет более 600 м. Карская свита представлена ассоциацией кремнисто-карбонатных пород мощностью 190–200 м. Карасиловская свита мощностью 120–180 м представлена ассоциацией черносланцевых пород.

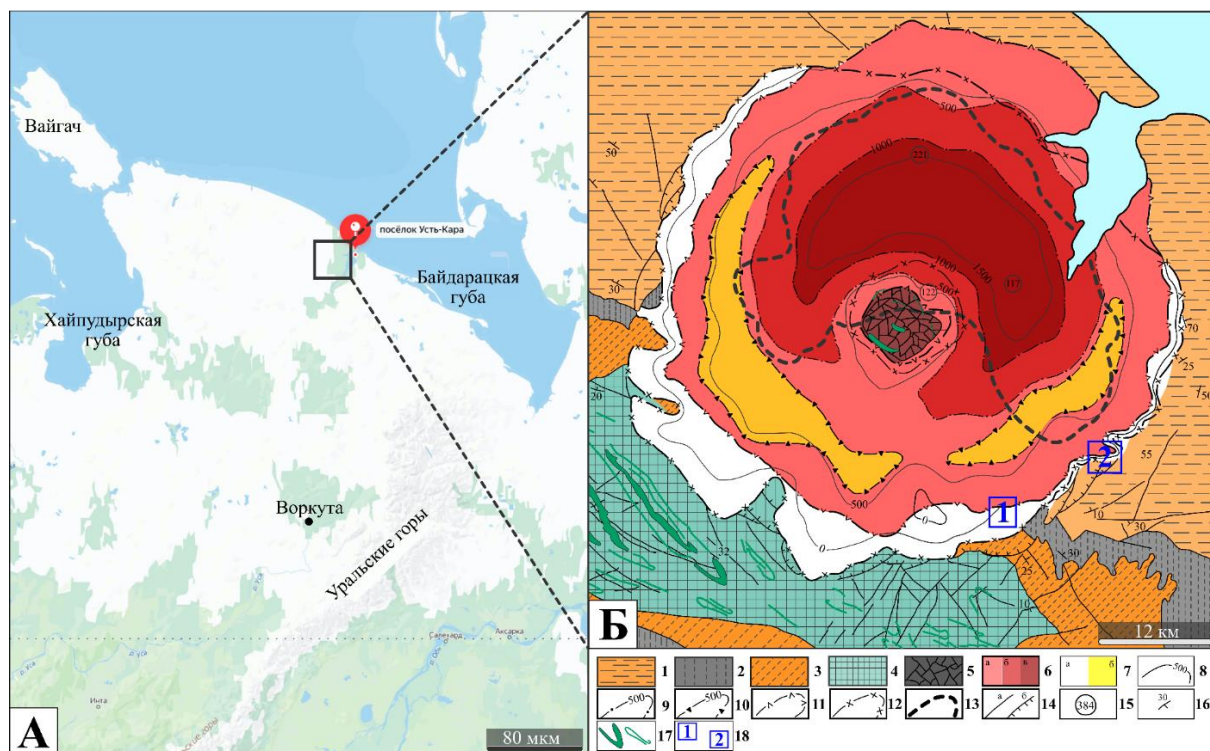
*Магматический комплекс мишени* представлен позднедевонскими интрузиями, присущими Хенгурскому габбродолеритовому гипабиссальному комплексу ( $v\beta D_3h$ ). Согласно данным Шишкина и др. (2012) интрузии являются изолированными от основного – центрально-пайхойского базальтоидного комплекса, развитого по вмещающим породам от нижнего ордовика (хенгурская серия) до среднего девона (падейская свита), и представляют собой группы силлов в пределах центрального выступа Карской астроблемы. Мощность тел варьирует от 1–3 до 150–200 м. В эндоконтактах интрузий нередко присутствуют ксенолиты вмещающих пород. Контакты силлов резкие, чёткие, согласные, иногда кососекущие.

Что касается состава интрузий центрального поднятия Карской астроблемы, то здесь не всё так ясно, поскольку М.А. Шишкин и др. (2012) приводят данные в целом по всему комплексу. Судя по этим данным следует, что были выделены две группы интрузий: дифференцированные и недифференцированные (или слабо дифференцированные). По данным Р.И. Шайбекова и Н.С. Уляшевой с соавторами метагаббро-долериты интрузивного тела центра Карской депрессии представлены кварцевой и бескварцевой разновидностями. В них присутствуют признаки импактного метаморфизма - планарные трещины и элементы в породообразующих минералах, исходя из чего предыдущими исследователями было установлено, что стрессовое давление не превышало 35 ГПа (Шайбеков, Уляшева и др., 2023а; 2023б).

Касаемо всего комплекса, недифференцированные тела более распространены, при этом они имеют однородное или симметрично-зональное строение. Наблюдается закономерная смена пород от периферии к центру тел: “эндоконтактовые микродолериты и долеритовые порфириты – мелкозернистые кварцсодержащие гломеропорфировые долериты – среднезернистые кварцсодержащие порфириформные и эвпорфириформные долериты – крупнозернистые и пегматоидные кварцевые долериты и габбродолериты”.

По этим же данным дифференцированные межпластовые интрузии имеют ограниченное распространение преимущественно в нижних горизонтах ордовика, обнажаясь в основном в ядрах крупных антиклинальных структур, имея при этом наибольшие размеры.





**Рисунок 2.1.** Географическое положение и структурная схема района Карской астроблемы (без четвертичных отложений) по (Импактные кратеры..., 1990; Зархидзе, Пискун и др., 2017). Условные обозначения: 1-4 – Цокольный комплекс (1 – отложения нижней перми, 2 – карбона, 3 – девона, 4 – силура и ордовика); 5 – аутигенные брекчии – катаклазированные породы цокольного комплекса; 6, 7 – коптогенный комплекс (6 – импактиты (зювиты с мелкими телами тагамитов) мощностью до 500 м (а), 500-1000 м (б) и более 1000 м (в), 7 – глыбовые брекчии, мегабрекчии и клиппеновые брекчии мощностью до 500 м (а) и более 500 м (б)); 8 – изогипсы поверхности истинного дна кратера и их значения; 9 – изопакхиты мощностей импактитов и их значения; 10 – изопакхиты мощностей глыбовых брекчий, мегабрекчий и клиппеновых брекчий и их значения; 11 – границы распространения импактитов; 12 – границы распространения глыбовых брекчий, мегабрекчий и клиппеновых брекчий; 13 – границы распространения псаммито-алевритовых брекчий (коптокластитов); 14 – разрывные нарушения (а – разломы, б – надвиги с указанием направления падения поверхности сместителя); 15 – мощности псаммито-алевритовых брекчий (коптокластитов) по данным бурения; 16 – элементы залегания пластов с указанием угла падения; 17 – дайки габбро-долеритов  $v\beta D_3h$ ; 18 – основные районы опробования на рр. Кара (1) и Анарога (2).

**Коптогенный комплекс** представляет наибольший интерес с точки зрения исследования импактитогенеза в целом, поскольку он представлен породами, которые возникли в результате дробления, плавления, перемешивания и переотложения образований цокольного комплекса. Эти породы выполняют впадину истинного кратера. Коптогенный также содержит две наиболее интересные разновидности импактитов, а именно зювиты и расплавные импактиты (тагамиты). Среди пород комплекса выделяют два горизонта, существенно различающихся по составу и строению.

**Нижний горизонт** представляет собой скопление несортированных обломков. В его основании залегают клиппеновые брекчии. Они более широко распространены в юго-западном и южном секторах астроблемы, на внешних склонах кольцевого желоба. С внешней стороны клиппеновые брекчии осложнены сложной системой надвигов и выходят за пределы полей современного распространения перекрывающих их импактитов. Основную часть данного горизонта представляют мегабрекчии. Глыбово-агломератовые зювиты заполняют пространство между фрагментами мегабрекчий. Разрез нижнего горизонта завершается глыбовыми брекчиями, глыбовыми зювитами и тагамитами, распространённых локально. Тагамиты имеют ограниченное распространение и представлены в юго-восточной, южной и северо-восточной частях астроблемы. Они образуют пластообразные, линзовидные, а также тела неправильной формы, мощностью до 10-15 м, при этом залегая в кровле нижнего горизонта.

**Верхний горизонт** характеризуется упорядоченным распределением обломочного материала, что обусловлено ориентированным расположением удлинённых и уплощённых обломков. Основная часть горизонта представлена лапиллиево-агломератовыми зювитами. В вертикальном разрезе данного горизонта снизу вверх уменьшается крупность и количество литокластов и импактных стёкол.

**Комплекс кластических «даек»** (так называемый «инъекционный комплекс» по Машаку М.С. (1990)) представляет собой трещины заполнения, развитые в породах коптогенного комплекса. Этот комплекс представлен 41 «дайкой» мощностью 0.1–7 м. Более половины имеют мощность менее 1 м и только 4 – более 5 м. По вертикали «дайки» вскрываются до 40 м, в скважинах прослеживаются до глубины 350 м. «Дайки» крутопадающие, по большей части вертикальные с

короткими апофизами, отходящими вниз, зачастую параллельными основному телу. По отношению к круговому контуру астроблемы «дайки» имеют радиальное и тангенциальное простирание, при этом преобладают дайки с радиальным простиранием. В целом выделяется радиально-концентрическая система трещин, заполненных слабо литифицированными песчаными глинами с обломками пород и импактных стёкол. Содержание обломков пород – 20–25%, обломков стёкол – 3–5%. Распределение обломочного материала неравномерное. Состав обломков пород различный: угловатые и совершенно не сортированные обломки песчаников, алевролитов, аргиллитов, опок, углей, карбонатных пород, реже кремнистых сланцев размером до 10 см, иногда до 1 м. Встречаются обломки пород с конусами разрушения.

*Заполняющий комплекс* мощностью 30 м представлен плиоцен-нижнечетвертичными отложениями в пределах Карской депрессии. Отложения данного комплекса сформировались в результате разрушения и переотложения пород коптогенного комплекса.

*Перекрывающий комплекс* представлен толщей средне- и верхнечетвертичных и современных отложений с суммарной мощностью более 200 м. Данный комплекс практически повсеместно перекрывает породы цокольного, коптогенного и заполняющего комплексов. Литологически отложения комплекса представлены среднечетвертичными ледниково-морскими суглинками с гравием, галькой и отдельными валунами, верхнечетвертичными морскими, озёрно-аллювиальными и аллювиальными супесями, песками, галечниками, а также современными аллювиальными галечниками, песками и озёрно-болотными отложениями.

### **2.3. Импактиты**

*Зювиты коптогенного комплекса.* Динамика распределения обломочного материала в аллогенных брекчиях и зювитах Карской астроблемы представлена В.Л. Масайтисом с соавторами (Masaitis, Mashchak et al., 1981; 1989). Ими проведены петрологические исследования, касающиеся размера зерен и состава обломков в зювитах и аллогенных брекчиях. Выполнена детальная реконструкция процесса кратерообразования.

В 2016 году были выделены три разновидности зювитов, образовавшиеся по разному субстрату – преимущественно по песчаникам, алевролитам и силикатным магматическим породам; по преимущественно карбонатным породам и по преимущественно углистым породам и углям. Подробно изучены геоморфологические, текстурно-структурные и минералого-петрографические особенности разновидностей зювитов (Максименко, Шумилова и др., 2017; Максименко, 2019). Выполнен сравнительный анализ кластогенных и жилоподобных стёкол (Максименко, Зубов и др., 2017). Установлено своеобразие обломочной компоненты, проведён анализ структурно-вещественных особенностей разновидностей зювитов Карской астроблемы на рр. Кара, Анарога, Путью, Большая Вануйта, Саяха (Максименко, 2018; Максименко, Шумилова и др., 2018; Максименко, 2019а; Максименко, Шумилова и др., 2020; Максименко, 2020а,б,в,г; Maksimenko, Shumilova, 2021; Максименко, 2021а; 2021б; Максименко, Шумилова и др., 2022; Максименко, 2022).

Проведены также петрографические исследования сильно выветрелых зювитов на р. Сядмаяха, сохранившихся в небольшом грабене в 55 км к северо-востоку от центра кратера (Ohman, Raitala et al., 2002). Установлено, что стёкла из данных зювитов полностью изменены до цеолитов и глинистого материала, а также отмечены низкие суммы содержаний компонентов в химических анализах данных стёкол. Установлено, что соотношения различных элементов в р. Сядмаяхе и р. Каре очень близки.

Е.С. Сергиенко с соавторами изучены магнитные свойства зювитов, установлено, что естественная остаточная намагниченность зювитов Карской астроблемы может иметь термоостаточную природу (Сергиенко, Цельмович и др., 2010). Были выделены минералы, которые предположительно имеют космическое происхождение – самородные железо и никель, их сплавы, сплав никель-хром-железо, космические магнетитовые шарики и т.д. По мнению данных авторов зювиты являются перспективным объектом палеомагнитных исследований.

***Расплавные импактиты Карской астроблемы*** имеют ограниченное распространение и составляют доли процента от общего объёма импактитов. По типам тел подразделены на массивные тела, жильные тела и бомбы. Массивные и жильные тела относятся к тагамитам.

Для тагамитов Карской астроблемы предыдущими исследователями (Масайтис, Мащак, 1980; Импактные кратеры..., 1990) установлена геологическая позиция, выявлены текстурно-структурные особенности и состав, выделены два типа тагамитов: атакситовые со стекловатой и массивные с полукристаллической структурой основной массы. Установлено, что по химическому составу массивные тагамиты богаче кремнекислотой, титаном, глиноземом, и обеднены летучими компонентами. Отношение окисного железа к закисному в 10 раз ниже, чем в атакситовых тагамитах. Установлено, что по химическому составу массивные тагамиты богаче кремнекислотой, титаном, глиноземом, и обеднены летучими компонентами. Отношение окисного железа к закисному в 10 раз ниже, чем в атакситовых тагамитах. М.С. Мащак также отмечал присутствие в тагамитах Усть-Карской астроблемы присутствие крупных уплощённых включений стёкол (Импактные кратеры..., 1990).

Среди массивных тел (тагамитов) по текстурно-структурным особенностям и составу выделены две разновидности тагамитов: *атакситовые* — с гологиалиновой структурой основной массы и *массивные* — с гемикристаллической структурой основной массы (Импактные кратеры..., 1990). Используемые в данной работе выражения «массивные тела» или «массивные расплавные тела» относятся к тагамитам и введены по причине облика расплавного тела на р. Анарога как массива.

*Атакситовые тагамиты* образуют пластообразные, линзовидные и неправильной формы тела, залегающие в глыбово-агломератовых зювитах. Мощность тел <10-15 м, протяжённость <0,3 км. По текстурным особенностям матрицы подразделены на непосредственно атакситовые (пятнистые), брекчиевидные и агглютинативные. Последние состоят из фрагментов импактных стекол, сцементированных стекловатым материалом, обычно переполненным обломками пород или спекшихся между собой. Матрица атакситовых флюидальных и атакситовых тагамитов представлена параллельно чередующимися (переплетающимися) различно окрашенными импактными стёклами. В качестве обломков пород присутствуют песчаники, алевролиты, углисто-глинистые и углисто-кремнистые сланцы и известняки. Обломки минералов представлены кварцем и полевыми шпатами.

**Массивные тагамиты** (по текстуре) образуют линзовидные и неправильной формы пластообразные тела мощностью до 2-3 м и протяженностью до нескольких десятков метров в атакситовых тагамитах и реже в глыбово-агломератовых зювитах. Данные породы имеют стекловатый облик с небольшим количеством обломков пород (до 10-15%). Основная масса представлена флюидальным стеклом, иногда с микролитами плагиоклаза. Включения минералов и пород имеют резкие контуры, реже оплавлены, как в атакситовом тагамите.

**Жильные стёкла**, обнаруженные на р. Кара, первоначально названные «лентовидными стёклами» (Мащак, 1989) и «жильными тагамитами» (Мальков, 2010) описаны с точки зрения морфологии, цвета и других макроскопических признаков. Сульфиды меди и никеля, а также комплекс ксеногенных рудных (сфен, ильменит, рутил) и редкометальных (циркон, бадделеит, монацит) минералов были рассмотрены в исследовании Б.А. Малькова и В.Л. Андреева (2010). Отмечалось присутствие микровкрапленников купроаурида (Мальков, Филиппов, 2006).

В 2015 году жильные тела с импактным стеклом были изучены более детально, в них был обнаружен коэсит (Шумилова, Исаенко, 2017). Для данных стёкол установлено практически полное отсутствие пористости, присутствие в алюмосиликатном стекле ликвационных структур и обособленных силикатных участков. Последние характеризуются скоплениями кристаллов коэсита, отчетливо наблюдающихся в аморфной матрице силикатного стекла, а в некоторых случаях отмечается присутствие алмазоподобного углерода. Пироксены диагностированы как авгиты. Стёкла характеризуются существенно меньшей степенью раскристаллизации по сравнению с массивными телами тагамитов (Шумилова, Исаенко, 2017).

При использовании 2D-картирования комбинационного рассеяния света в жильных телах была зафиксирована необычная ультравысокобарная минеральная ассоциация, представленная необычным плотным сосуществованием коэсита и смектита в чистом аморфном кварцевом стекле (Shumilova, Isaenko, 2019; Исаенко, 2020).

Выявлено, что расплавные импактиты характеризуются более высокими магнитными свойствами по сравнению с осадочными породами (алевролиты, известняки, карбонатные породы и песчаники). Сделано предположение о том, что

это может быть вызвано поступлением астероидного вещества в импактный расплав (Ponomareva, Shumilova, 2019; Пономарёва, Шумилова, 2021).

Дополнительно стоит отметить, что жильные тела с коэситом на текущий момент не были обнаружены в других астроблемах. Они сильно отличаются от известных псевдотахилитов, генезис которых ещё недостаточно изучен (Melosh, 2005; Kovaleva, Dixon, 2020; Masaitis, Naumov, 2020; Невроич, Ильченко и др., 2020). В Карской астроблеме псевдотахилиты не выявлены.

**Бомбы.** Необходимо отметить, что под бомбами подразумеваются включения импактных стёкол в зювитах, которые описывали предыдущие исследователи. В 1993 году Ж.Г. Гурович были описаны разноокрашенные импактные стёкла (Гурович, 1993). Предварительно были выделены тёмные стекла (от вишневых до черных) и светлые стёкла (от желтых до зеленых, а также серые). Установлено, что химический состав стекол изменчив в незначительных пределах. Был проанализирован характер выделения воды при нагревании, выявлено, что в жёлтых стёклах её содержание не превышает 2%, а в светлых достигает 8-10%. Л.В. Сазоновой и Н.Н. Никишиной (1980) установлена связь внутреннего строения и условий залегания расплавных стёкол на основе спектроскопических данных. Н.П. Юшкиным (2001) был открыт новый тип импактных структур в Карской астроблеме – имеющие шаровидную форму аллогенные (возвращенные) бомбы.

***Геохимические особенности расплавных импактитов Карской астроблемы.*** При изучении астроблем прежде всего рассматривается вопрос о соответствии импактных расплавов составу пород мишени и о присутствии космогенного вещества в импактитах (Benoit, Sears, 1992; Назаров, 1995; Koeberl, 1998; Pierazzo, Melosh, 1999, 2000). В зависимости от вещественного состава метеорита, массы, траектории падения, состава пород мишени, а также множества других факторов космогенное вещество по-разному контаминировано при импактном процессе, которое, как правило, оценивается по завышенному содержанию иридия, присутствие Ni, Co, Cr также может указывать на космогенное вещество, но данные элементы существенно менее надежны. Всё это требует выделения особого внимания к изучению специфики рассеянных элементов среди импактитов.

Геохимические исследования производились сотрудниками ВСЕГЕИ и ГЕОХИ РАН. В целом, петрохимический состав тагамитов более выдержан в отличие от пород цокольного комплекса, но отличается более высоким содержанием кремнекислоты, глинозема, щелочей, магния. Атакситовые и массивные различаются между собой по содержанию ряда компонентов. Массивные тагамиты богаче кремнекислотой, титаном, глиноземом, беднее летучими; отношение окисного железа к закисному более чем в 10 раз ниже, чем в атакситовых тагамитах (Импактные кратеры..., 1990). Содержания элементов-примесей в тагамитах в целом близки к содержанию в породах цокольного комплекса, однако, были установлены повышенные концентрации никеля, кобальта, хрома и иридия (Импактные кратеры..., 1990; Nazarov, Barsukova et al., 1990).

Согласно данным (Nazarov, Barsukova et al., 1990) расплавные импактиты и зювиты данного объекта содержат 0.3-1.0 мг/т иридия, при этом подобные концентрации (0.2-0.6) мг/т присутствуют в пермских отложениях. Долериты центрального поднятия астроблемы содержат (в среднем) 2.3 мг/т иридия, 990 г/т хрома и 575 г/т никеля. Обогащение импактитов иридием обусловлено, в том числе, относительно высоким содержанием Ir в осадочной компоненте мишени, в меньшей степени магматической компонентой мишени (Nazarov et al., 1989).

Дальнейшее исследование М.А. Назарова с соавторами показало, что концентрации Ir в породах мишени колеблются от 0.025 до 1.1 мг/т. Наиболее высокие содержания Ir отмечены в долеритах (до 1.2-2.3 мг/т). В некоторых случаях песчаники также обогащены Ir (до 1.1 мг/т). Сланцы и карбонаты содержат менее 0,3 мг/т Ir. В среднем бедные стеклом и богатые стеклом зювиты содержат 0,33 мг/т и 0.27 мг/т иридия, соответственно. Расплавные импактиты и стёкла содержат как правило 0.15 мг/т иридия. В некоторых случаях они показывают высокие концентрации Ir до 1.3 мг/т. Высокие содержания Ir установлены и в вышележащих (перекрывающих) отложениях: от 0.1 до 0.7 мг/т Ir. Авторы пришли к выводу, что вземная компонента Ir присутствует в породах Карского кратера. При этом высокие фоновые содержания Ir, Ni и Cr не позволяют надёжно фиксировать присутствие вземного вещества (Nazarov, Barsukova et al., 1990).

В 2000 году Л.Л. Кашкаровым и М.А. Назаровым с соавторами было установлено, что содержание урана в индивидуальных фрагментах стекла Карской



и Болтышской ударных структур не коррелирует с концентрацией главных породообразующих элементов, что по их данным согласуется с процессом случайного обогащения ураном отдельных фрагментов стекла за счет наличия в локальном объеме расплава таких обогащенных ураном минералов, как апатит, сфен и циркон, а также тот факт, что средневзвешенные значения содержания урана в стеклах Болтышского кратера существенно выше по сравнению со стеклами Карского кратера.

В 2016 году методом инструментального нейтронно-активационного анализа проб измерены концентрации 29 основных, минорных и микроэлементов в зювитах и тагамитах Карской астроблемы при помощи радиохимического нейтронно-активационного анализа, а также с использованием хроматографической системы Purolite C100H-HCl для разделения Pt, Au, Ir, Re из благородных металлов (Zinovyev, Egorov et al., 2016).

В ряде работ указывалось, что для расплавных импактитов Карской астроблемы в отличие от типичных андезитов характерно высокое соотношение содержания восстановленного железа (Мальков, Андреичев, 2010; Lutov et al., 2021; Shumilova et al., 2020) и связанные с этим магнитные свойства импактитов (Сергиенко и др., 2012; 2014; Ponomareva, Shumilova, 2021).

Сравнительный анализ импактитов и черносланцевых пород мишени позволил выявить аналогичный уровень содержаний и характер распределения редких и редкоземельных элементов, а также установить наследование импактитами общего характера геохимической специфики черносланцевых пород Карской депрессии и сохранении уровня концентраций редких и редкоземельных элементов в импактитах (Ковальчук, Максименко и др., 2018).

В 2021 году на основе геохимических исследований было установлено, что жильные ультравысокобарные стекла не имеют генетической связи с магматической компонентой мишени (магматическими дайками хенгурского комплекса) (Shumilova, Morokhin et al., 2021).

#### **2.4. Постимпактные преобразования импактитов**

Постимпактные преобразования импактитов были детально рассмотрены в работе В. Наумова (Naumov, 2002; 2005). По данным автора гидротермальное

изменение зювитов проявляется в перекристаллизации витрокластов и развитии минеральных ассоциаций, образующих жилы и каверны, а также вкрапленной минерализации в тонкозернистой матрице зювитов. Иногда вторичная минерализация занимает до 30% объема пород (в долинах рр. Сопча-Ю и Кары в южной части кратера).

Основные жильные минералы представлены пиритом, кальцитом, анальцимом. Кальцит наиболее распространен, различают две генерации кальцита: ранняя и поздняя. Пирит встречается в зальбандах анальцим-кальцитовых жил. Местами (в долине р. Кары) доля пирита в матрице зювитов составляет 30 об.%. Для анальцима характерны незначительные вариации состава и кристаллической структуры. Другие вторичные минералы (шабазит, ломонтит, стильбит, морденит, кварц, опал) идентифицированы в редких случаях. Кроме того, местами наблюдались барит и апофиллит (Юшкин и др., 1976).

Все импактные стекла из зювитов в той или иной степени преобразованы в агрегаты диоктаэдрических и триоктаэдрических смектитов с преобладанием сапонита, а также примесью хлорита и виллемсеита (никельсодержащего филлосиликата). В редких случаях в измененных стеклах преобладает смешанослойный хлорит-смектит с содержанием смектита <20%. Отмечается, что хлориты и смешаннослоистые хлорит-смектитовые минералы широко распространены только в измененном стекле из нижней части зювитового покрова. Везикулы в стекле заполнены монтмориллонитом, кальцитом, пиритом, опалом, в некоторых случаях цеолитами. Отмечена слабая вертикальная зональность гидротермальных изменений.

По взаимоотношениям вторичных минералов в зональных жилах и кавернах установлен порядок кристаллизации гидротермальных минералов в зювитах: сапонит (смешанно-слоистый сапонит-хлорит) пирит-кальцит, ломонтит-анальцим-кальцит, морденит, шабазит-пирит, кальцит. Наиболее интенсивное гидротермальное оруденение установлено в южной части кратера (долины рек Кары и Сопча-Ю).

## 2.5. Минералогия продуктов импактитогенеза

Краткое описание многообразия минералов в расплавных импактитах Карской астроблемы в целом, включая реликтовые, синимпактные и постимпактные минералы, приводилось в ряде работ (Геология астроблем, 1980; Импактные кратеры ..., 1990; Мальков, Андреичев, 2010 и др.). В основной массе тагамитов были диагностированы обломки минералов – олигоклаза, кварца, калишпата, гипидиоморфные кристаллы олигоклаза, литокласты – серицитового сланца, микродиорита. Отмечена разная степень серицитизации импактитов. Указывалось, что хлорит является главным темноцветным породообразующим минералом в массивных расплавных импактитах р. Анароги. С помощью СЭМ были выявлены *графит, циркон, бадделлит, монацит, апатит, барит, сфен, ильменит, рутил, хромит, пентландит, пирротин, халькопирит, пирит, сфалерит, купроаурид*. Также отмечалось, что некоторые из таких минералов как: *циркон, хромит, ильменит* и *сфен* несут следы ударной грануляции и частичного плавления (Мальков, Андреичев, 2010). Ниже приводятся результаты наиболее детально изученных минералов в импактитах Карской астроблемы.

***Импактные алмазы и сопутствующие углеродные вещества.*** В 1982 году В.А. Езерским было исследовано ударно метаморфизованное углистое вещество в импактитах Карской астроблемы. Среди витрокластических зювитов вместе с мелкими обломками углей впервые было обнаружено углеродистое вещество с необычными свойствами. Выделены два типа углеродистого вещества: обломки сажистого агрегата с матовым блеском и обломки с сильным блеском. Последние были названа тогоритом (Езерский, 1982). В дальнейшем исследования данных веществ получили продолжение. Последующее выделение углеродистого вещества из образцов импактитов и импактных стёкол позволило выявить несколько разновидностей, условно названных А, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, С, которые различаются окраской, прозрачностью, плотностью, электропроводностью, твёрдостью (Езерский, 1986).

В 2001 году изучены шесть валовых проб весом от 14.6 до 103.1 кг тагамитов и зювитов, в которых обнаружены апоугольные алмазы размером 0.18-2 мм с содержанием от 0.5 до 52.2 карат/т (Микляев, 2001). В целях оценки перспектив алмазоносности рыхлых отложений на россыпи импактных алмазов ближнего сноса было проведено опробование верхнечетвертичных и современных отложений в

районе рр. Кара, Анарога, Сопчаю и Сибирчатаяха. В 29 обработанных пробах были выделены апоугольные алмазы с размером зёрен до 4 мм с содержанием до 1 карат/м<sup>3</sup> при среднем содержании 0.15 карат/м<sup>3</sup>. В атакситовых тагамитах и глыбово-агломератовых зювитах ресурсы алмазов в Карской структуре составляют 4500 т., а в Усть-Карской – 30 т (Шишкин и др., 2012).

В 2004 году было установлено, что углеродистое вещество пород Карской астроблемы в основном испытало давления до 60 ГПа (Корочанцев, 2004).

В продолжении изучения углеродного вещества и алмазов Карской импактной структуры Т.Г. Шумиловой с соавторами в 2018 году выявлены две разновидности апоугольных алмазов, установлено, что апоугольные алмазы отличаются от апографитовых импактных алмазов отсутствием лонсдейлита, микро- и нанопористой текстурой. Предложен новый, многостадийный механизм образования апоугольных алмазов – высокобарный пиролиз угля с удалением гетероэлементов с последующей локально-диффузионной кристаллизацией углерода (Shumilova, Isaenko et al., 2018; Shumilova, Ulyashev et al., 2018).

В 2019 году на основе комплекса методов, таких как СЭМ/ПЭМ/высокоразрешающая ПЭМ исследована наноструктурная специфика апоугольных алмазов Карской астроблемы. Структурно-морфологические особенности апоугольных импактных алмазов характеризуются бездислокационной природой и идиоморфными формами нанокристаллитов в поликристаллических агрегатах. Полученные данные подтверждают, что апоугольные алмазы образовались посредством быстрого высокотемпературного пиролиза угля под высоким давлением с последующей кристаллизацией с проявлением локальной диффузии (Shumilova, Isaenko, 2019).

В ходе детальных исследований углеродной минерализации в карских импактитах был впервые обнаружен новый тип импактных алмазов, образовавшихся в виде параморфоз по органическим остаткам, который был назван «каритом» (Shumilova et al., 2018, 2020). Данная разновидность алмаза приурочена преимущественно к зювитах и расплавленным бомбам в зювитах, имеет сохранившуюся морфологию исходной клеточной структуры древесины, обладает комплексом типоморфных признаков, существенно отличающих его от других алмазов. Карит характеризуется полинанокристаллическими агрегатами с

размерами кристаллитов 2–5 нм и возможным присутствием примесей аморфного  $sp^3$ -углеродного матрикса с некоторым присутствием  $sp^2$ -углерода. Хорошо сохранившаяся морфология исходной клеточной структуры древесины является главным типоморфным признаком данной разновидности алмаза (Shumilova, Ulyashev et al., 2019).

В.В. Уляшевым с соавторами в 2018 году доказано, что углеродное вещество, названное ранее В.А. Езерским тогоритом (тип А) (Езерский, 1986), на самом деле является сложным полифазным агрегатом и представляет собой срастание углеродных фаз: стеклоподобного углерода, алмаза и графита. Выполнен анализ пространственных взаимоотношений между стеклоподобным углеродом и алмазом на наноуровне. Установлена температура образования стеклоподобного углерода – ~2500 °С (Уляшев, Шумилова и др., 2018). Методом малоуглового синхротронного излучения установлено, что основная масса углеродистого вещества осадочных пород при импактном метаморфизме претерпевает интенсивные преобразования на наноуровне с образованием нанопористой структуры (Уляшев, Велигжанин и др., 2018; Уляшев, 2018а; Уляшев, 2018б).

**Сульфиды меди и никеля.** Сульфиды меди и никеля в жильных расплавных импактитах Карской астроблемы рассмотрены в работе Б.А. Малькова и В.Н. Филиппова (2006), где приведены общие параметры и морфология массивных и жильных расплавных импактитов. Для жильных тел упоминается комплекс ксеногенных рудных (*сфен, ильменит, рутил*) и редкометальных (*циркон, бадделейт, монацит*) минералов. Отмечалось присутствие микровкрапленников *купроаурида* с выдержанным составом Au ~61-65, Cu ~26-32, Ag ~6-9 (мас. %), который по мнению автора генетически связан с массивными расплавными импактитами. В жильных телах упоминаются сульфиды железа, меди, никеля, кобальта (Мальков, Филиппов, 2006).

**Самородные металлы.** В 2012 году В.А. Цельмович были рассмотрены особенности самородных металлов Карской астроблемы при изучении выделенной металлической фракции из образцов коптогенного комплекса. В работе отмечены разнообразные формы нахождения *самородных металлов* (Fe, Ni, W, Al, Ag, Cu, Sn), *интерметаллидов* (FeCr, FeNiCr, FeNiCo, FeSn, FeCuNiSn, FeNd, LaCeNiFe, NiAl и др.), *сульфидов Fe, магнетитов обломочных, магнетитовых космических шариков,*

а также *титаномагнетитов*. Сделано предположение о том, что самородные металлы могли возникнуть в высоковосстановительных условиях (космических). Отмечается *самородное Fe*, внедрённое в кварц и титаномагнетит, а также *тэнит*, внедрённый в кальцит. Обнаруженные самородные металлы были отнесены к космическим, поскольку металлы были раздроблены при импакте до наноразмерного состояния (Цельмович, 2012).

**Минеральные формы кремнезема.** В импактитах Карской астроблемы коэсит встречен и описан в работах (Вишне夫斯基, Маслов и др., 1977; Импактные кратеры..., 1990; Лютоев, Лысюк, 2015; Лютоев, 2015). Структурные и текстурные особенности строения обособлений кремнезема в породах Карской астроблемы изучены методами рентгеновской дифракции, ИК- и Рамановской спектроскопии (Лютоев, Лысюк, 2015). В импактно-метаморфизованных кварцевых осколках в составе зювитов установлено наличие коэсита и нераскристаллизованного кварцевого стекла, а также постимпактные гидротермальные формы кремнезема. Установлены индикаторные разновидности кварца и других модификаций кремнезема, представляющие основные стадии ударного метаморфизма пород мишени. Отмечены следы шокового метаморфизма: планарные трещины и планарные деформационные элементы, маркирующие низкопараметрические преобразования. Установлены типичные продукты новообразования кремнезема гидротермальной стадии эволюции кратера: *халцедон* и низкоупорядоченный волокнистый *кристобалит - люссатит*, который развит по кремнеземным обособлениям коптогенного комплекса, а также могоанит.

**Импактные стёкла.** В первую очередь необходимо отметить, что изначально под Карскими стёклами (импактными стёклами) подразумевались не только продукты закалки импактного расплава, но и продукты изменения данных стёкол (Геологический словарь, 2010). Упоминались жильные тела на р. Кара, а также бомбы, фледли, лепёшки в структуре зювитов (Мащак, 1989).

В данной работе термин «стекло» (или «импактное стекло») подразумевает только продукт закалки импактного расплава и рассматривается как вещество, имеющее структуру стекла (без наложенных изменений). Импактное стекло может быть девитрифицировано или преобразовано в агрегаты вторичных продуктов

(смектиты, цеолиты, карбонаты и пр.) (Структуры и текстуры..., 1983; Геологический словарь, 2010).

В 2018 году в жильных телах были выявлены необычные следы высокого давления структурных элементов в 8-кратной координации, установлена низкая степень полимеризации силикатного каркаса на основе данных рамановской спектроскопии. Отмечена значительная неоднородность структуры и состава высокобарных стёкол, что вероятно связано с быстрой частичной ликвацией и кристаллизационной дифференциацией (Shumilova, Lutoev et al., 2018). При помощи ЯМР установлено, что Карские расплавные импактные жильные стёкла характеризуются полной полимеризацией тетраэдрических структурных единиц (Si, Al)O<sub>4</sub>. Особенности ЯМР данных стёкол согласуются с жильной гипотезой их образования в условиях высоких давлений и температур, обуславливающих их текучесть, относительно медленное затвердевание с частичной дифференциацией расплава, полимеризацией и выделением минеральных фаз по мере остывания ударного расплава (Lutoev, Shumilova et al., 2021).

На основе данных атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии, инфракрасной и рамановской спектроскопии различных стёкол, в том числе жильных, описаны наноструктурные характеристики и показано влияние химического состава на особенности их структуры. Установлено, что элементный состав является наиболее важным фактором, определяющим наногетерогенность стёкол. Наивысшая структурная однородность на наноуровне высокобарных жильных импактных стёкол по сравнению со стёклами высокого и низкого давлений с высоким содержанием кремнезёма подтверждает специфику образования высокобарных стёкол и указывает на перспективность дальнейших физических исследований этого природного материала (Golubev, Shumilova et al., 2018a; 2018б; 2018в; Golubev, Shumilova et al., 2020).

В целом, минеральным особенностям импактитов различных астроблем было посвящено множество работ, однако, несмотря на многочисленные исследования, следует отметить, что продукты наивысшей степени импактного воздействия – импактные расплавы, образующиеся из них стекла и расплавные породы (в

русской терминологии называемые тагами) изучены недостаточно детально.

В связи с существующим разнообразием импактитов и обнаруженными необычными продуктами импактитогенеза в Карской импактной структуре, а также отличной обнаженностью объекта и возможностью анализа геологической позиции разновидностей импактитов, актуальным является детальное изучение особенностей минералогии расплавных импактитов Карской астроблемы.



### **Глава 3. Методика изучения расплавных импактитов Карской астроблемы**

Полевые исследования включали детальное описание расплавных импактитов, фото- и видеодокументацию обнажений в различных проекциях и обзорные панорамные изображения обнажения с использованием квадрокоптера, видеозаписи с горизонтальным и вертикальным пролётом вдоль обнажения и детализированной фотосъёмки отдельных участков обнажения (DJI Mavic Pro) (Зубов и др., 2017). Изучены морфология, пространственные взаимоотношения тел расплавных импактитов с зювитами, проведено макроскопическое описание и опробование.

Комплексное исследование расплавных импактитов выполнено при помощи оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, рамановской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии, рентгенофазового анализа, рентгеновской микротомографии, термического анализа, цветной катодолюминесценции, силикатного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Изучение шлифов тагамитов, бомб и жильных импактитов является мало информативным в связи с микрокристаллическим характером основной массы и высокой степенью постимпактного преобразования вещества импактитов, но представляет необходимую начальную стадию в их изучении. Оптические исследования проведены с использованием комбинированного поляризационного микроскопа Nikon Eclipse E400 POL в проходящем, отраженном свете и в комбинированном режиме.

Основной комплекс аналитических исследований проведён на базе центра коллективного пользования «Геонаука» (Институт геологии Коми ФИЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия): определение состава породообразующих элементов, определение закиси железа, сканирующая электронная микроскопия, термический анализ, инфракрасная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, рентгенодифракционный анализ.

Объектом исследования являлись три разновидности тел расплавных импактитов Карской астроблемы: массивные тела, жильные тела и бомбы.

Валовый вещественный состав массивных и жильных расплавных импактитов изучался при помощи мокрой химии – химическими методами определения породообразующих элементов (силикатный анализ) согласно инструкции № 138-Х

научного совета по аналитическим методам (Ускоренные химические методы..., 1976) и методом определения закисного железа (Инструкция № 50-X по определению закиси железа объёмным бихроматным методом) (Определение закиси железа..., 1966). Кроме того, вещественный состав массивных и жильных тел, а также расплавных бомб изучался в полированных срезах посредством площадных микронзондовых анализов на однородных участках площадью 2x2 мм и 3x3 мм.

Структурные особенности и вещественный состав расплавных импактитов более подробно изучены с помощью сканирующих электронных микроскопов TESCAN VEGA3 (Czech Republic) с энергодисперсионной приставкой Oxford instruments X-Max и Axia ChemiSEM, что позволило существенно детализировать информацию о вещественном составе и строении. Для СЭМ и микронзондового анализа использованы полированные срезы, покрытые тонким проводящим слоем углерода. Цветная катодолюминесценция изучалась на приборе Axia ChemiSEM (Thermo Fisher Scientific). Исследования проведены в режимах – вторичных электронов (SE) и упруго отражённых электронов (BSE).

Рентгенофазовый анализ порошковых проб производился на рентгеновском дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu, Япония) в стандартной алюминиевой кювете, Cu-анод, ток – 30 мА, напряжение – 30 кВ. Порошковая проба коричневого стекла проанализирована на приборе DX2700BH (Haoyuan, Китай) с использованием кремниевого дрейфового детектора и рентгеновской трубки с Cu анодом при токе – 30 мА, напряжении – 40 кВ на кремниевом держателе.

Фазовый состав глинистой/сметитовой фракции определялся по дифрактограммам ориентированных и разориентированных образцов, излучение  $\text{CuK}\alpha$ , Ni фильтр, 30 кВ, 30 мА, интервал сканирования 2-52 и 55-65°2 $\theta$ , шаг сканирования 2 $\theta$  – 0.05°, скорость съёмки – 1 и 0,5°/мин.

Диагностика минеральных веществ производилась при помощи рамановского спектрометра LabRam HR 800 (Horiba Jobin Yvon) при комнатной температуре и атмосферном давлении с возбуждением лазером Ar<sup>+</sup> (514.5 нм), а также голубым лазером (488 нм) с использованием микроскопа Olympus VX41 при увеличениях x50 и x100 в полированных шлифах без углеродного напыления и в небольших штучных образцах в свежем сколе. Спектральный диапазон съёмки – от 100 см<sup>-1</sup> до 1200 см<sup>-1</sup>. Получение отдельных спектров по шлифам с углеродным напылением было выполнено в случаях изучения редких минеральных частиц, выявление которых

невозможно без предварительного анализа с применением электронной микроскопии. Для обработки спектров комбинационного рассеяния света использовалось программное обеспечение LabSpec 5.39.

Инфракрасные спектры для порошковых проб расплавных импактитов были получены на фурье-спектрометре ИнфраЛЮМ ФТ-02, Люмекс (Россия).

Термический анализ выполнен на приборе синхронного термического анализа TGA/DSC 3+ (Mettler Toledo).

Порошковые пробы трёх типов расплавных импактитов были проанализированы методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) при помощи прибора Thermo Fisher Scientific X Series 2 в ЦКП «Физико-химические исследования горных пород и минералов» (ИГ ФИЦ Кар НЦ РАН, г. Петрозаводск). Порошковая проба коричневого жильного стекла была проанализирована на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7700x (Agilent Technologies, США) (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Метод рентгеновской вычислительной микротомографии (РВМТ) был использован для анализа особенностей строения и распределения минеральных фаз в массивных расплавных импактитах, бомбах и жильных стеклах. Съёмка производилась на микротомографе SkyScan 1173 (компания Bruker) с микрофокусным источником рентгеновского излучения Hamamatsu 130/300 (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»). Образцы исследованы с фильтром из свинец-содержащего стекла при ускоряющем напряжении 120 кВ и силе тока 66 мкА. Средняя энергия рентгеновского излучения после фильтрации составила около 90 кэВ. Пространственное разрешение рентгеновских томограмм составляет ~23 мкм на воксел.

Массивы данных вычислительной микротомографии были реконструированы с использованием программного обеспечения NRecon (Bruker) с поправкой на жёсткость луча рентгеновского излучения и удаление кольцевых артефактов (применяемая конфигурация программного обеспечения: коррекция усиления луча = 41 %, коррекция кольцевых артефактов = 20). Полученные данные вычислительной томографии (значения данных РВМТ) обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения (DataViewer и CTvox, Bruker).

**Методика выделения глин/сметитов из расплавных импактитов путём осаждения** из суспензии опирается на следующий протокол:

*Этап I – подготовка суспензии:* 1 – образец деликатно дробится до размерности частиц -0.05 мм; 2 – Материал образца объемом 1 чайная ложка помещается в стакан (первичный) объемом 0.5 или 1 л. и добавляется дистиллированная вода; 3 – содержимое стакана перемешивается до получения устойчивой суспензии и оставляется на 1-2 часа; 4 – Верхняя ¼ часть суспензии переносится во второй стакан и в первый стакан добавляется дистиллированная вода; 5 – Процесс повторяется 1-3 раза.

*Этап II – осаждение на покровное стекло (без обработки HCl):* 1 – в чашку Петри на дно помещаются два рядом расположенных покровных стекла; 2 – в эту же чашку Петри заливается ½ часть суспензии и ставится в сушильный шкаф при температуре 60-70 °С.

*Этап III – осаждение на покровное стекло (с обработкой HCl):* 1 – ½ часть суспензии переносится в новую чашку; 2 – в чашку с суспензией добавляется однонормальная соляная кислота и ставится на водяную баню на 1-3 ч предварительно накрыв крышкой; 3 – суспензия промывается дистиллированной водой до pH ~6 (производится нейтрализация кислоты); 4 – добавляется дистиллированная вода до достижения взвеси; 5 – в другую чашку Петри на дно помещается одно покровное стекло (под стекло необходимо добавить каплю дистиллированной воды для обеспечения устойчивости стекол); 6 – поверх заливается суспензия, обработанная соляной кислотой, и ставится в сушильный шкаф при температуре 60-70 °С.

Расчет подготовки 100 мл однонормальной (10%) соляной кислоты из 37% концентрированной производится по формуле:  $N_1V_1 = N_2V_2$ , где  $N_1$  = нормальность концентрированной кислоты (в нашем случае 12N),  $V_1$  = требуемый объем концентрированной кислоты,  $N_2$  = нормальность разбавленной кислоты, которую необходимо приготовить (в нашем случае 1N),  $V_2$  = объем разбавленной кислоты, который необходимо приготовить (100 мл). Таким образом требуемый объем концентрированной соляной кислоты производится по формуле:  $V_1 = (1N \cdot 100) / 12N = 8.33$  мл. Объем воды  $V_v = 100$  мл – 8.33 мл = 91.7 мл.

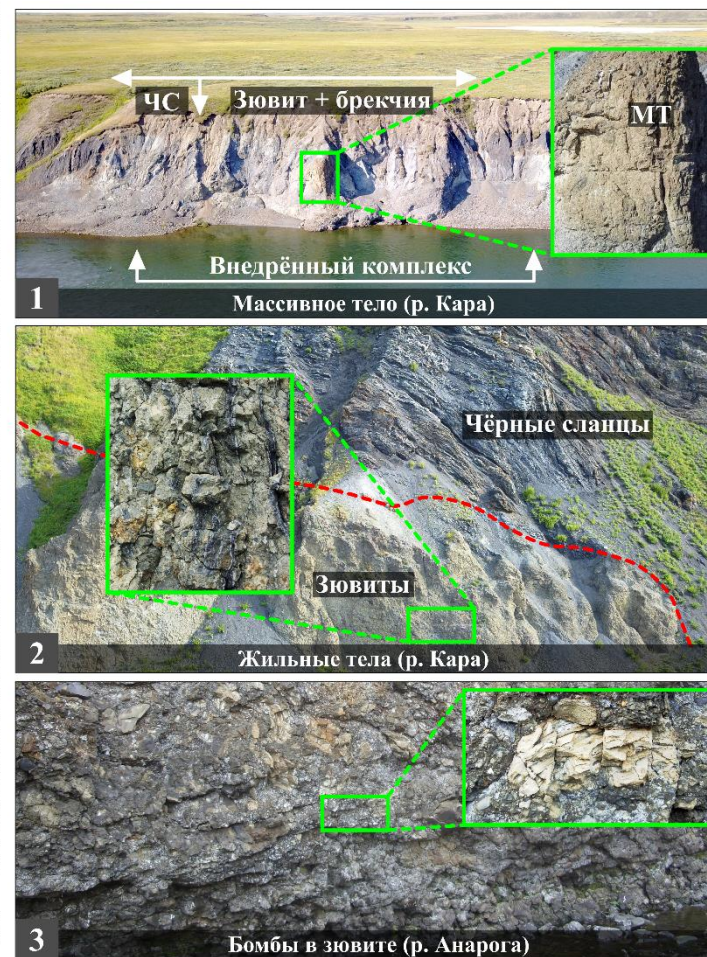
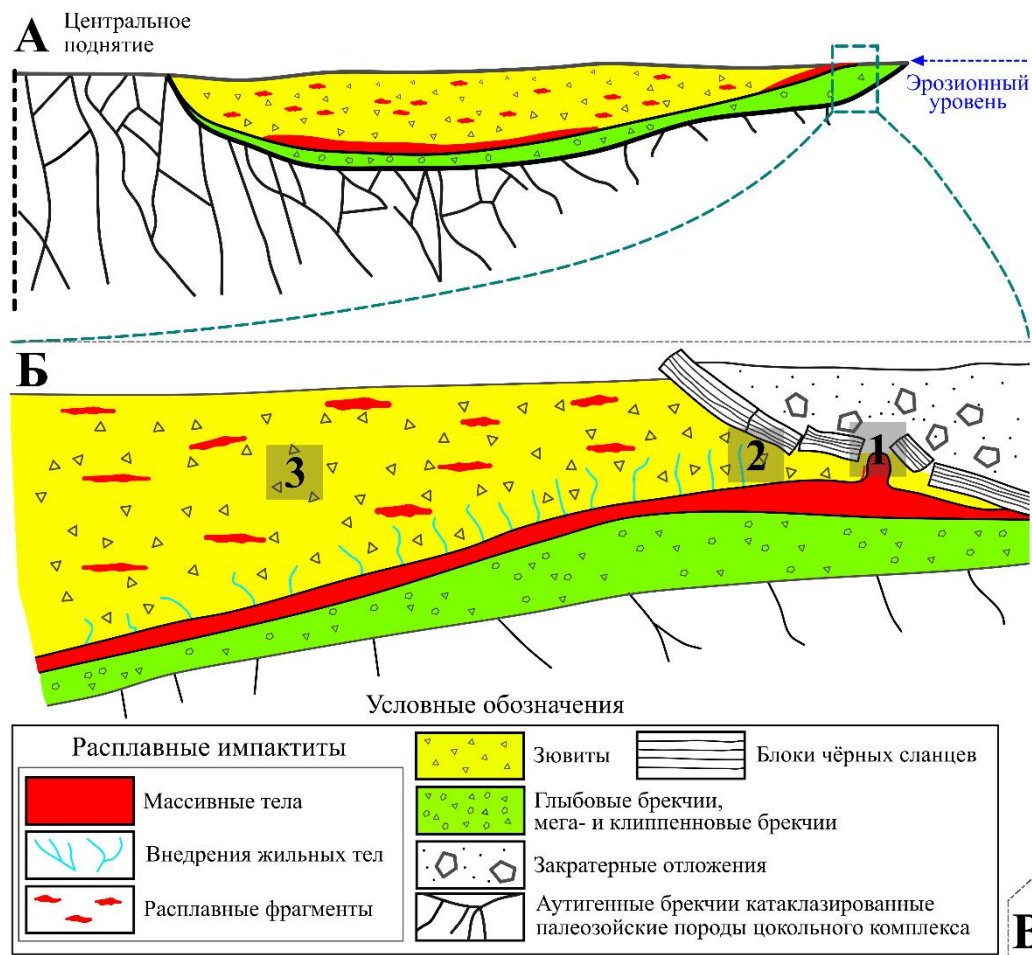
## **Глава 4. Характеристика геологических тел расплавных импактитов Карской астроблемы**

Согласно проведенным полевым работам и анализу публикаций предыдущих исследователей расплавные импактиты Карской астроблемы представлены тремя основными разновидностями – массивными телами, жильными телами ультравысокобарных импактных стекол в зювитах, а также расплавными бомбами в зювитах.

### **4.1. Общая характеристика расплавных тел**

Геологическая позиция трёх типов тел расплавных импактитов в целом относится к коптогенному комплексу астроблемы. На основе схематической геологической карты Карской астроблемы (Масайтис и др., 1980), а также серии генерализованных моделей геологических структур сложных кратеров (Stöffler et al., 2013; French, 1998; Kenkmann et al., 2014) построена схема, показывающая положение трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы (рис. 4.1).

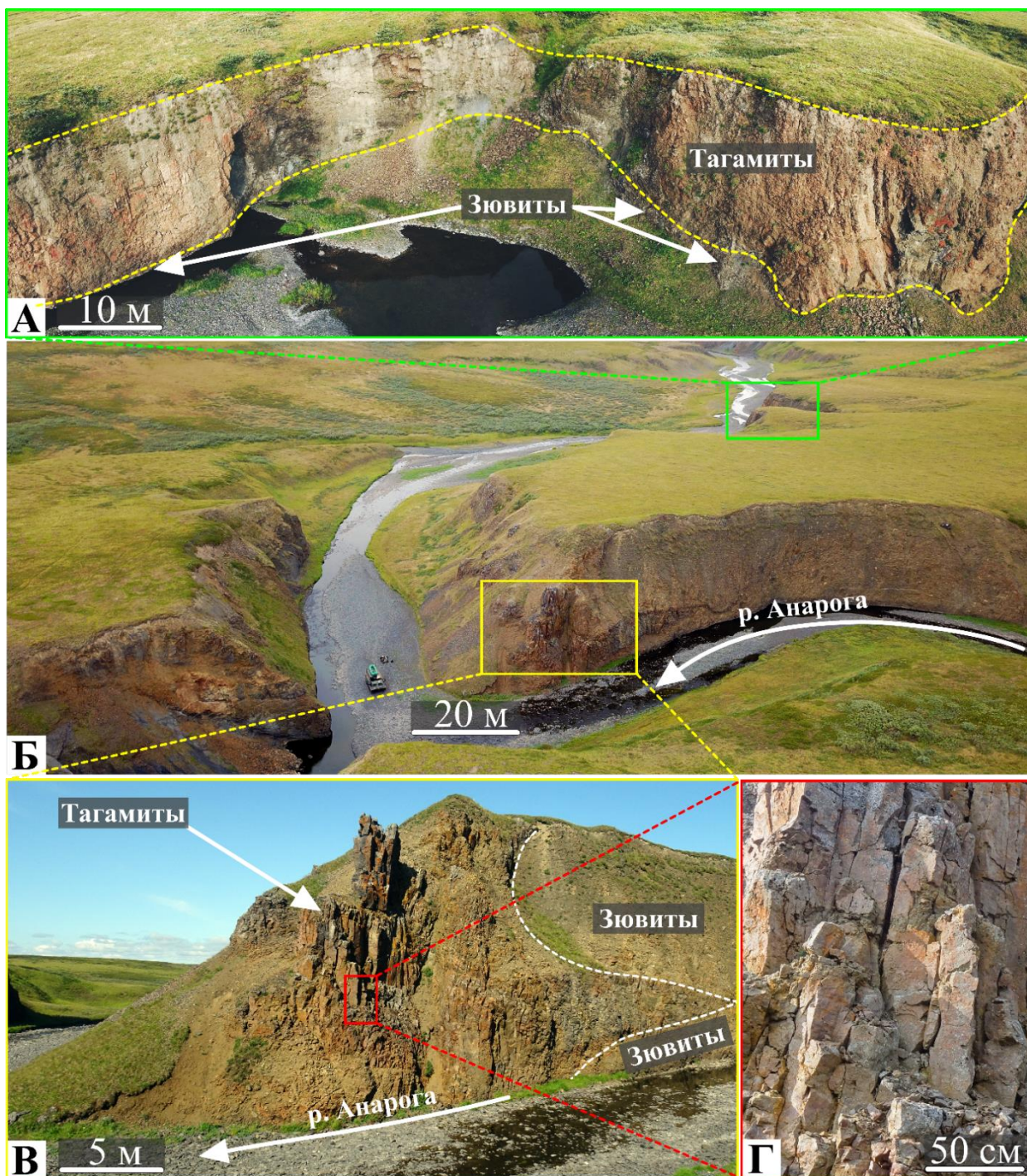
**Массивные расплавные тела.** На р. Анарога массивная разновидность расплавного импактита представлена в виде плащеобразного тела (рис. 4.2 А), а также в тесном пространственном взаимоотношении с зювитом (рис. 4.2 Б, В, Г). Данная разновидность могла возникнуть в результате центробежного перемещения больших объёмов импактного расплава от центра астроблемы к её периферии. Тело массивного расплавного импактита на р. Кара расположено в более тесном пространственном взаимоотношении с зювитом жильного комплекса и брекчией (Zubov, Shumilova, 2021). Видимая мощность скальных выходов достигает 8–10 метров. Порода характеризуется коричневато-рыжей окраской, гладкой поверхностью с раковистым изломом и острыми сколами, а также флюидалной полосчатой структурой течения (рис. 4.7), в некоторых случаях присутствуют практически однородные участки. Внутри массивных тел присутствуют редкие включения обломков песчаников мишени. По трещиноватости наблюдается обильное развитие гидроксидов железа, придающее бурый оттенок поверхности монолитных блоков.



**Рисунок 4.1.** Геологическая позиция разновидностей тел расплавных импактитов в структуре Карской астроблемы. Условные обозначения: А – схема разреза Карской астроблемы (вне масштаба) (по Масайтис и др., 1980 с дополнениями), Б – фрагмент разреза Карской астроблемы с жильным комплексом по (Shumilova et al., 2019; 2020), В – положение трёх типов расплавных тел в коренных выходах. На врезках показаны увеличенные фрагменты участков обнажений. Условные обозначения: ЧС – чёрные сланцы, МТ – массивное тело, 1 – массивное тело, 2 – жильные тела, 3 – расплавные бомбы.

Основная масса (матрикс) массивного расплавленного импактита представлена микрокристаллическим агрегатом тёмно-серо-коричневого цвета, содержащим угловатые, часто частично оплавленные обломки пород мишени. Массивный расплавленный импактит характеризуется флюидальной текстурой течения, выраженной за счёт разноокрашенных зон расплавленного потока светло-серого и тёмно-серого цвета (рис. 4.3).

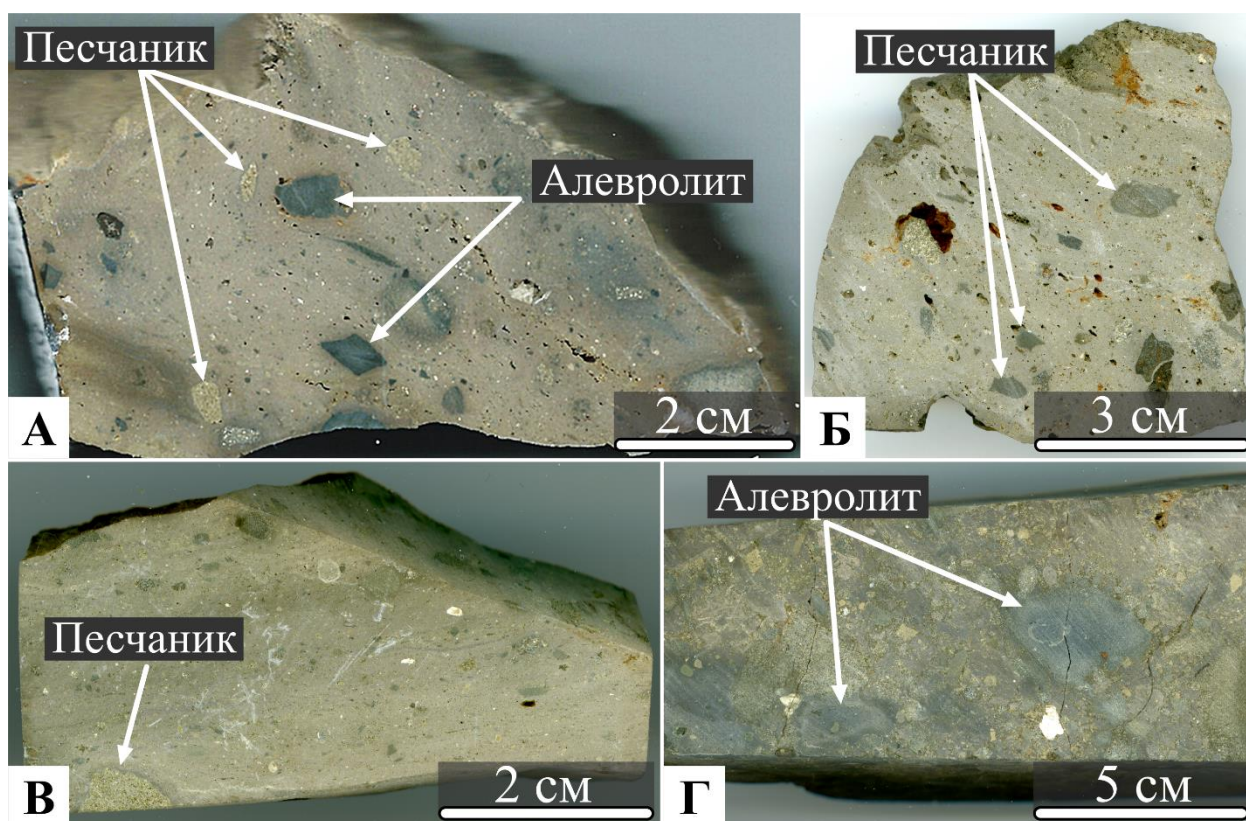
Обломки представлены в основном реликтами двух литологических разновидностей – алевролитов и песчаников, реже встречаются фрагменты углеродсодержащих сланцев, углей, реликтовых зёрен кварца и полевых шпатов. Алевролиты – тёмно-серые, в основном массивные, иногда прослеживается полосчатость. Обломки песчаников обуславливают местами пятнистую текстуру течения массивных расплавленных импактитов, они чаще существенно оплавлены, нежели обломки алевролитов. По всей массе неравномерно распределены мелкие (до 1 мм) угловатые обломки кристаллов кремового и серо-кремового цвета, представленные полевыми шпатами.



**Рисунок 4.2.** Коренные скальные выходы массивного расплавленного импактита на р. Анарога. Фотографии А, Б получены при помощи квадрокоптера.

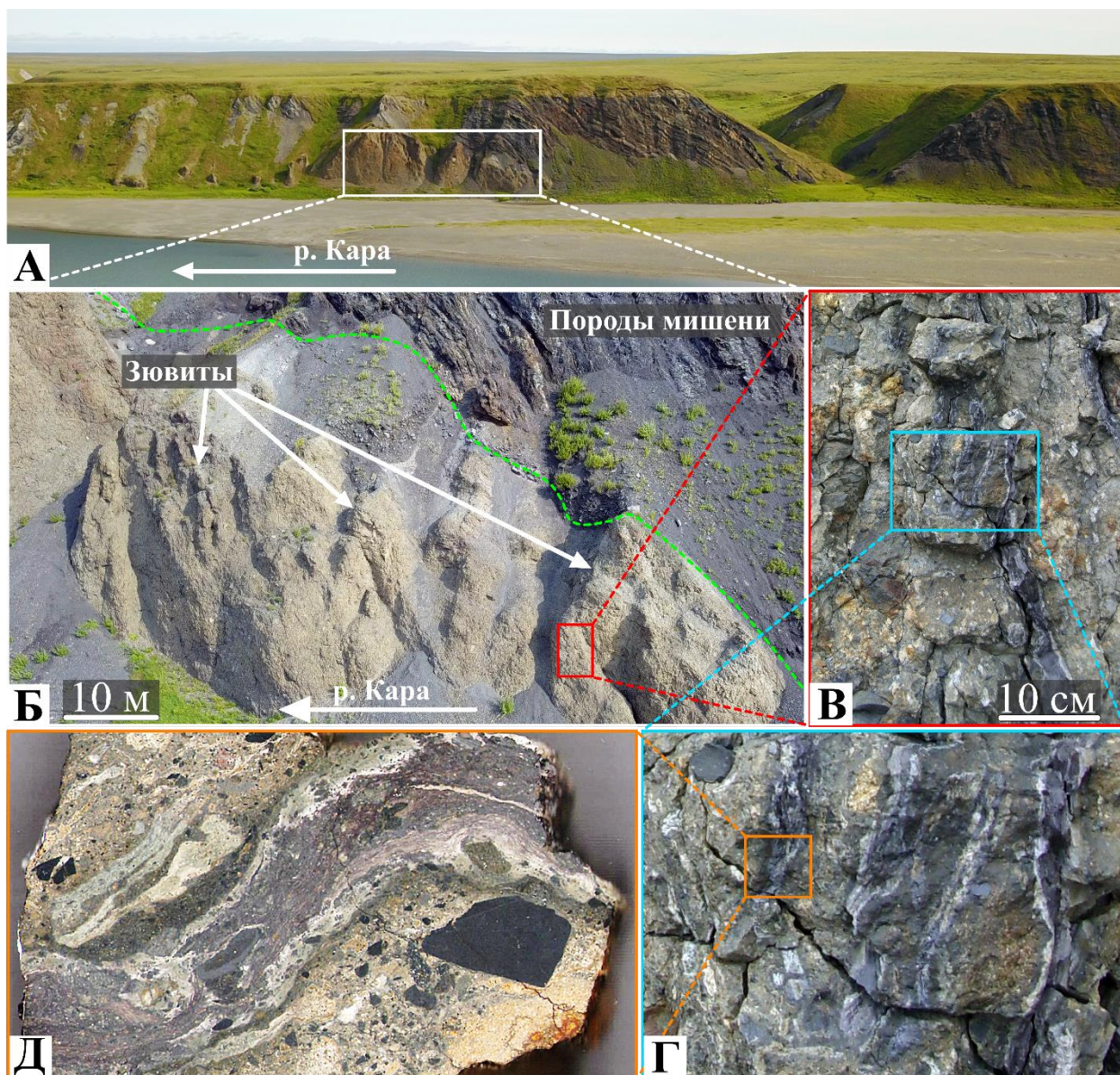
Миндалины в данных тагамитах крайне неоднородны и в некоторых случаях подчёркивают флюидалность (рис. 4.3). Форма миндалин разнообразна: встречаются изометричные, удлинённые, но в основном квазиизометричные сечения. В отдельных случаях внутренняя поверхность миндалин имеет буроватые оттенки, что, вероятно, связано с воздействием воды.





**Рисунок 4.3.** Пришлифованные пластины массивного расплавленного импактита с флюидалной текстурой и оплавленными фрагментами алевролитов и песчаников из столбообразного тела на р. Анарога. Примечание: А-Г – разные образцы с областью опробования в пределах 1 м, Г – участок тела с обильным присутствием мелкообломочной компоненты).

**Жильные тела.** В коренных выходах зювитов массивного облика на правом и левом берегах р. Кара недалеко от устья руч. Тогорей расположены жильные тела субвертикальной ориентировки (рис. 4.4). Жильные тела имеют извилистую форму, как правило, маломощные – 2-3 см с раздувами до 10 см. Они формируют субвертикальную штокверкоподобную систему. Данные образования имеют секущий характер по отношению к вмещающему зювиту (рис. 4.4 В, Г). Текстура тел флюидалная (гетеротаксовая). Цвет стёкол преимущественно серый, чёрный с фиолетовым оттенком. Строение прожилков зональное, внешняя (контактовая) зона мощностью до 5 мм имеет белую окраску. Вмещающий зювит имеет существенно пеструю окраску за счет разнообразия обломочной составляющей, представленной разноокрашенными обломками алевролитов, песчаников, алевропесчаников. Обломки алевролитов имеют размеры в пределах от 1 мм до 1 см, чаще встречаются фрагменты размером 1-4 мм, существенно реже – около 1 см.

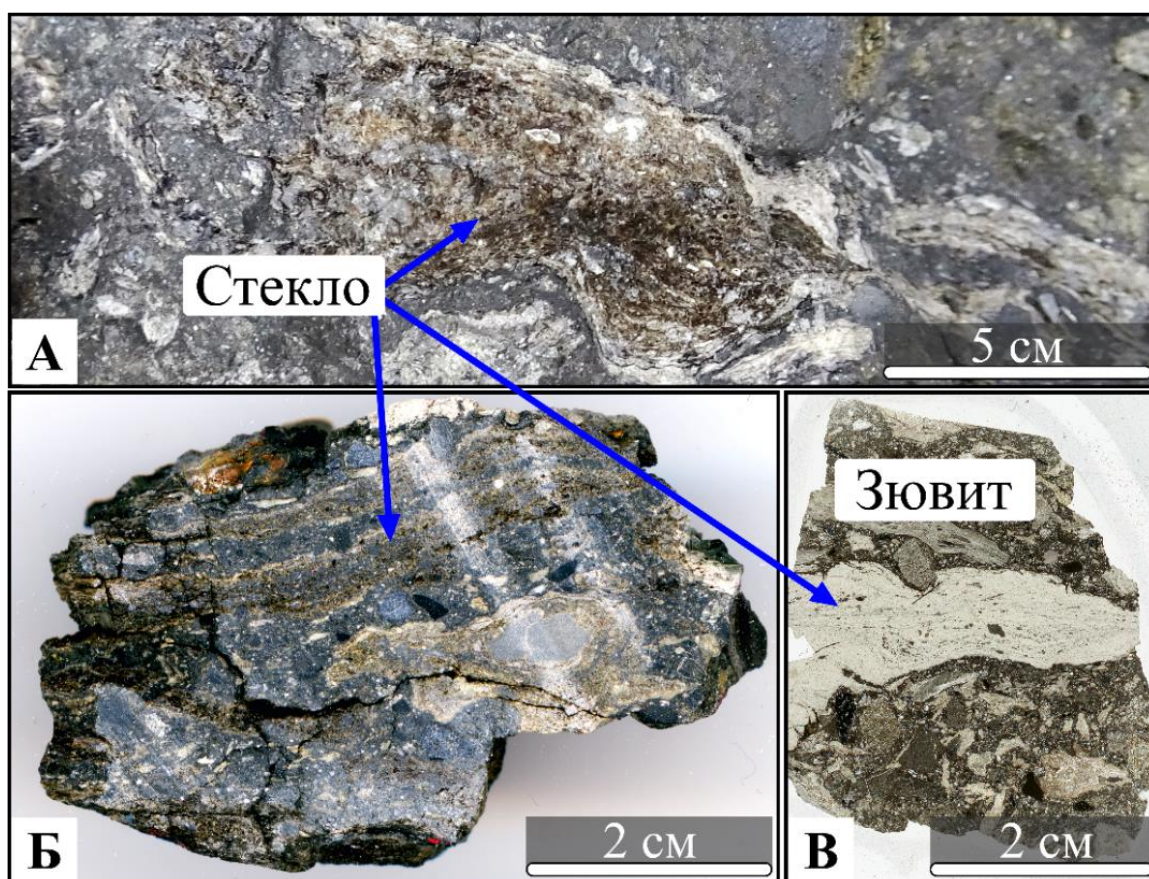


**Рисунок 4.4.** Коренной выход зювитового массива на правом берегу р. Кара (фото А, Б) и жильные тела (черного цвета) во вмещающем зювите (фото В, Г), а также разрез жильного тела с белой приконтактной зоной и вмещающим зювитом (Д, образец Ж/12-115). Снимки А, Б получены при помощи квадрокоптера. Примечание: зелёная пунктирная линия – контакт зювитов и пород мишени.

Текстура обломков алевролитов массивная, однородная, цвет чёрный, форма обломков угловатая, слабо оплавленная. Обломки песчаников крайне трудно выявляются на фоне пёстрого фона брекчии. Крупность зёрен в обломках песчаников составляет до 1 мм. Видимая пористость брекчиевидной массы зювита на первый взгляд крайне скудная, в основном она представлена порами размером до 1 мм.

Геологическая позиция жильного восходящего комплекса в структуре Карского кратера, а также других кратерах не была ранее представлена и описана ни в одной из существующих принципиальных моделей метеоритных кратеров.

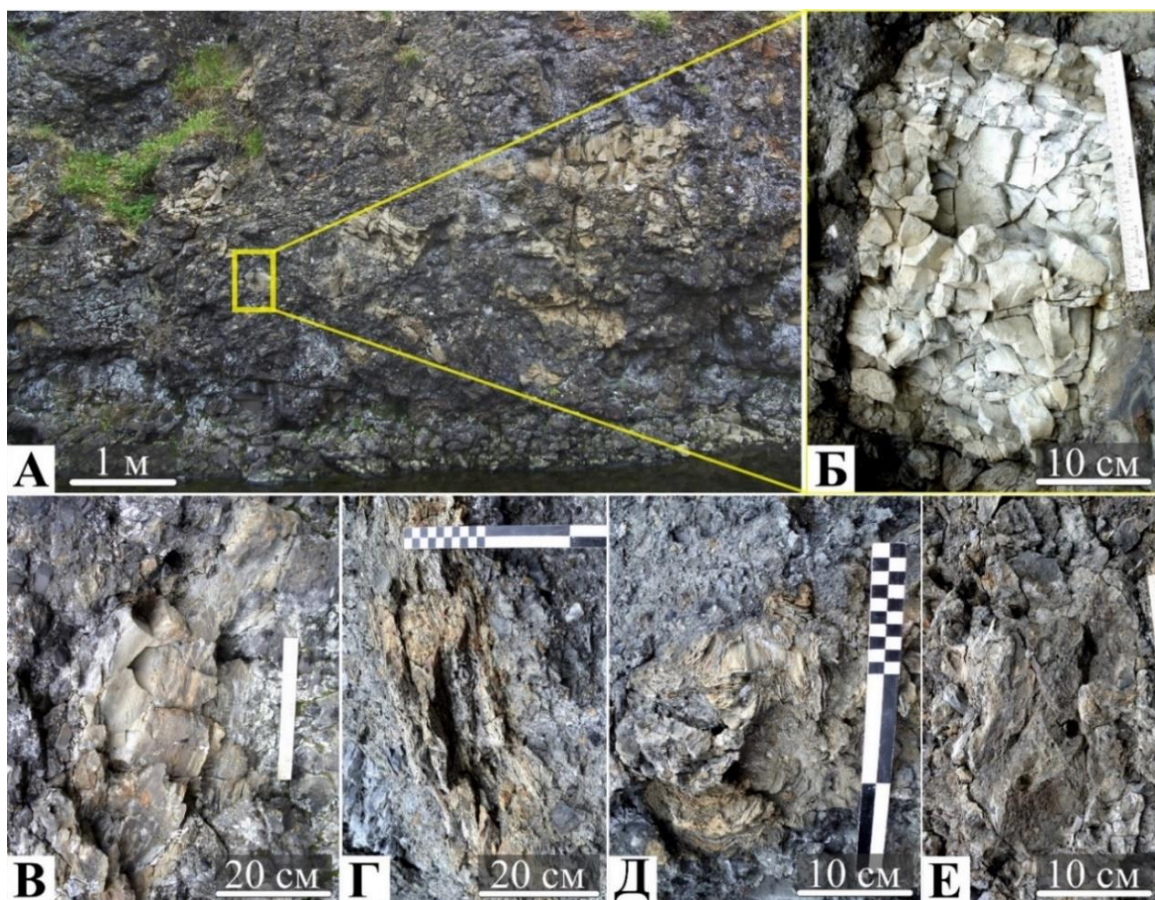
*Жильные стёкла коричневого цвета*, помимо описанных выше жильных тел, были впервые обнаружены в ходе экспедиционных работ 2021 года (рис. 4.5). Они обнаружены в обнажении зювитов на левом берегу р. Кара выше по течению от устья руч. Тогорей. Стёкла имеют аналогичные макроскопические характеристики по сравнению с черными стёклами и отличаются только цветом. Их довольно трудно обнаружить, поскольку они в меньшей степени представлены среди зювитов и имеют меньшие мощности, как правило, до 1 см. Цвет стекла по всей видимости вызван интенсивным окислением матрицы с поверхности жильного тела. В тонком срезе жильные тела практически прозрачные и бесцветные (рис. 4.5Г). Подробная микроскопическая характеристика данных стёкол приведена в разделе 4.2.3.



**Рисунок 4.5.** Коричневое стекло жильного типа в зювите в обнажении на р. Кара (А), пространственные взаимоотношения коричневого стекла и зювита в срезе (Б), а также сканограмма шлифа с жильным коричневым стеклом в зювите (В).

**Бомбы.** Расплавные бомбы имеют иную геологическую позицию по сравнению с массивными и жильными телами (рис. 4.1(3)). Они присутствуют в зювитах практически повсеместно в пределах Карской астроблемы (рис. 4.6), их размеры достигают 0.5 м в поперечнике. В данной работе изучены бомбы из обнажений зювитов на рр. Кара, Анарога, Путью, на руч. Кердосашор.

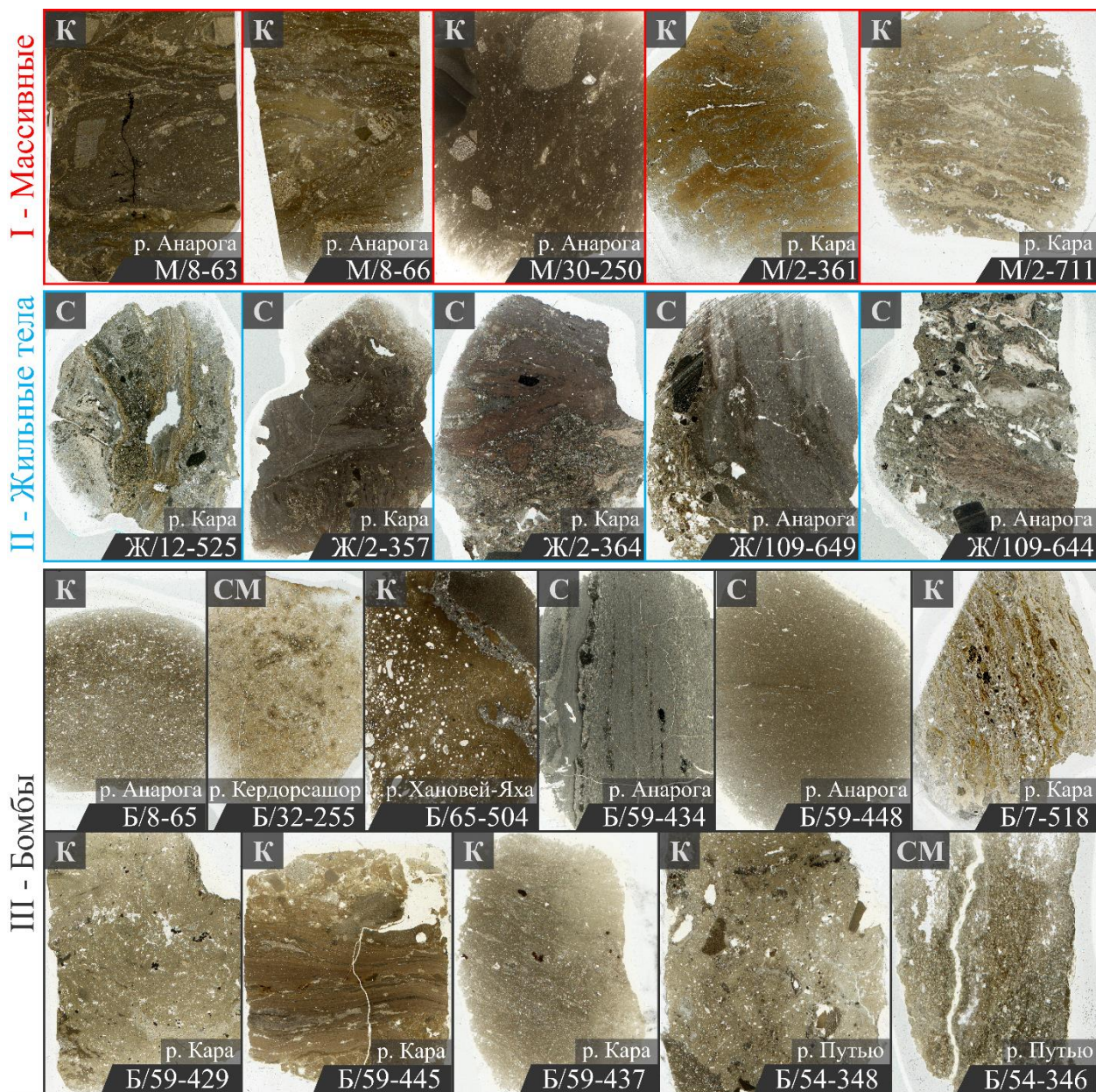
Бомбы относительно довольно разнообразны морфологически и характеризуются в обнажениях субизометричной и существенно удлинённой линзовидной формой видимого сечения (предположительно линзовидные и лепёшковидные в объёме). Цвет данных тел варьируется – светло серые, серые, светло коричневые, коричневые, ярко бурые. Данные тела характеризуются как массивной, так и флюидальной текстурами. В некоторых случаях на периферии бомб отмечается зона с захваченными обломками из вмещающего зювита. Часть бомб подвержена полному замещению смектитовой/глинистой компонентой, что в некоторых случаях приводит к полному их разрушению при контакте с водой.



**Рисунок 4.6.** Коренной выход зювитов в левом борту р. Анарога (фото А) с бомбами импактного расплава (фото Б-Е).

Практически все изученные образцы трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы характеризуются флюидальной текстурой, в них в разном количестве присутствуют обломки осадочных пород мишени (рис. 4.7). Изучаемые расплавные импактиты неоднородны, матрикс имеет разное соотношение кристаллической и аморфной компонент, отличается окраской и пористостью. Особый интерес представляют обломки пород, вовлечённые в расплав и претерпевшие высокотемпературное воздействие, приконтактовые с ними области матрикса, также частично измененные.

Необходимо отметить, что согласно международной классификации среди расплавных импактитов также выделяются закратерные (дистальные) микротела – тектиты. Однако в данной работе рассматриваются только внутрикратерные (проксимальные) расплавные импактиты, поскольку в виду длительной эрозии Карской астроблемы дистальные не сохранились. Помимо расплавных бомб в структуре зювитов также присутствуют тела стёкол размером менее 10 см (Максименко и др., 2017), однако в данной работе они не рассматриваются, так как являются породообразующими компонентами зювитов.



**Рисунок 4.7.** Сканограммы полированных шлифов исследованных тел массивных и жильных расплавных импактитов, а также бомб Карской астроблемы, полученные при помощи оптического сканера Epson Perfection V600 Photo; по преобладанию компоненты подразделяются на: С – преимущественно стекловатые, К – преимущественно крипнокристаллические, СМ – преимущественно смектитовые. Размер шлифов ~4×5 см.

## 4.2. Структурно-вещественная характеристика

В главе приведены данные о петро- и геохимической специфике массивных, жильных расплавных импактитов и бомб Карской астроблемы.

### 4.2.1. Петро- и геохимическая характеристика

Основная масса (матрица) трёх типов расплавных импактитов с малым содержанием глинистой/сметитовой компоненты имеет преимущественно алюмосиликатный состав. Средние составы матрицы расплавных импактитов с малым содержанием смектитовой компоненты по данным ЭДС приведены в таблице 4.1.

**Таблица 4.1.** Средние составы матрицы трёх типов расплавных импактитов по данным энергодисперсионной спектроскопии на гомогенных участках (вес. %).

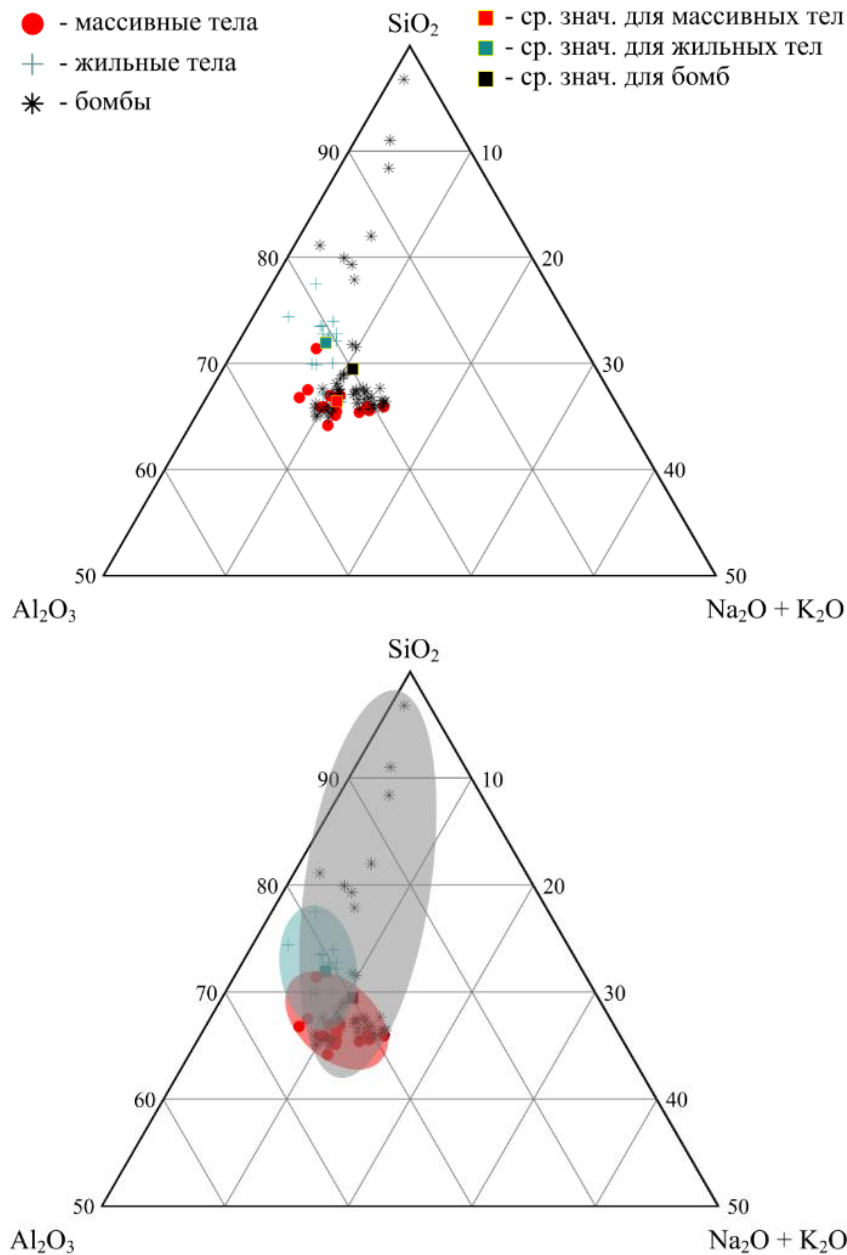
Типы	<i>Массивные</i>		<i>Жильные</i>		<i>Бомбы</i>	
	Ср. знач. (вес. %)	Ст. откл. (вес. %)	Ср. знач. (вес. %)	Ст. откл. (вес. %)	Ср. знач. (вес. %)	Ст. откл. (вес. %)
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3,9	1,1	3,4	1,4	4,1	2,0
<b>MgO</b>	1,2	0,9	1,9	1,5	0,5	0,4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20,3	4,0	17,3	3,9	18,7	4,2
<b>SiO<sub>2</sub></b>	63,6	6,9	63,6	7,5	65,4	7,0
<b>K<sub>2</sub>O</b>	5,7	3,4	2,6	1,1	5,9	3,6
<b>CaO</b>	4,0	1,6	3,1	1,4	2,4	1,5
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,5	0,2	0,7	0,2	0,7	0,3
<b>FeO (общ.)</b>	1,5	1,2	3,4	1,8	0,9	0,6
<b>Сумма</b>	99,7	1,2	95,7	3,3	97,9	3,4

Построенная треугольная диаграмма (SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) вещественного состава расплавных импактитов по данным локальных микрозондовых анализов указывает на более локализованное распределение фигуративных точек составов массивных и жильных тел (рис. 4.8). Точки составов бомб образуют более обширное поле. Средние значения составов для трёх типов тел расплавных импактитов Карской астроблемы демонстрируют довольно близкое расположение.

Полученные данные и сопоставление локальных и площадных анализов вещественного состава матрицы трёх типов расплавных импактитов при помощи

энергодисперсионной спектроскопии указывают на слабую вариативность состава матрицы как для массивных, так и жильных тел, что может указывать на относительно макро-гомогенный характер импактного расплава, формирующего разные тела (табл. 4.2, рис. 4.9). При этом вещественный состав расплавных бомб намного более вариативен в пределах своего типа расплавного импактита.

Сравнение площадных анализов петрохимического состава стёкол жильных тел серого и коричневого цветов указывает на 1-2 вес. % большее содержание FeO (общ.) в коричневых стёклах по отношению к серым.



**Рисунок 4.8.** Треугольная диаграмма составов матрицы трёх типов тел расплавных импактитов Карской астроблемы (сверху) и области распределения фигуративных точек анализов по трём типам тел (снизу).



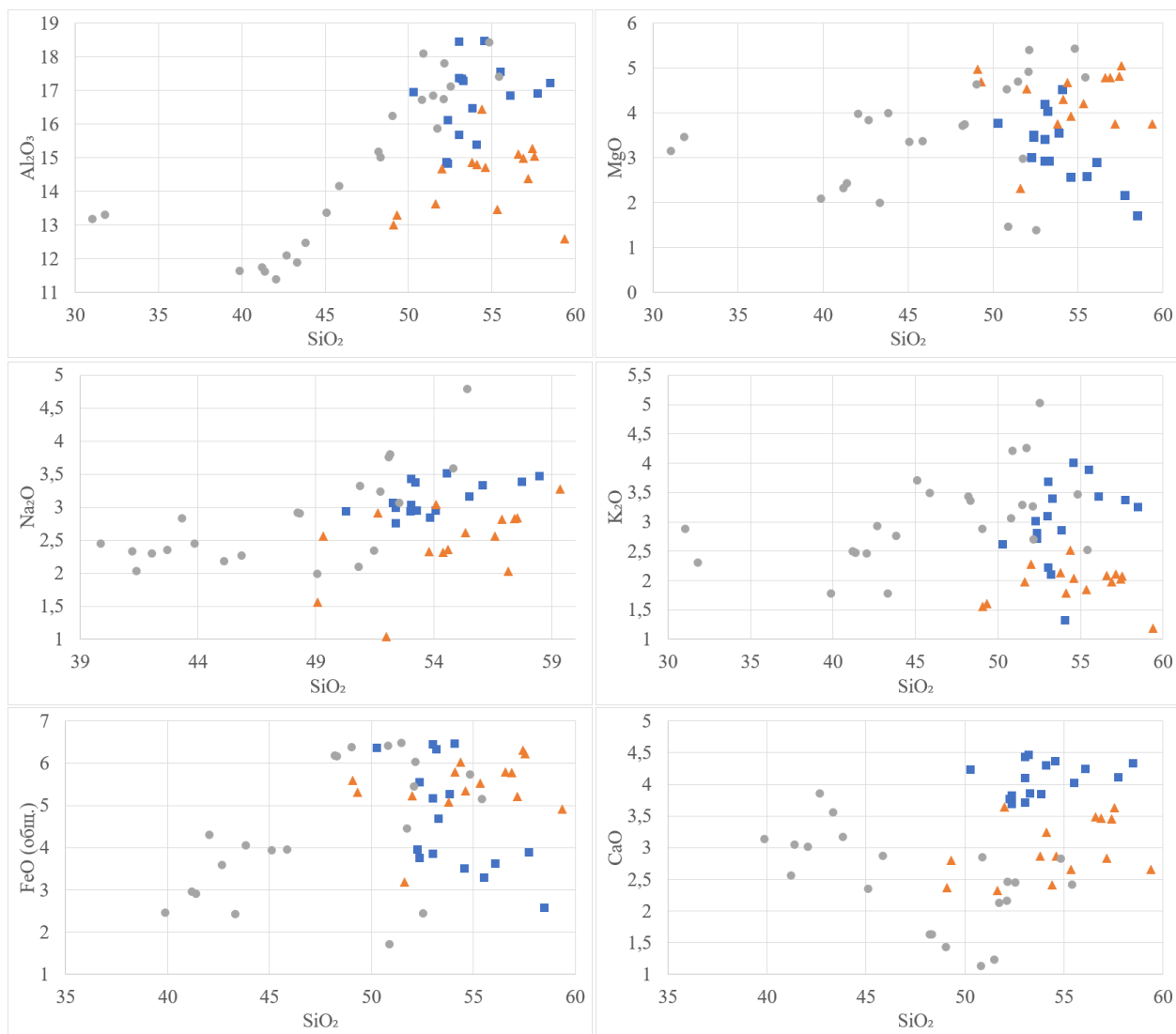
**Таблица 4.2.** Вещественный состав трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы по данным площадного ЭДС анализа (вес. %).

№ Образца	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO (общ.)	MnO	BaO	Сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>Массивные тела</b>													
M/8-63 (S1)	3,2	2,5	17,5	55,5		3,8	4,0	1,0		3,3			91,0
M/8-63 (S2)	3,5	2,6	18,4	54,5		4,0	4,4	0,7		3,5			91,7
M/8-63 (S3)	3,4	2,9	18,4	53,0		3,7	4,4	1,3		3,8			91,1
M/8-66 (S1)	3,4	2,2	16,9	57,7		3,4	4,1	0,9		3,9			92,5
M/8-66 (S2)	2,9	3,8	16,9	50,3		2,6	4,2	1,0		6,4			88,1
M/8-66 (S3)	3,5	1,7	17,2	58,5		3,2	4,3	0,91		2,6			92,0
M/2-361 (S1)	2,9	4,5	15,4	54,1		1,3	4,3	0,8		6,4			89,8
M/2-361 (S2)	3,4	4,0	17,3	53,2		2,1	4,5	1,0		6,3			91,8
M/2-361 (S3)	3,0	3,4	15,7	53,0		2,2	3,7	0,8		5,2			87,1
M/30-250 (S1)	3,0	3,4	14,8	52,3		2,8	3,8	0,8	0,2	3,7			85,0
M/30-250 (S2)	3,3	2,9	16,8	56,1		3,4	4,2	0,9	0,2	3,6			91,5
M/30-250 (S3)	3,1	3,0	14,9	52,2		3,0	3,8	0,8	0,2	3,9			84,9
M/2-711 (S1)	2,9	4,2	17,4	53,0		3,1	4,1	0,93		6,4			92,1
M/2-711 (S2)	2,8	3,5	16,4	53,8		2,8	3,8	0,9		5,3			89,6
M/2-711 (S3)	2,7	3,5	16,1	52,3		2,7	3,7	1,0		5,5			87,7
<b>Жильные тела (серые)</b>													
Ж/12-525 (S1)	2,6	4,7	13,3	49,3	0,5	1,6	2,8	0,8		5,3		0,3	81,1
Ж/12-525 (S2)	3,0	4,3	14,8	54,1	0,4	1,79	3,2	0,9		5,8		0,5	88,8
Ж/12-525 (S3)	2,9	2,3	13,6	51,6		2,0	2,3	1,0		3,2			79,0
Ж/2-364 (S1)	2,8	5,0	15,0	57,5		2,1	3,6	0,9		6,2			93,3

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Ж/2-364 (S2)	2,8	4,8	15,0	56,9		2,0	3,7	0,8		5,8			91,5
Ж/2-364 (S3)	2,6	4,8	15,1	56,6		2,1	3,5	1,0		5,8	0,2		91,6
Ж/109-649 (S1)	2,0	3,7	14,4	57,2		2,1	2,8	0,8		5,2			88,2
Ж/109-649 (S2)	2,3	3,7	14,9	53,8		2,1	2,9	0,8		5,1			85,7
Ж/109-649 (S3)	2,4	3,9	14,7	54,6		2,0	2,9	0,8		5,3			86,7
Ж/109-649 (S4)	2,3	4,7	16,4	54,4		2,5	2,4	1,3		6,0			90,1
Ж/109-649 (S5)	1,0	4,5	14,7	52,0		2,3	3,6	0,9		5,2			84,3
Ж/2-357 (S1)	3,3	3,7	12,6	59,4		1,2	2,7	0,7		4,9			88,4
Ж/2-357 (S2)	2,6	4,2	13,5	55,3	0,2	1,8	2,6	0,6		5,5			86,5
Ж/2-357 (S3)	2,8	4,8	15,3	57,4	0,3	2,0	3,4	0,9		6,3			93,3
Ж/2-357 (S4)	1,6	5,0	13,0	49,1		1,6	2,37	0,8		5,6			79,0
<b>Жильные тела (коричневые)</b>													
Ж/2-724 (S1)	2,6	4,9	17,4	61,9	0,4	2,7	2,8	1		7,1			100,9
Ж/2-724 (S2)	2,5	4,7	17,2	61,0	0,5	2,6	3,0	1,0		7,0			99,6
Ж/2-724 (S3)	2,7	5,4	17,4	62,9	0,4	2,5	3,3	1,0		7,1			102,6
Ж/2-724 (S4)	2,5	4,8	17,2	62,3	0,7	2,7	3,4	0,9		6,9			101,5
Ж/2-723-2 (S1)	2,4	4,8	17,2	60,1	0,6	2,6	3,0	1,0		7,3	0,2		99,3
Ж/2-723-2 (S2)	2,6	4,8	16,9	60,6	0,6	2,6	2,7	0,9		7,4			99,2
Ж/2-723-2 (S3)	2,5	5,0	16,51	59,1	0,4	2,3	3,3	1,0		6,9			97,0
<b>Бомбы</b>													
Б/59-434 (S1)	2,0	4,6	16,2	49,1		2,9	1,4	0,8		6,4			83,4
Б/59-434 (S2)	2,1	4,5	16,7	50,8		3,0	1,1	0,7		6,4			85,4
Б/59-434 (S3)	2,3	4,7	16,8	51,5		3,3	1,2	0,8		6,5			87,2
Б/59-448 (S1)	2,9	3,7	15,2	48,2		3,4	1,6	0,9		6,2			82,1
Б/59-448 (S2)	2,9	3,7	15,0	48,3		3,3	1,6	0,9		6,2			82,0

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Б/65-504 (S1)	3,6	5,4	18,4	54,8		3,5	2,8	1,0		5,7	0,5		95,7
Б/65-504 (S2)	3,8	5,4	17,8	52,2		2,7	2,4	1,0		6,0	0,5		91,8
Б/65-504 (S3)	3,7	4,9	16,7	52,1		3,3	2,2	0,9		5,4	0,5		89,8
Б/65-504 (S4)	4,8	4,8	17,4	55,4	0,6	2,5	2,4	0,9		5,1	0,4		94,4
Б/54-348 (S1)	2,4	2,1	11,6	39,9	0,2	1,8	3,1	0,6		2,4			64,3
Б/54-348 (S2)	2,8	2,0	11,9	43,3	0,3	1,8	3,5	0,6		2,4			68,7
Б/54-348 (S3)	2,3	2,3	11,7	41,2	0,3	2,5	2,5	0,7		2,9			66,6
Б/54-348 (S4)	2,0	2,4	11,6	41,4	0,3	2,5	3,0	0,6		2,9			66,8
Б/59-445 (S1)	3,1	1,4	17,1	52,6		5,0	2,4	0,9		2,4			85,0
Б/59-445 (S2)	3,2	3,0	15,9	51,8		4,2	2,1	0,9		4,4			85,6
Б/59-445 (S3)	3,3	1,4	18,1	50,9		4,2	2,8	1,1		1,7			83,6
Б/59-437 (S1)	2,2	3,3	13,3	45,1		3,7	2,3	0,7		3,9			74,7
Б/59-437 (S2)	2,3	3,4	14,2	45,9		3,5	2,9	0,8		3,9			76,7
Б/59-429 (S1)	2,4	4,0	12,5	43,9	0,5	2,7	3,2	0,6		4,0	0,2		74,0
Б/59-429 (S2)	2,3	4,0	11,4	42,1	1,2	2,4	3,0	0,6		4,3			71,3
Б/59-429 (S3)	2,3	3,8	12,1	42,7	0,4	2,9	3,8	0,6		3,6	0,2		72,5
	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO (общ.)</b>	<b>MnO</b>	<b>BaO</b>	
<i>Массивные тела</i>													
<b>Ср. знач (вес. %)</b>	<b>3,1</b>	<b>3,2</b>	<b>16,7</b>	<b>54,0</b>		<b>3,0</b>	<b>4,1</b>	<b>0,9</b>	<b>0,2</b>	<b>4,7</b>			
<b>Ст. откл (вес. %)</b>	<i>0,2</i>	<i>0,7</i>	<i>1,1</i>	<i>2,1</i>		<i>0,7</i>	<i>0,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>1,3</i>			
<i>Жильные тела (серые)</i>													
<b>Ср. знач (вес. %)</b>	<b>2,5</b>	<b>4,3</b>	<b>14,4</b>	<b>54,6</b>	<b>0,3</b>	<b>1,9</b>	<b>3,0</b>	<b>0,9</b>		<b>5,4</b>		<b>0,4</b>	
<b>Ст. откл (вес. %)</b>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>1,0</i>	<i>3,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>0,5</i>	<i>0,2</i>		<i>0,7</i>		<i>0,1</i>	

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
<i><b>Жильные тела (коричневые)</b></i>													
<b>Ср. знач (вес. %)</b>	<b>2,5</b>	<b>4,9</b>	<b>16,9</b>	<b>59,9</b>	<b>0,5</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>1,0</b>		<b>7,2</b>	<b>0,2</b>		
<b>Ст. откл (вес. %)</b>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,4</i>	<i>0,7</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,1</i>		<i>0,3</i>			
<i><b>Расплавные бомбы</b></i>													
<b>Ср. знач (вес. %)</b>	<b>2,8</b>	<b>3,5</b>	<b>14,7</b>	<b>46,3</b>	<b>0,5</b>	<b>3,1</b>	<b>2,3</b>	<b>0,8</b>		<b>4,3</b>	<b>0,4</b>		
<b>Ст. откл (вес. %)</b>	<i>0,7</i>	<i>1,2</i>	<i>2,4</i>	<i>6,6</i>	<i>0,3</i>	<i>0,8</i>	<i>0,8</i>	<i>0,1</i>		<i>1,5</i>	<i>0,15</i>		



**Рисунок 4.9.** Вариационные диаграммы химического состава трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы по данным площадных ЭДС анализов. Условные обозначения: ▲ – массивные тела, ■ – жильные тела, ● – бомбы.

Помимо площадных микрозондовых анализов были получены данные 14-компонентного силикатного анализа для массивных и жильных тел расплавных импактитов (табл. 4.3). Отдельно для коричневого стекла этим же методом получены данные по содержанию FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (общ.) для оценки отношения двух- и трёхвалентного железа в данных импактитах. Жильные тела коричневого цвета содержат существенно в большем количестве восстановленное железо чем в других расплавных импактитах массивного и жильного типа.

Таблица 4.3. Данные силикатного анализа массивных и жильных тел расплавных импактитов Карской астроблемы (вес. %).

Тип	Массивные тела					Жильные тела					Бомбы		
						Серые							Коричневые
№ обр.	8-63	8-66	8-68	8-686	30-250	2-15	12-116	12-117	12-119	12-115		7-41	7-58
SiO <sub>2</sub>	58,4	59,76	60,32	60,06	60,05	56,56	57,25	59,68	59,16	56,18		57,21	68,97
TiO <sub>2</sub>	0,85	0,85	0,89	0,89	0,88	0,74	0,76	0,89	0,78	0,86		0,71	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,27	15,34	15,91	16,15	15,89	15,17	15	15	15,64	15,07		15,31	8,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	5,78	7,05	6,48	6,1	5,51	7,34	6,94	6,9	6,67	6,93	8,3	6,11	3,76
MnO	0,06	0,08	0,06	0,06	0,07	0,09	0,08	0,09	0,08	0,08		0,11	0,1
CaO	3,94	3,84	3,63	3,63	3,86	3,22	3,09	2,97	2,49	3,45		2,62	2,33
MgO	3,98	5,03	4,51	4,3	4,19	5,8	4,94	5,16	4,86	4,91		5,05	2,89
K <sub>2</sub> O	2,75	2,24	2,41	2,64	2,93	1,64	2,19	1,36	1,91	2,45		4,11	2,63
Na <sub>2</sub> O	3,21	3,08	2,98	3,06	3,15	2,14	2,31	2,66	2,94	2,65		2,79	1,53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16		0,18	0,11
ППП	2,78	1,69	2,1	2,27	3,9	7,12	7,82	5,62	5,97	6,64		4,95	7,87
Сумма с ППП	99,19	99,14	99,47	99,34	100,62	99,98	100,54	100,5	100,67	99,38		99,15	99,29
FeO	2,43	4,74	3,54	3,2	1,52	4,23	3,21	4,33	4,3	3,29	7,09	1,48	0,93
H <sub>2</sub> O	1,33	0,86	1,36	1,3	2,19	2,29	3,12	2,43	2,56	2,5		2,42	1,56
CO <sub>2</sub>	0,08	0,08	0,08	0,08	0,18	0,74	0,96	0,32	0,3	0,46		0,08	0,93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1	1,8	2,6	2,5	3,8	2,6	3,4	2,1	1,9	3,3	0,4	4,5	2,7
FeO / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<i>0,8</i>	<i>2,7</i>	<i>1,4</i>	<i>1,3</i>	<i>0,4</i>	<i>1,6</i>	<i>1,0</i>	<i>2,1</i>	<i>2,3</i>	<i>1,0</i>	<i>16,5</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>

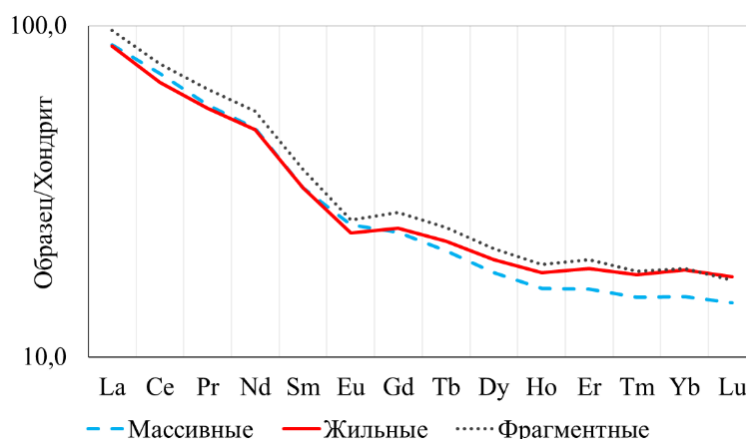
**Геохимия расплавных импактитов.** Распределения химических элементов редкоземельной группы (La-Lu), нормированные на хондрит C1 (Lyubetskaya, 2007), при усреднении значений для каждого типа расплавного импактита указывают на их схожесть (рис. 4.10) (Зубов, Шумилова, 2022). В целом, для всех типов отмечается 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 расплавленным бомбам, а по ряду элементов La-Er для расплавных бомб отмечается некоторое превышение по отношению к двум другим типам тел.

Абсолютные значения содержаний РЗЭ в трёх типах тел расплавных импактитов указывают на следующие особенности (табл. 4.4):

1) Массивные и жильные тела по средним абсолютным значениям содержаний РЗЭ (г/т) очень близки по всем элементам кроме Ce, Dy, Er, Yb, в то время как бомбы обладают большим разбросом значений для ряда La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb.

2) Минимальными отклонениями значений содержания РЗЭ обладают массивные тела, наибольшими – жильные тела (средние значения для стандартного отклонения по всем РЗЭ элементам в зависимости от типа тел: массивные – 0.4 г/т, жильные – 0.9 г/т, бомбы – 1.4 г/т).

3) Зависимость химического состава по РЗЭ элементам от места положения точки опробования в пределах астроблемы ни для одного из типов расплавных импактитов не наблюдается. Массивные расплавные тела на левом и правом берегах р. Кара, а также на р. Анарога также обладают близким составом микрокомпонентов.



**Рисунок 4.10.** Геохимический профиль трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы по средним значениям РЗЭ (Зубов, Шумилова, 2022), нормированных по хондриту C1 (Lyubetskaya, 2007).

**Таблица 4.4.** Усреднённые содержания РЗЭ для массивных, жильных расплавных импактитов и бомб Карской астроблемы (г/т) (Зубов, Шумилова, 2022).

Тип тела	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
<b>Массивные тела</b>														
<b>Ср. знач.</b>	<b>20,6</b>	<b>44,4</b>	<b>5,4</b>	<b>22,6</b>	<b>4,9</b>	<b>1,4</b>	<b>4,8</b>	<b>0,8</b>	<b>4,5</b>	<b>0,9</b>	<b>2,6</b>	<b>0,4</b>	<b>2,4</b>	<b>0,4</b>
<i>Ст. откл.</i>	<i>1,0</i>	<i>1,7</i>	<i>0,3</i>	<i>1,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,0</i>
Мин. знач.	18,9	42,3	5,0	21,3	4,6	1,4	4,6	0,8	4,3	0,8	2,4	0,4	2,3	0,3
Макс. знач.	21,4	46,4	5,6	24,1	5,2	1,5	5,0	0,8	4,8	1,0	2,9	0,4	2,7	0,4
<b>Жильные тела</b>														
<b>Ср. знач.</b>	<b>20,4</b>	<b>41,9</b>	<b>5,3</b>	<b>22,4</b>	<b>4,9</b>	<b>1,4</b>	<b>4,9</b>	<b>0,8</b>	<b>4,9</b>	<b>1,0</b>	<b>3,0</b>	<b>0,4</b>	<b>2,9</b>	<b>0,4</b>
<i>Ст. откл.</i>	<i>2,2</i>	<i>5,8</i>	<i>0,5</i>	<i>1,9</i>	<i>0,4</i>	<i>0,1</i>	<i>0,4</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,0</i>	<i>0,3</i>	<i>0,0</i>
Мин. знач.	16,7	33,9	4,5	19,4	4,3	1,2	4,2	0,7	4,4	0,8	2,6	0,4	2,6	0,4
Макс. знач.	23,0	50,1	5,9	24,6	5,4	1,5	5,4	0,9	5,3	1,1	3,3	0,5	3,3	0,5
<b>Бомбы</b>														
<b>Ср. знач.</b>	<b>22,8</b>	<b>47,7</b>	<b>6,0</b>	<b>25,4</b>	<b>5,5</b>	<b>1,5</b>	<b>5,5</b>	<b>0,9</b>	<b>5,3</b>	<b>1,1</b>	<b>3,2</b>	<b>0,5</b>	<b>3,0</b>	<b>0,4</b>
<i>Ст. откл.</i>	<i>4,2</i>	<i>7,8</i>	<i>0,9</i>	<i>3,4</i>	<i>0,7</i>	<i>0,2</i>	<i>0,7</i>	<i>0,1</i>	<i>0,7</i>	<i>0,1</i>	<i>0,4</i>	<i>0,1</i>	<i>0,4</i>	<i>0,1</i>
Мин. знач.	17,9	38,7	5,0	21,8	4,7	1,2	4,5	0,7	4,2	0,8	2,6	0,4	2,4	0,3
Макс. знач.	31,3	60,4	7,6	31,9	6,9	1,9	6,9	1,1	6,7	1,3	3,8	0,6	3,7	0,5

**Примечание:** **ср. знач.** – среднее по нескольким образцам (массивные тела – 6 обр., жильные тела – 6 обр., бомбы – 12 обр.); **мин. знач.** – минимальное значение; **макс. знач.** – максимальное значение; **ст. откл.** – стандартное отклонение.



Полученные данные относительного содержания Co, Ni, Ir, Pt и Au в трёх типах тел расплавных импактитов по абсолютным значениям достаточно близки (табл. 4.5).

**Таблица 4.5.** Содержание Co, Ni, Ir, Pt, Au в расплавных импактитах по данным ИСП-МС (г/т).

Тип тела	Образец №	Co	Ni	Ir	Pt	Au
Массивные тела	Кр-2-711	25.4	136.8	н.о.	0.403	0.071
	Кр-2-361	24.2	136.7	0.007	0.427	0.090
	Кр-8-66	20.9	116.8	0.011	0.424	0.091
	Кр-8-63	23.0	167.7	0.005	0.419	н.о.
	Кр-30-250	23.0	124.0	н.о.	0.422	н.о.
Жильные серые тела	Кр-109-649а	21.1	169.2	0.009	0.422	0.076
	Кр-109-644	19.4	183.8	0.008	0.459	0.112
	Кр-2-364	23.2	174.6	0.006	0.390	0.135
	Кр-2-357	22.0	145.7	0.010	0.477	0.100
	Кр-12-392	22.1	162.7	н.о.	0.421	0.105
	Кр-12-525	24.1	142.6	0.009	0.450	0.113
Жильные коричневые	Кр-2-723_2	21.0	96.0	0.019 (0.009)*	0.064 (0.520)**	0.063
Бомбы	Кр-59-437	19.12	85.5	н.о.	0.483	0.091
	Кр-59-429	22.11	122.1	н.о.	0.427	0.112
	Кр-59-445	13.3	36.8	н.о.	0.467	н.о.
	Кр-54-346	22.39	111.7	0.004	0.530	н.о.
	Кр-54-348б	24.4	143.6	0.011	0.413	0.076
	Кр-68-504а	21.1	104.4	0.010	0.442	0.085
	Кр-7-518	24.3	137.7	0.005	0.487	0.073
	Кр-59-448а	25.4	125.8	0.005	0.501	0.090
	Кр-32-255	9.9	65.2	0.004	0.430	н.о.
	Кр-8-65	12.4	111.6	0.005	0.438	0.074
	Кр-59-434	29.6	169.0	н.о.	0.495	0.128
	Кр-20-174б	8.8	69.4	н.о.	0.432	0.102
	<b>Среднее содержание по типам тел (г/т)</b>					
<b>Тип тела</b>		<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Ir</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>
Массивные тела		23.2	136.4	0.005	0.419	0.050
Жильные серые тела		22.0	163.1	0.007	0.436	0.107
Жильное коричневое тело***		21.0	96.0	0.019 (0.009)*	0.064 (0.520)**	0.063
Бомбы		19.4	106.9	0.004	0.462	0.069

**Примечание:** \*, \*\* – содержание Ir и Pt для коричневого жильного стекла выполнялось в ЦКП «Геонаука» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) без использования стандарта. В скобках представлены значения после применения поправки на аналогичные полученные данные на этом приборе для серого жильного стекла; \*\*\* – выборка по одному образцу; н.о. – не обнаружено.

#### 4.2.2. Соотношение кристаллической и аморфной компонент импактитов

Фазовое состояние исследованных образцов расплавных импактитов является важным аспектом не только как критерий для определения положения импактитов в систематике, но и для выяснения общей специфики расплавных импактитов. Современная международная классификация импактитов (Stöffler, Hamann et al., 2018) в целом затрагивает вопрос соотношения кристаллической и аморфной компонент импактитов, однако на схеме данный аспект не представлен (рис. 1.3). Отечественные классификации учитывают фазовое состояние расплавных импактитов, однако остаются не ясными критерии определения границы по количеству присутствующего стекла величиной 10% (Фельдман, 1990).

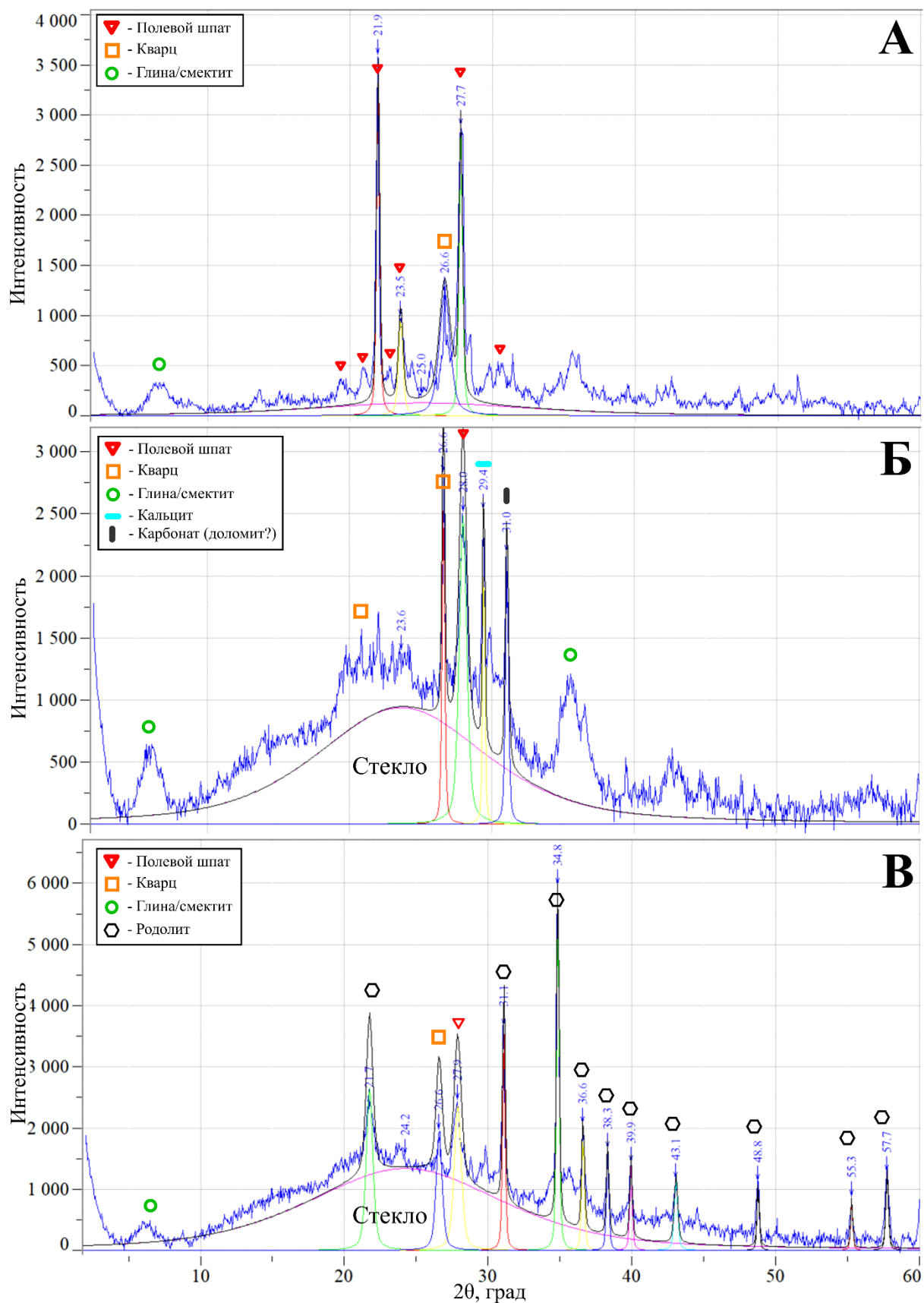
Оптическая поляризационная микроскопия не позволяет в полной мере охарактеризовать расплавные импактиты в связи с очень тонкой микроструктурой их основной криптокристаллической массы и присутствием смектитовой компоненты, интенсивно развитой во всех импактитах. Оценка соотношения кристаллической и аморфной компонент образцов определяется по данным рентгенофазового анализа (рис. 5.1). Последняя позволила установить относительное содержание кристаллической компоненты как отношение суммы площадей пиков кристаллической компоненты к площади аморфного гало на дифрактограммах по методике количественной оценки с помощью рентгенофазового анализа (Rowe et al., 2012; Исаенко и др., 2018).

Расчёт соотношения кристаллической и аморфной компонент образца производится 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. Декомпозиция дифрактограмм на отдельные пики производилась в программе LabSpec 5.

Соответствующие расчёты были проведены для массивных тагамитов, жильных и бомб, что в целом позволило установить следующие интервалы соотношения кристаллической и аморфной компонент для трёх типов расплавных импактитов: массивные - 80-100%, жильные - <20%, расплавные бомбы – 10-100% (погрешность составляет ~10%). Особенно стоит отметить, что жильные тела коричневого цвета являются практически полностью аморфными. Кристаллическая

компонента коричневых стёкол составляет <10%. Необходимо отметить, что массивные расплавные импактиты крайне неоднородны на микроуровне, что существенно влияет на их количественную характеристику в объёме.

В качестве примера далее приведены дифрактограммы, на которых выделены аппроксимированные пики кристаллической фазы, представленной главным образом полевошпатовой компонентой, а также широкое гало, соответствующее аморфной компоненте массивного расплавного импактита (рис. 4.11 А), образца жильного тела серого цвета (рис. 4.11 Б), преимущественно стекловатой расплавной бомбы (рис. 4.11 В).



**Рисунок 4.11.** Рентгеновская дифрактограмма с декомпозированными узкими пиками кристаллической компоненты и широким гало (розовое) для образца массивного расплавного импактита М/8-63 (А), жильного тела с коэситом Ж/2-357 (Б), стекловатой бомбы Б/59-434 из зювита (В).

### 4.2.3. Микроструктуры матрицы

Расплавные импактиты Карской астроблемы обладают большим разнообразием микроструктур расплавной матрицы. Массивные расплавные импактиты по данным растровой электронной микроскопии с локальной и площадной энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией в целом имеют преимущественно криптокристаллическую микроструктуру и алюмосиликатный состав со смектитовой компонентой. Встречаются стекловатые участки.

Жильные тела имеют существенно стекловатую матрицу с пироксеновыми микрокристаллитами и каплями  $\text{SiO}_2$  с ядром из микрокристаллов коэсита и смектита в микроминдалинах.

Бомбы характеризуются большим разнообразием микроструктур, каждая из которых отвечает определённой степени преобразования вещества расплавных импактитов Карской астроблемы, что вызвано присутствием у аморфной компоненты полевошпатового состава особенности раскристаллизации с течением времени в зависимости от размеров и условий нахождения расплавных тел, определяющих температурный режим охлаждения, а также возможностью перехода полевых шпатов в смектитовую компоненту на постимпактной гидротремальной стадии и в условиях гипергенеза.

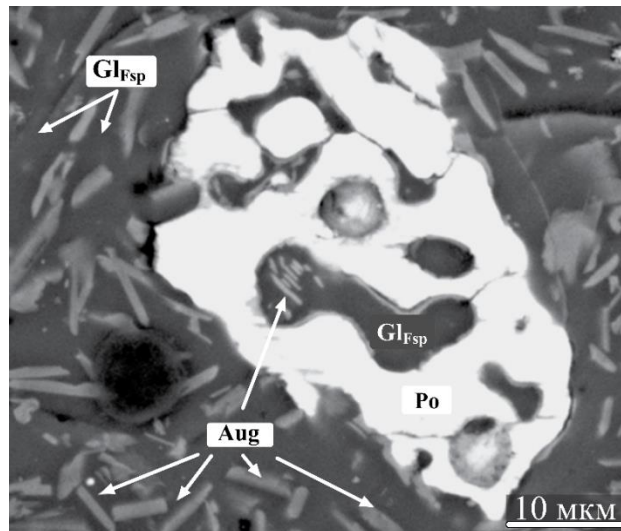
Присутствие в образцах смектитовых минералов, которое подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии и сильным перекрытием рамановского сигнала фоновой люминесценцией, можно отнести как к гидротермальным или вторичным образованиям (продуктам выветривания импактитов), так и к первично образовавшемуся из существенно обводненного ударного расплава. Последнее следует из характерного нахождения смектитов в карских расплавных импактитах и ввиду обнаруженного и описанного ранее необычного нахождения монтмориллонита в импактных стеклах кратера Рис (Германия) (Osinski, 2003), а также согласно данным экспериментального синтеза (Nakazawa, Yamada, Fujita, 1992; Yamada, Nakazawa, Hashizume, 1994; Yamada, Nakazawa, Ito, 1995).

В целом для исследованных расплавных импактитов отмечаются сложные пространственные взаимоотношения криптокристаллической основной массы со смектитовой компонентой. При этом изменение алюмосиликатных стекол является

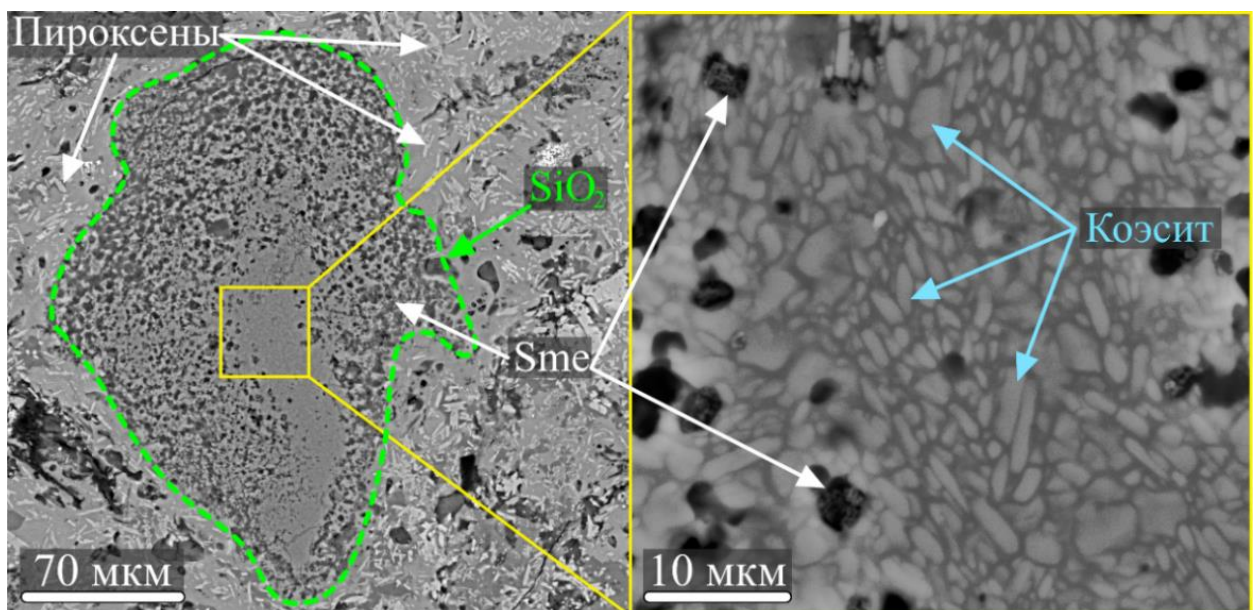
сложным процессом, последовательность которого в ударно-гидротермальных условиях до конца не охарактеризована (Simpson et al., 2018). В данном случае под смектитом подразумеваются слоистые минералы с разбухающей кристаллической решёткой (непосредственно смектиты), а также вторичные глинистые минералы, образованные в результате изменения алюмосиликатных минералов (преимущественно полевошпатовой матрицы расплавных импактитов).

**Жильные тела с коэситом** обладают только расплавной микроструктурой с преимущественно стекловатой матрицей алюмосиликатного состава (альбитовый) (Shumilova et al., 2018; 2019; 2020). По данным оптической поляризационной микроскопии существенная аморфность матрицы хорошо отмечается в скрещенных николях. В матрице неравномерно распределены вовлеченные в «поток» редкие обломки пород мишени. На больших увеличениях отмечается присутствие неравномерно распределенных микрокристаллов пироксена (авгит). Характерной особенностью импактитов данного типа является существенно низкое содержание кристаллической компоненты и присутствие в аморфной матрице алюмосиликатного состава силикатных обособлений (капель) со скоплениями монокристаллического коэсита в ядре капли (рис. 4.13). В некоторых случаях коэсит в силикатных каплях отсутствует. Особенностью данной микроструктуры является отсутствие продуктов распада алюмосиликатной матрицы, что говорит о «свежести» данных стёкол.

Среди изученных трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы проявление структур несмесимости (псевдоликвации) импактного расплава выявлено только для жильных ультравысокобарных тел с коэситом, выраженном в обособлении би-силикатной, алюмосиликатной и рудной компонент (рис. 4.12). В образцах массивных тагамитов и среди расплавных бомб явных признаков дифференциации импактного расплава не обнаружено.



**Рисунок 4.12.** Псевдоликвационная структура сульфидного и алюмосиликатного расплавов (Шумилова и др., 2018). Полированный шлиф. Изображение в упруго отражённых электронах. Условные обозначения:  $Gl_{Fsp}$  – алюмосиликатное стекло полевошпатового состава, Aug – авгит, Po – пирротин.

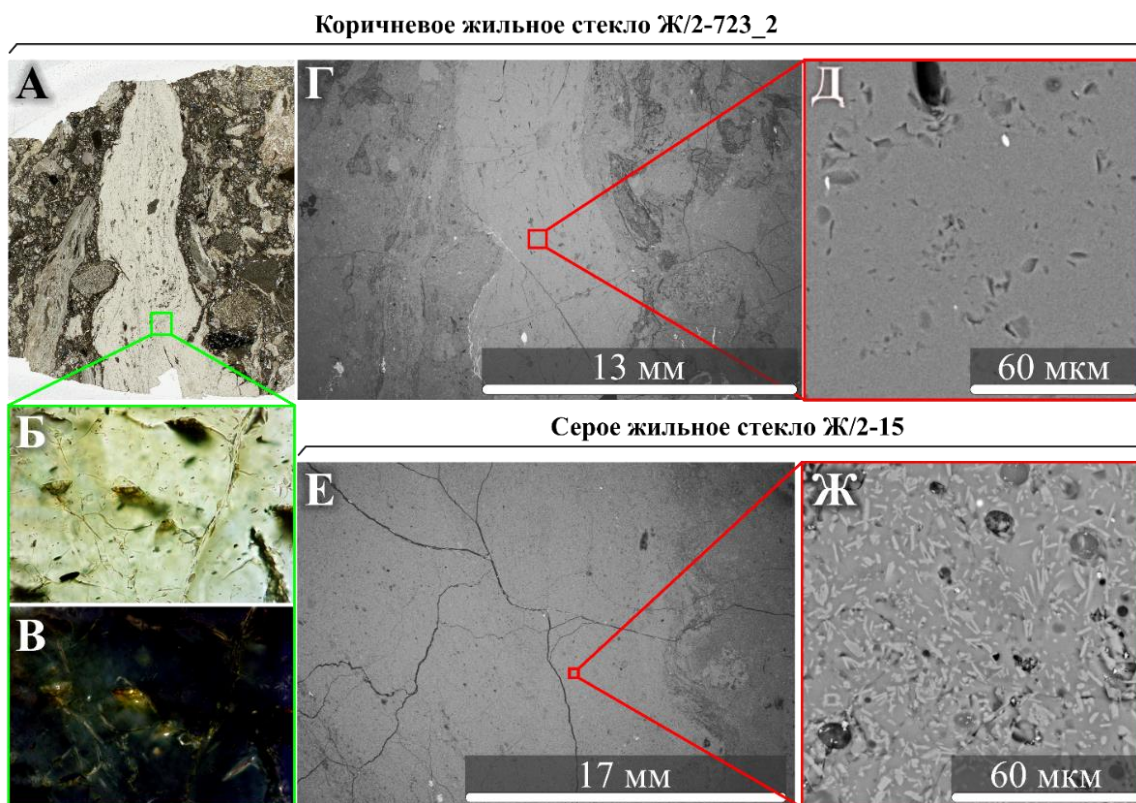


**Рисунок 4.13.** Капля  $SiO_2$  (на фото тёмно-серое) в окружающей её алюмосиликатной матрице с микрокристаллами пироксенов (слева, светлое) в образце жильного тела и скопление монокристаллов коэсита в силикатном расплавленном стекле (справа) (режим BSE).

*Жильные тела коричневого цвета* характеризуются относительной чистотой слагающей их аморфной матрицы. В ней практически отсутствуют микрокристаллы пироксенов, по сравнению с серыми жильными телами. На макроуровне стёкла практически прозрачные (рис. 4.14 А). Оптическая поляризационная микроскопия

также демонстрирует относительную изотропность и чистоту матрицы (рис. 4.14 Б, В), при этом всё же отмечаются редкие включения пород мишени, как это наблюдается в серых стёклах. Специфика коричневых жильных тел, выявленная в ходе применения сканирующей электронной микроскопии, указывает на присутствие включений в аморфной матрице реликтов пород мишени ближе к контактовой части с вмещающим зювитом (рис. 4.14 Г), обломки кварца и полевых шпатов. В коричневых стёклах кристаллы пироксенов представлены в матрице очень ограниченным количеством (иногда присутствуют вокруг обломков пород мишени).

В коричневом стекле также встречаются пирротины в виде округлых обособлений и обломков. Среди них присутствуют две разновидности, различающиеся по вещественному составу: первая - Fe – 46% (ат. %), S – 54% (ат. %); вторая – стехиометрический FeS - Fe – 50% (ат. %), S – 50% (ат. %). Последний благодаря комплексу методов был идентифицирован как троилит. Более подробные данные по идентификации троилита представлены в разделе 4.3.



**Рисунок 4.14.** Фото шлифа коричневого жильного тела в зювите (А), увеличенная область стекла в параллельных (Б) и скрещенных николях (В) при увеличении 50х. Общий фазовый контраст (Г, Е) и микроструктуры (Д, Ж) коричневого и серого жильных расплавных импактитов по данным СЭМ (режим BSE).



**Массивные расплавленные тела** на рр. Анарога и Кара по данным СЭМ обладают неоднородной микроструктурой с криптокристаллической основной массой полевошпатового состава и варьирующимся характером распределения смектитовой компоненты (рис. 4.15, образцы М/8-63, М/2-361). Оптическая микроскопия указывает на тесные пространственные взаимоотношения данной микроструктуры с аморфными участками различного объёма и морфологии, при этом основная масса оптически сильно затушёвана смектитовой компонентой (рис. 4.15, образцы М/8-63, М/2-361). Пористость существенно вариативна и находится в пределах до 200 мкм.

**Расплавленные бомбы** обладают несколькими микроструктурами. В некоторых случаях одному образцу соответствует одна микроструктура, в других они характеризуются несколькими микроструктурами. Микроструктуры расплавленных бомб подразделены на преимущественно стекловатые, богатые смектитом и группу микроструктур проблемного генезиса. Первые две разновидности выделены по преобладающей в них компоненте, группа проблемного генезиса возникла в связи с неоднозначной интерпретацией микроструктур. **Преимущественно стекловатой микроструктурой** обладает расплавная бомба Б/59-434 с основной массой, состоящей из стекла с включениями удлиненных микрокристаллов пироксена, а также агрегатов граната, местами образующего скопления различной формы – от неправильной до обломочной (рис. 4.16, образец Б/59-434). Последний оптически на больших увеличениях не выявляется, поскольку затушеван матрицей с пироксеновыми микрокристаллитами, которые при этом также трудно различимы в аморфной матрице (рис. 4.16, образец Б/59-434). Поровое пространство заполнено смектитовой компонентой.

**Расплавная бомба Б/59-448** обладает подобной предыдущему образцу микроструктурой, однако скорее относится к промежуточному варианту постимпактного преобразования стекловатой матрицы, поскольку на дифрактограмме данного образца отмечается присутствие аморфной компоненты (рис. 5.1). Оптически матрица образца похожа на тонкий криптокристаллический агрегат затушеванный смектитовой компонентой (рис. 4.16, образец Б/59-448). Основная масса обладает однородной по всему объёму образца расплавной матрицей со сложным пространственным взаимоотношением компонентов:

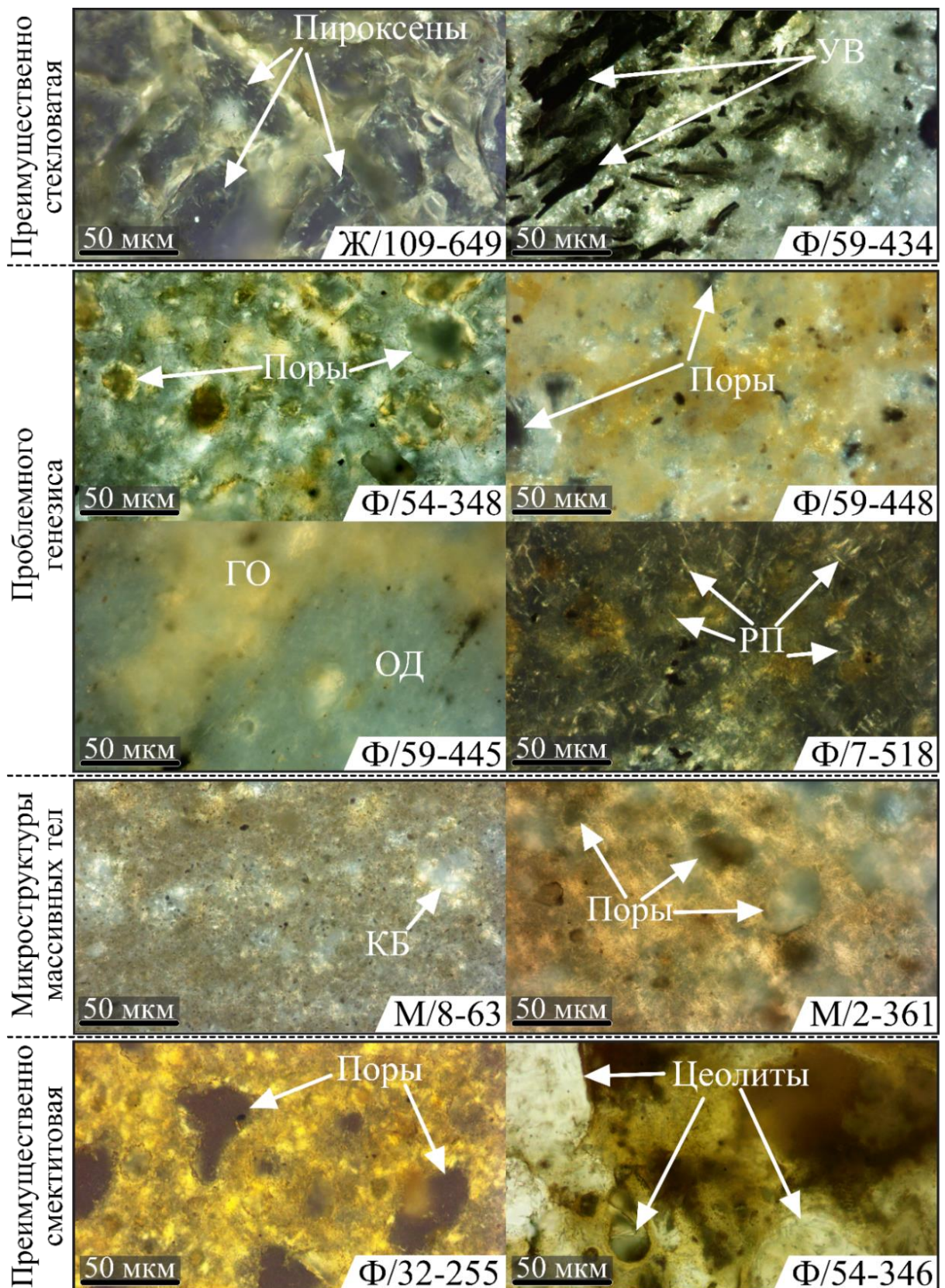
сохранившейся стекловатой (судя по данным рентгеновской дифрактометрии) и реликтово-стекловатой основной плотной массы алюмосиликатного состава, интенсивно прокрытой трещинами, смектитовой компоненты в виде ксеноморфных обособлений с резкими границами по отношению к плотной алюмосиликатной стекловатой массе, тонко рассеянных агрегатов граната, что также подтверждается данными спектроскопии КРС. Стекловатая масса покрыта сетью мелких трещин, что по всей видимости вызвано присутствием воды в структуре стекла. В подчинённом количестве (~20%) присутствует смектитовая компонента, которая имеет сложные неизометричные формы в стекле (рис. 4.16, образец Б/59-448). **Преимущественно смектитовую микроструктуру** имеют образцы расплавных бомб Б/32-255 и Б/54-346, которые в полном объёме представлены микроструктурой данного вида. Образцы существенно рыхлые и пористые, с основной массой, главным образом состоящей из глинистых минералов (рис. 4.16). В случае образца Б/32-255 присутствуют обособления минерала с кольцевой зональностью алюмосиликатного состава, приуроченного к периферии миндалин. Точный вещественный анализ данного минерала при помощи ЭДС невозможен в связи с их малыми размерами. Образцу Б/54-346 свойственно интенсивное развитие цеолитовой минерализации.

**Группа микроструктур проблемного генезиса**, помимо описанных выше явных микроструктур, является обособленной, поскольку их генезис довольно неоднозначен в связи присутствующими вытянутыми миндалинами со смектитом, природа которых не ясна. Лишь в случае образца расплавной бомбы Б/59-445 удалось зафиксировать участок матрицы, содержащий реликты пироксенов и миндалин аналогичной морфологии заполненных смектитом (рис. 5.28 Е), что может говорить о непосредственном разрушении пироксенов.

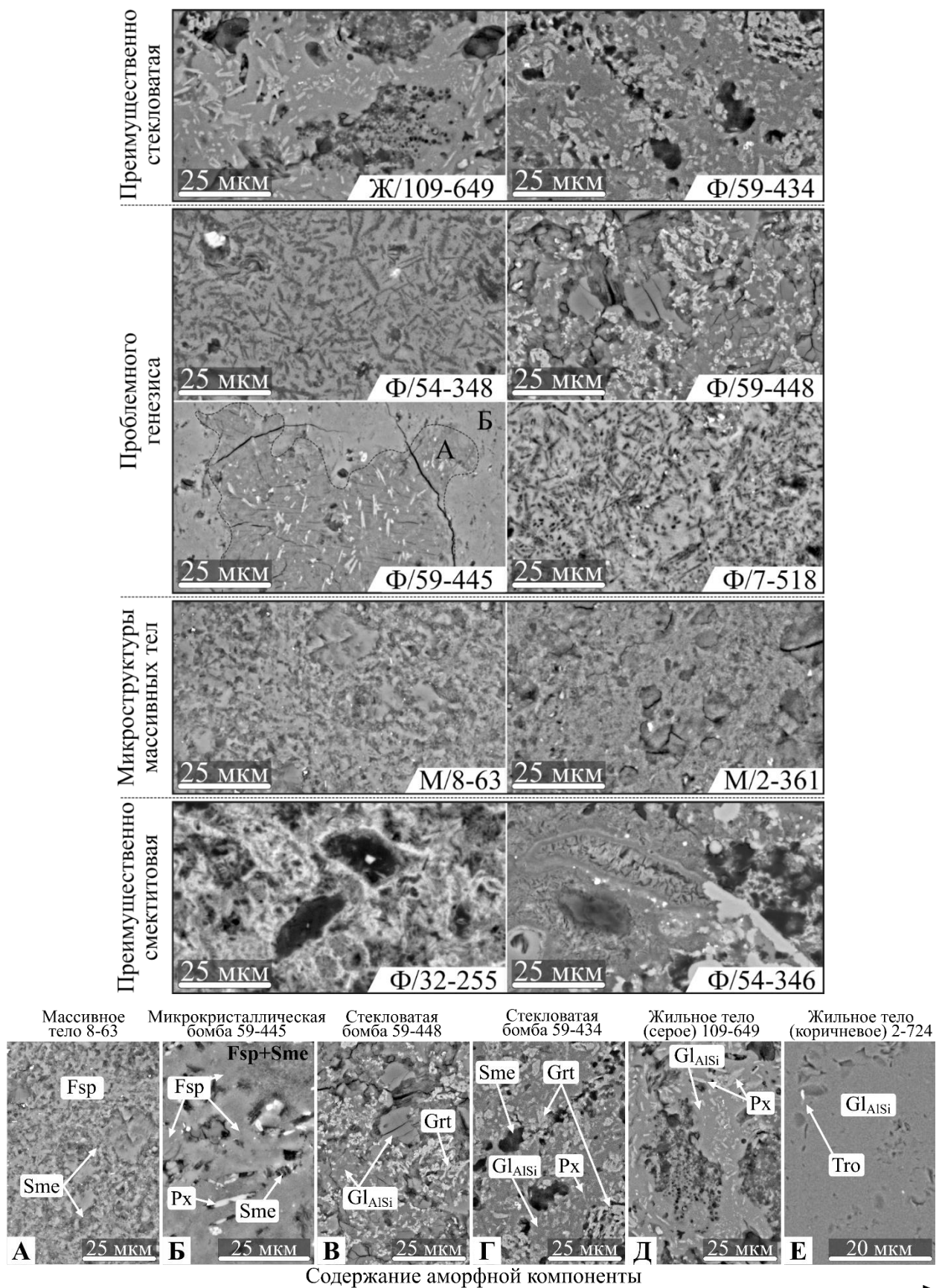
*Расплавная бомба Б/59-445* характеризуется матриксом алюмосиликатного состава двух разновидностей, различающихся по текстуре, структуре и характеру трещиноватости (рис. 4.16). Матрица первого вида образует небольшие по площади участки и содержит микрокристаллы пироксена (рис. 4.16, образец Б/59-445 А), в то время как в матрице другого вида они отсутствуют, однако присутствуют полости, морфологически напоминающие очертания пироксенов, заполненные глинистой компонентой, которые предположительно могут являться реликтами пироксенов

(рис. 4.16, образец Б/59-445 Б). Основная масса данного образца большей частью представлена матрицей второго вида.

*Расплавный бомба Б/7-518* по данным СЭМ имеет в основном плотную сливную микроструктуру (рис. 4.16), при этом данные дифрактометрии говорят о преимущественно кристаллической природе образца с возможным присутствием подчинённого количества аморфной компонентой. Практически по всей массе развиты удлинённые пустоты размером до первых микрометров в поперечнике, заполненными смектитовой компонентой.



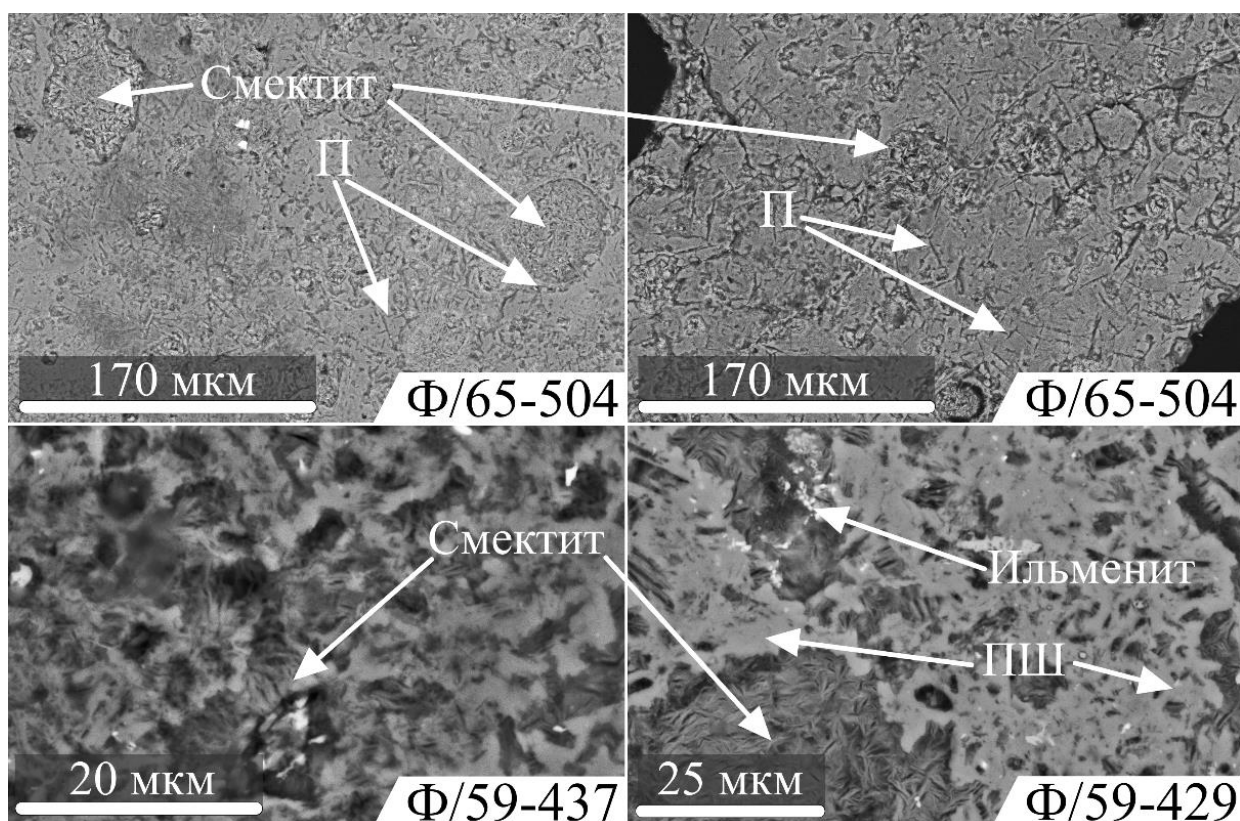
**Рисунок 4.15.** Микроструктуры основной массы трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы по данным оптической микроскопии в проходящем свете (с анализатором, увеличение 50х). Обозначения: М/8-63: *КВ* – кристобалит (по данным КРС), Б/59-434: *УВ* – углеродное вещество, Б/59-445: *ГО* – глинистая область, *ОД* – область девитрификации, Б/7-518: *РП* – реликты пироксенов.



**Рисунок 4.16.** Основные микроструктуры основной массы (матрицы) (сверху) и микроструктурный ряд по соотношению кристаллической аморфной компоненты (снизу) трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы (данные СЭМ, режим BSE).

*Расплавная бомба Б/65-504* также может относиться к девитрифицированной разновидности расплавленного импактита. На макроуровне данный образец выглядит как сливная порода пемзовидного облика с большим количеством пор в целом. По данным рентгенодифракционного анализа данный образец характеризуется присутствием небольшого количества аморфной компоненты. В образце обнаружены две разновидности микроструктуры (рис. 4.17): наиболее развитая в образце микроструктура замещения матрицы полевошпатового состава смектитовой компонентой и более редкая микроструктура с меньшим количеством глинистой компоненты и более чёткими очертаниями удлинённых пустот по сравнению с первой. Данные пустоты могут являться реликтовыми полостями в результате процесса замещения пироксенов.

*Расплавные бомбы Б/59-437 и Б/59-429* с проблемным генезисом микроструктуры обладают особым, по сравнению с другими микроструктурами, характером взаимоотношения плотной алюмосиликатной компоненты полевошпатового состава с глинистыми обособлениями, имеющими рваные очертания (рис. 4.17). Разница двух данных микроструктур заключается в плотности агрегации полевошпатовой компоненты. Вероятно, данные микроструктуры возникли в результате частичного плавления пород мишени со спеканием зёрен. В данном случае природа смектита также недостаточно ясна.



**Рисунок 4.17.** Микроструктуры расплавных бомб Б/65-504, Б/59-437 и Б/59-429 по данным СЭМ (режим BSE): Б/65-504 (слева) – участок алюмосиликатной матрицы с более развитой смектитовой компонентой, Б/65-504 (справа) – участок с более сохранившейся матрицей. Обозначения: П – удлинённые пустоты, заполненные смектитовой компонентой, ПШ – полевым шпат.

Проведённое исследование демонстрирует наличие существенного разнообразия микроструктур среди трёх основных типов тел расплавных импактитов Карской астроблемы. Данное разнообразие позволяет проследить микроструктурный ряд по соотношению кристаллической и аморфной компонент (рис. 4.16). Среди них массивные и жильные имеют индивидуальные слабо вариативные микроструктуры. Выявленное разнообразие микроструктур опирается на три механизма: 1) солидификация с закалкой импактного расплава при участии воды с образовыванием микроструктуры с аморфной матрицей, 2) в случае постепенного остывания значительных толщ расплава образовывалась криптокристаллическая матрица полевошпатового состава, 3) активное постимпактное преобразование импактитов Карской астроблемы при участии гидротермальных растворов (Наумов, 1996; Naumov, 2002).

**Таблица 4.6.** Общая характеристика трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы.

		<b>Жильные тела</b>	<b>Массивные тела</b>	<b>Расплавные бомбы</b>
<b>Общая характеристика</b>	<b>Соотношение кристаллической и аморфной компонент (погрешность ~10%)</b>	10 – 20%	80 – 100 %	10 – 100%
	<b>Микроструктуры</b>	Преимущественно стекловатая	Криптокристаллическая (ПШ (анортоклаз) + смектит)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Преимущественно стекловатая</li> <li>• Преимущественно смектитовая</li> <li>• Преимущественно криптокристаллическая (полевошпатовая)</li> </ul>
	<b>Условия образования (солидации)</b>	Солидификация в ультравысокобарных условиях и при высокой температуре	Солидификация при давлении близком к атмосферному	
	<b>Форма геологических тел</b>	Штокверкообразные образования	Плащеобразные массивные тела	Линзы \ Изометричные тела неправильной формы в зювитах



## Глава 5. Минералогия тел расплавных импактитов Карской астроблемы

Результаты этой главы основаны на опубликованных ранее работах автора (Зубов и др., 2023; Зубов, Шумилова, 2023).

Минерально-фазовый состав трёх типов расплавных импактитов оценивался комплексно – при помощи методов энергодисперсионной спектроскопии, рентгенофазового анализа, инфракрасной спектроскопии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния света. Используемые методы могут взаимодополнять друг друга и обеспечивать более надёжную фазовую диагностику.

### 5.1. Общая характеристика

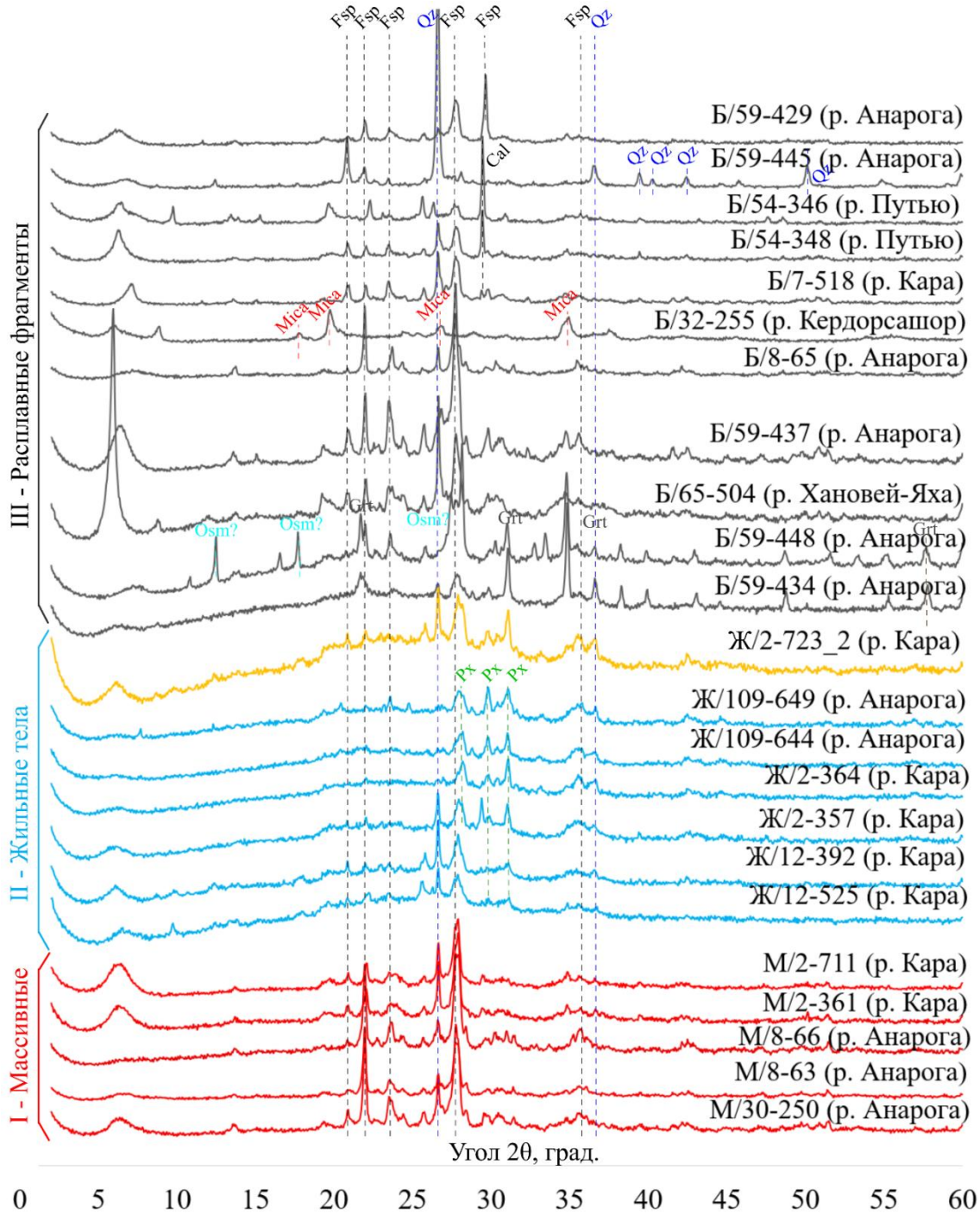
По данным **рентгеновской дифрактометрии** порошковых проб трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы установлено, что массивные расплавные импактиты и жильные тела с коэситом образуют индивидуальные группы, в каждой из которых вариативность фаз на дифрактограммах минимальна (рис. 5.1).

*У массивных тел* отмечаются рефлексы альбита и анортита, в некоторых случаях отмечается слабый аморфный пик, что вызвано неоднородностью массивных образований в фазовом аспекте.

*Дифрактограммы жильных тел* характеризуются заметным гало, указывающим на наличие значительной доли аморфной составляющей, варьирующей от образца к образцу в разных пределах, а также имеют достоверно идентифицируемые рефлексы слюд, глинистой компоненты, кварца, альбита, кальцита, а также в некоторых случаях пироксенов (энстатит и диопсид). Дифрактограмма образца жильного стекла коричневого цвета демонстрирует присутствие полевого шпата, кварца, троилита (последний рассмотрен в разделе 5.3), а также пироксена, который по данным СЭМ присутствует в коричневых стёклах в очень малом количестве по сравнению с жильными стёклами серого цвета.

*Серия дифрактограмм расплавных бомб* существенно более разнообразна. В этой серии выделяются существенно стекловатые разновидности по наличию аморфного гало (рис. 5.1: образцы Б/59-448, Б/59-434) и преимущественно представленные смектитом (рис. 5.1: образцы Б/54-346, Б/32-255, Б/65-504). Дифрактограммы остальных бомб указывают на присутствие в образцах анортита,

ортоклаза, альбита, кварца, кальцита, иногда граната. В образце расплавной бомбы Б/59-448 (р. Анарога) дифрактометрически определён минерал осумилит с межплоскостными расстояниями: 7.12, 5.02, 4.10, 3.77, 3.22, 2.89, 2.74, 2.53, 2.42, 2.39, 2.04 Å. Практически все дифрактограммы указывают на присутствие смектитовой компоненты, которая может иметь как наложенный (вторичный) характер, так и первичную природу (синимпактное образование).



**Рисунок 5.1.** Дифрактограммы порошковых проб для трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы. Условные обозначения: Fsp – полевошпат, Qz – кварц, Cal – кальцит, Grt – гранат, Px – пироксен, Osm – осумилит, Mica – слюда.

Отдельно для серии образцов расплавных импактитов принципиально различного генезиса были выполнены дробление, деликатная растирка, перенос в дистиллированную воду и осаждение из суспензии потенциальных смектитов/глин на покровные стёкла для последующего проведения рентгенодифракционного анализа подготовленных препаратов массивного тагамита (обр. М/2-361), существенно обогащённой смектитом бомбы (обр. Б/32-255) и стекловатой бомбы (обр. Б/59-434). Полученные данные свидетельствуют о присутствии в исследованных образцах смектита, а также в некоторых случаях смешанослойного иллита/смектита (табл. 5.1). Зафиксированное присутствие калиевого полевого шпата и кварца, а также невозможность определения разновидности смектита могут быть вызваны особенностью подборки параметров использованной методики.

**Таблица 5.1.** Результаты рентгеновской дифрактометрии концентратов глин/смектита из расплавных импактитов.

№ п/п	№ образца	Фазовый состав выделенной суспензии глин/смектитов	Фазовое состояние по исходной порошковой пробе породы
1	<b>М/2-361</b> (массивный расплавный импактит)	<b>смектит, хлорит*</b> , смешанослойный иллит/смектит, Q, Fsp, рентгеноаморфная фаза	Кристаллический
2	<b>Б/32-255</b> (бомба, практически полностью состоящий из минералов глин/смектита)	<b>смектит, иллит, смешанослойный иллит/смектит (?)</b> , Q, Fsp, рентгеноаморфная фаза	Кристаллический
3	<b>Б/54-348</b> (бомба, плотная матрица со с рассеянной формой смектита и удлинёнными пустотами, заполненными смектитом)	<b>смектит, К-Fsp (San/Orth)</b> , кальцит, Q	Кристаллический
4	<b>Б/59-434</b> (бомба, с аморфной матрицей и большим количеством агрегатов родолита)	<b>смешанослойный иллит/смектит, гранат (пироп-гроссуляр)</b>	Преимущественно аморфный

5	Б/59-437 (бомба)	сметит, Fsp (Ab), Q	Кристаллический
6	Б/59-445 (бомба)	Q, Fsp, смешанослойный иллит/сметит**, каолинит(?)	Кристаллический

**Условные обозначения:** *K-Fsp (San/Orth/Ab)* – калиевый полевой шпат (санидин/ортоклаз/альбит), *Q* – кварц, *И/С* – смешанослойный иллит/сметит, \* – минерал изменен или содержит смешанослойные фазы, \*\* – слабоупорядоченная смешанослойная фаза.

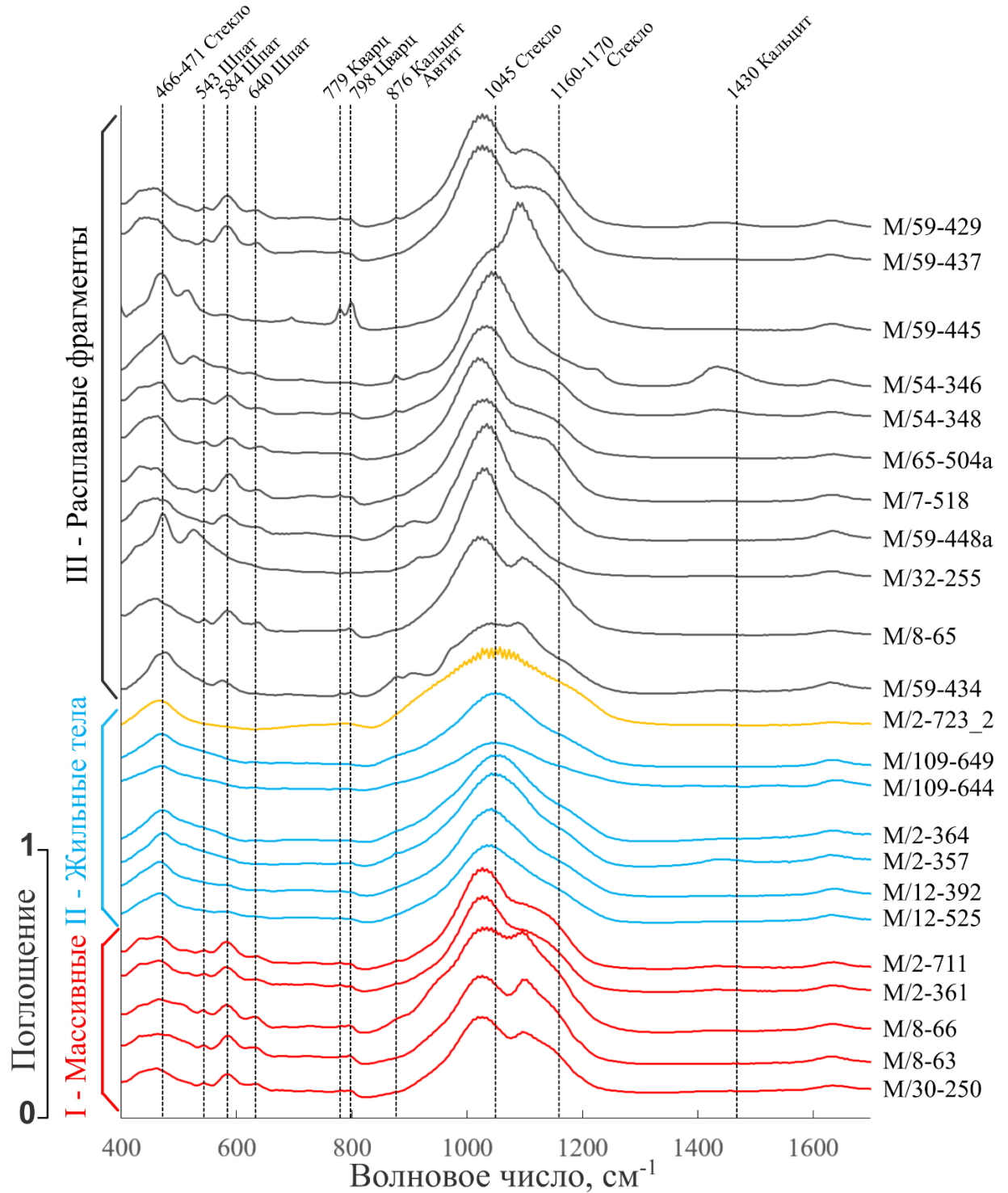
**Данные инфракрасной спектроскопии** указывают на преобладание в массивных импактатах полевого шпата, а также подчинённого содержания кварца и карбоната (рис. 5.2).

Жильные тела характеризуются свойственным им алюмосиликатным стеклом с SiO<sub>2</sub> компонентой и в меньшей степени карбонатом.

Бомбы более разнообразны, так, например, существенно стекловатые разности также представлены в основном аморфной алюмосиликатной компонентой с подчинённым содержанием карбонатов. Существенно сметитовые разности сложены монтмориллонитом и карбонатом. В целом валовая характеристика данным методом в образцах с преимущественно криптокристаллической алюмосиликатной безсметитовой матрицей указывает на присутствие главным образом полевого шпата, а также в некоторых случаях кварца и карбоната. Реликтовый гранат, обнаруженный в некоторых образцах при помощи СЭМ и спектроскопии КРС, данным методом не зафиксирован.

**Данные термического анализа** трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы демонстрируют довольно однотипный характер эндо/экзотермических эффектов. Практические для всех образцов расплавных импактитов, кроме жильного коричневого стекла, характерно присутствие эндотермического эффекта в пределах 90-100 °С, отвечающего адсорбированной воде. Помимо этого, в некоторых случаях присутствует эндотермический эффект при 740-820 °С, что характерно для карбоната. Также иногда отмечается экзоэффект при 550-580 °С, соответствующий горению углеродистого вещества. Для некоторых преимущественно глинистых образцов присутствует эндоэффект 150-160 °С, соответствующий выделению

адсорбционной воды монтмориллонита (Термический анализ..., 1974). Примеры термограмм основных разновидностей расплавных импактитов приведены в приложении А (рис. 1-7).



**Рисунок 5.2.** Инфракрасные спектры поглощения порошковых проб для образцов трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы. Обозначения: красные линии – массивные тагамиты, синие линии – жильные тела с коэситом, серые линии – бомбы.

## 5.2. Выявление и реконструкция рентгеноконтрастных фаз

Рентгеновская вычислительная микротомография – это неразрушающий метод исследования внутренней структуры, предложенный Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком (Hounsfield, 1973). За последние десятилетия этот метод был апробирован во многих областях науки, в том числе в геологии (Wellington, Vinegar, 1987; Штырляева и др., 2016). Этот метод активно использовался при изучении планетарного вещества, метеоритов и продуктов испытаний космических тел (Rubin et al., 2001; Tsuchiyama et al., 2002; Uesugi et al., 2010, 2013; Russell and Howard, 2013; Hanna, Ketcham, 2017; и др.). В то же время особенности применения рентгеновской компьютерной томографии к импактитам, в том числе к расплавленным разновидностям, не ясны и относительно слабо освещены в литературе. Одним из ярких примеров является исследование К. Коберла (Koeberl et al. 2002), описавшего внутреннее строение импактитов из кратеров Босумтви (Гана) и Рис (Германия), а также тектитов Муонг Нонг (Таиланд).

На основе данных сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской вычислительной микротомографии была проведена экспериментальная работа по выявлению рентгеноконтрастных фаз для образцов массивного расплавленного импактита и расплавленной бомбы (Зубов, 2018а; Зубов, 2018б; Zubov et al., 2021). Большое значение имеет оценка объемного распределения структурных компонентов в разновидностях расплавленных импактитов Карской астроблемы. Рентгеновская вычислительная микротомография является одним из потенциально перспективных методов для изучения этой проблемы применительно к расплавленным импактитам Карской астроблемы, а также для решения аналогичных вопросов на других астроблемах. Помимо этого, также важна оценка фазового контраста расплавленных импактитов.

Было выбрано относительно низкое разрешение томограмм (микрометровое) для анализа достаточно больших образцов, которые технически невозможно исследовать с помощью нанотомографии. Использование нанометрового разрешения для томограмм этих образцов значительно уменьшило бы выбранный участок образца для изучения. Учитывая очень сложную структурно-текстурную и вещественную специализацию импактитов, это могло привести к снижению представительности единичной пробы, а также большого количества проб, что было

технически сложно и очень трудоемко и не давало достоверной представительности изучаемых объектов.

Проведение данной экспериментальной работы опиралось на следующую последовательность действий:

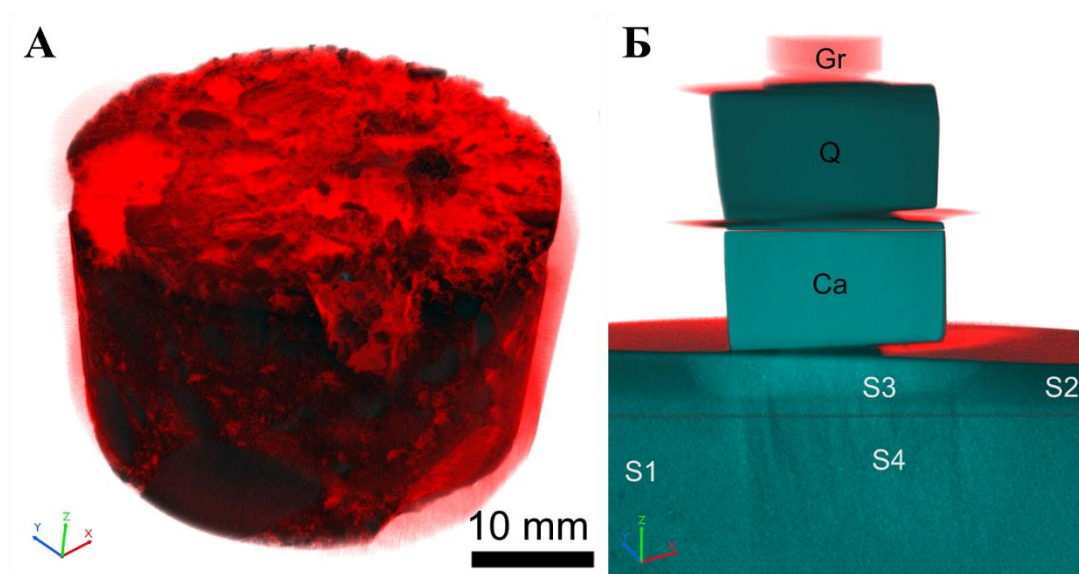
1 – на основании опорного участка (в данном случае - центрального участка томограммы) выполнено профилирование значений данных РВТ наиболее характерных и контрастных объектов томограммы;

2 – классификация объектов на томограмме путем построения мультимодальной гистограммы по данным профилирования, полученным на предыдущем этапе;

3 – реконструкция порового пространство методом глобальной пороговой бинаризации (сегментации) с диапазоном значений данных РВТ от 0 до  $X$  для каждого участка томограммы, где  $X$  - максимальное значение данных РВТ для порового пространства, определенное по результатам профилирования (для исследованных импактитов меняется незначительно, однако пренебречь недопустимо). Морфология сульфидной компоненты реконструирована путем глобальной пороговой бинаризации с диапазоном значений данных РВТ, определенным по результатам профилирования. Все операции бинаризации и реконструкции выполнялись для 8-битных значений данных РВТ.

Во время визуализации и последующей компьютерной обработки теневых проекций возникает ряд эффектов, как физических, так и вычислительных, что приводит к различным артефактам на томограммах (Hanna et al., 2017; De Man et al., 1999; Hsieh, 2009; Ketcham, 2006; Krumm, 2008). Значительная часть этих эффектов компенсируется вычислительными алгоритмами и методами визуализации, включая фильтры и условия визуализации. К сожалению, полного исключения данных эффектов добиться не удалось. Таким образом, на исследованных томограммах наблюдались два типа артефактов, в значительной степени влияющих на результаты последующей обработки. На рисунке 4.2.1 показаны артефакты, выраженные явным увеличением значения данных РВТ на границе раздела контрастных сред. Артефакт обусловлен полихроматичностью используемого рентгеновского излучения. Эффект можно уменьшить, выбрав меньший анализируемый объем внутри образца.

Так как эталоны устанавливались поверх образцов, на томограммах образцов (рис. 5.3) проявлялись артефакты нескольких типов: S2 – из-за существенно различающихся коэффициентов затухания сред (твердое алюмосиликатное тело и воздух); S3 был эффектом, подобным предыдущему; S4 – цилиндрический шлейф кажущегося уменьшения коэффициента затухания, распространяющийся от эталона с высоким коэффициентом затухания (в данном случае кальцита) к центру образца, обусловленный особенностями алгоритма реконструкции.

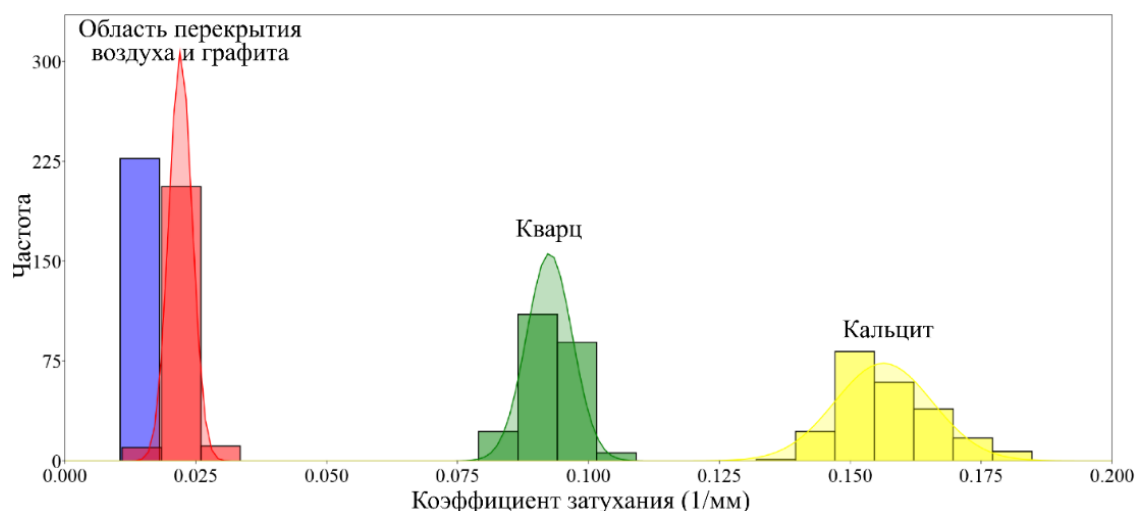


**Рисунок 5.3.** Увеличение коэффициентов затухания рентгеновского излучения в периферийной части образца импактита Карской астроблемы (зювита) (А), а также система артефактов (Б), образовавшаяся в результате особенностей визуализации (S2) и установки эталонов на образце (S3, S4) (S1 – область минимального влияния артефактов), осевого сечения образца. Условные обозначения: Gr – графит, Q – кварц, Ca – кальцит. Диаметр образца – 4 см (Zubov et al., 2021).

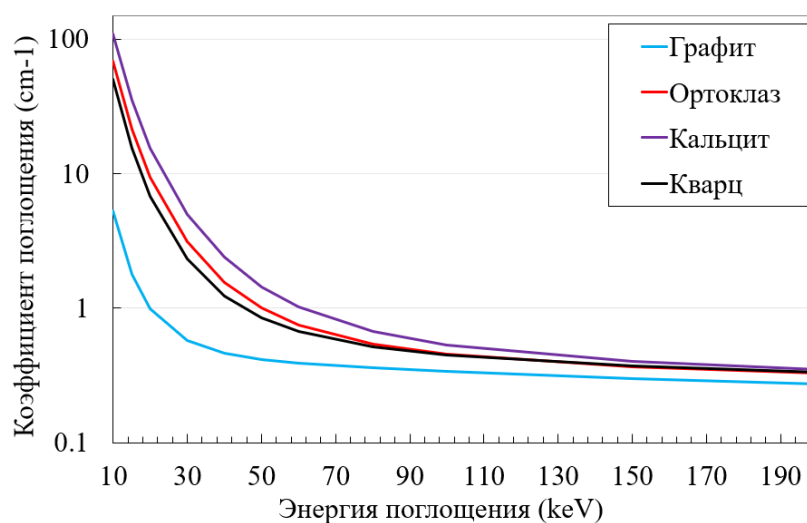
Вместе с образцами импактитов были просканированы три однородных минеральных образца (графит, кварц и кальцит). Эти образцы использовались в качестве эталонных материалов (стандартов) для калибровки значений данных ВКТ изображений. На мультимодальной гистограмме, демонстрирующей распределение коэффициентов поглощения (рис. 5.4), эти минеральные эталоны четко разделяются на три класса по интервалам значений данных ВКТ следующим образом: графит – от 0,017 до 0,028, кварц – от 0,082 до 0,102 и кальцит – от 0,136 до 0,184 л/мм. При этом согласно графику зависимости коэффициентов ослабления от энергии



рентгеновского излучения для графита, полевого шпата, кальцита и кварца наблюдается небольшое расхождение коэффициентов ослабления излучения, а также перекрытие данных коэффициентов для ортоклаза и кварца (рис. 5.5). Поскольку эти диапазоны не перекрываются, эти минералы легко различимы на томограмме. Это означает, что если образец представлен только этими минералами, то они должны быть различимы на томограммах при заданных условиях получения данных компьютерной томографии. К сожалению, в случае Карских импактитов последнее не выдерживается.



**Рисунок 5.4.** Гистограмма частотных распределений измеренных коэффициентов затухания для используемых эталонов минералов. Условные обозначения: воздух (фиолетовый), графит (красный), кварц (зеленый), кальцит (жёлтый) (Zubov et al., 2021).

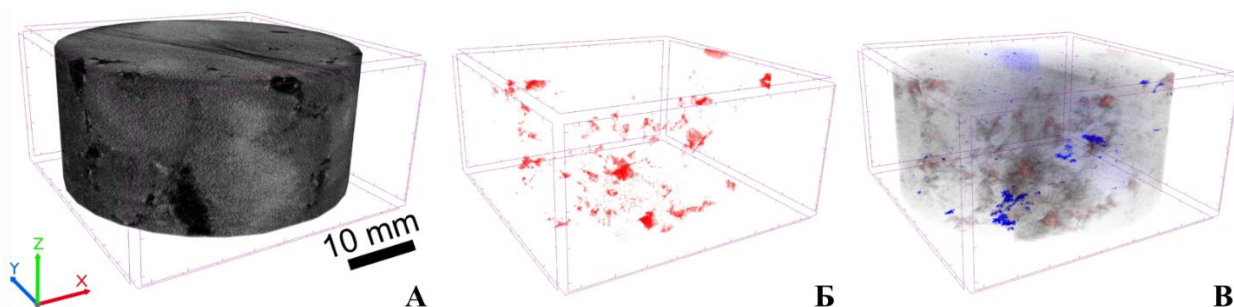


**Рисунок 5.5.** Графики зависимости коэффициентов ослабления от энергии рентгеновского излучения, полученные при помощи MuCalcTool (Hanna, Ketcham, 2017; Zubov et al., 2021).

Природные объекты гораздо сложнее по своему структурному и химическому строению, чем эталоны. На данном этапе стало ясно, что задача определения пространственного распределения углеродистого вещества в импактитах не может быть решена в данных условиях съемки, так как распределение значений данных ВКТ графита существенно перекрывается с распределением данных ВКТ порового пространства (рис. 5.4). Поэтому отдельные углеродные частицы в этом случае неразличимы из-за значительной пористости исследованных импактитов.

Определение распределения компонентов на рентгеновских томограммах зависит от коэффициентов затухания материалов (рис. 5.5). По данным анализа силикатных пород и энергодисперсионного спектрального анализа и расплавные импактиты Карской астроблемы в основном представлены алюмосиликатной составляющей с примесью силикатной, карбонатной и сульфидной составляющих (Shumilova et al., 2018).

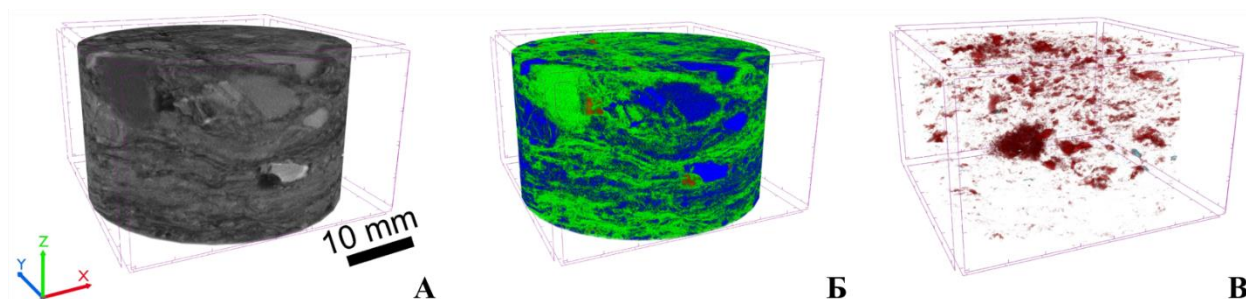
Безобломочный массивный расплавный импактит (обр. М/72) имеет однородный химический состав с некоторой локальной дифференциацией импактного расплава. Рентгеновская томограмма образца расплавленной породы подчеркивает характер ее расплавный генезис (рис. 5.6). Небольшие области повышенного значения данных КТ, вероятно, связаны с зонами частичного оплавления обломков пород мишени. Поровое пространство в расплавной породе характеризуется неравномерным распределением, с образованием пустотных «скоплений» размером до 5 мм.



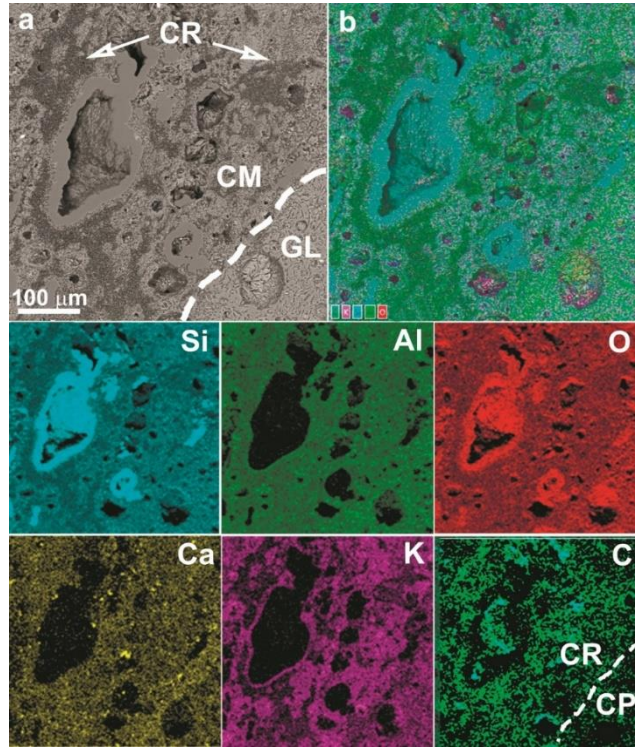
**Рисунок 5.6.** Рентгеновская томограмма расплавного импактита бедного литокластами пород (М/72): А – исходная томограмма расплавов бедных кластами пород; Б – поровое пространство расплавной породы Кр-72; В – пространственные соотношения матрицы расплава (серый), порового пространства (красный) и карбонатной компоненты (синий) (Zubov et al., 2021).

Помимо литокластов в зювите относительно часто встречаются бомбы солидифицированного расплава (образец Б/7-41). На рентгеновской томограмме (рис. 5.7) текстура течения подчеркивается распределением двух контрастных фаз (рис. 5.7 Б). При визуальном сравнении полученная карта рентгеновского затухания соответствует карте естественного цвета в образце. Исследование этих контрастных компонентов методом спектроскопия КРС показывает, что обе фазы имеют анатаз-ортоклазовый состав. В спектрах КРС четко различаются две линии:  $143\text{ см}^{-1}$  (анатаз) и  $515\text{ см}^{-1}$  (ортоклаз). В основной криптокристаллической ортоклазовой массе солидифицированного ударного расплава оптически различимые частицы углеродного вещества распределены равномерно. По спектру комбинационного рассеяния он подобен стекловидному углероду с полосой D на  $1330\text{ см}^{-1}$  с полной шириной на половине высоты (FWHM)= $95\text{ см}^{-1}$ , полосой G на  $1601\text{ см}^{-1}$  с FWHM= $60\text{ см}^{-1}$  и полосами второго порядка при  $2643$ ,  $2912$  и  $3184\text{ см}^{-1}$ . Размеры углеродных частиц составляют  $2\text{--}7\text{ мкм}$ , т.е. в несколько раз меньше используемого разрешения рентгеновской томографии ( $24\text{ мкм}$ ).

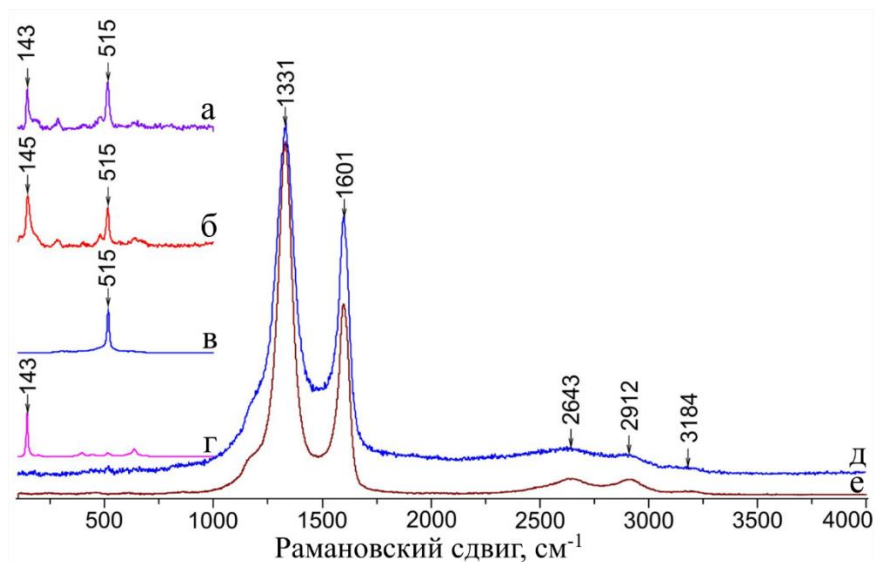
На рис. 5.8 представлены данные элементного картирования, свидетельствующие о равномерном распределении элементов и наличии множества пор, заполненных тонкими корками  $\text{SiO}_2$  и смектита. На этом изображении видно большое количество пор разного размера, в том числе мелкие поры, причем различимые поры при таком увеличении имеют размеры в несколько микрометров. Кроме того, на изображении видны области с разным содержанием углеродного вещества (поля CR и CP).



**Рисунок 5.7.** Рентгеновская томограмма расплавной бомбы (линзы) из зювита (Б/41): А – томограмма с флюидной текстурой в обломках ударного расплава; Б – реконструкция двух контрастных фаз (синяя – плотный анатаз-ортоклаз, зеленая – менее плотный анатаз-ортоклаз с частицами углерода); В – реконструкция порового пространства (Zubov et al., 2021).



**Рисунок 5.8.** СЭМ-изображение и микрозондовое элементное картирование расплавной бомбы Б/41: а – СЭМ-изображение; б – соответствующая многоэлементная карта и карты отдельных элементов. Условные обозначения: CM – криптокристаллический агрегат, GL – импактное стекло, CR – поле богатое углеродом, CP – поле бедное углеродом (Zubov et al., 2021).



**Рисунок 5.9.** Спектры комбинационного рассеяния света: а-в – анатаз-ортоклазовый агрегат (а – компонент 1, плотный; б – компонент 2, менее плотный; в – эталонный спектр ортоклаза); г – эталонный спектр анатаза; д – спектр углеродной частицы компонента 2; е – стандартный спектр стеклообразного углерода.

**Углеродное вещество.** Ввиду достаточно низкого коэффициента затухания рентгеновского излучения для углеродных веществ, близкого к порам (т.е. к воздуху), малым размерам частиц (приблизительно 50 мкм или менее) и относительно высокому контрасту вмещающей матрицы с относительно высокой плотностью, визуализация углеродсодержащего вещества в импактите с помощью рентгеновского излучения сложно реализуема.

В то же время данные рентгеновской томографии, сопровождаемые дополнительной информацией, позволили провести частичный анализ распределения частиц углерода в исследуемой расплавной бомбе с высоким содержанием алмазов (образец Б/41). Согласно оптическим наблюдениям и данным спектроскопии КРС, алюмосиликатная матрица в оптически серых областях образца содержит равномерно рассеянные частицы углерода (рис. 5.9), которые спектроскопически полностью соответствуют стеклоподобному углероду (Ferrari, Robertson, 2004; Исаенко и др., 2018) и химически экстрагированные частицы продуктов ударной трансформации (Shumilova et al., 2018c). В то же время оптически серые области (с углеродом) демонстрируют значительно сниженные значения данных ВКТ по сравнению со светлыми зонами анатаз-ортоклазового состава (рис. 5.7). В связи с этим, равномерно распределенные частицы углеродсодержащего вещества (стеклоподобного углерода) размером 2-7 мкм, учитывая первые проценты содержания, разрешение рентгеновской томографии 24 мкм, занижают результирующее значение коэффициента затухания рентгеновского излучения.

Таким образом, рентгеновская томография в сочетании со спектроскопией комбинационного рассеяния света и оптическими наблюдениями позволяет выяснить характер распределения стеклоподобного углерода, продукта ударной трансформации рассеянного углеродистого вещества в кристаллизованном ударном расплаве. Мелкие углеродистые частицы довольно регулярно рассеяны в серых зонах фрагмента расплава и расположены в соответствии с текстурой потока.

**Поровое пространство.** Как правило, реконструированное поровое пространство изученных импактитов отличается по количеству, размеру и степени пористости. Из-за перекрытия полей значений данных ВКТ углеродных частиц и пустотного пространства разделение этих фаз на томограммах невозможно. В связи

с этим мы, скорее всего, наблюдаем пространственное наложение изображений двух фаз; т.е. мы наблюдаем восстановленное суммированное изображение.

Всё это привело к проблемам на этапе фазовой сегментации томограмм, вызванных следующими факторами – однородностью химического состава исследуемых образцов, низким пространственным разрешением томограмм относительно исследуемых объектов и наличием артефактов на томограммах.

Полученные данные свидетельствуют о том, что метод рентгеновской вычислительной микротомографии имеет определенные технические проблемы при изучении Карских импактитов, связанные со слабоконтрастным рентгеновским поглощением близких по химическому составу минеральных компонентов импактитов и пределом разрешения микротомографии для малодифференцированных скрытокристаллических систем, образующихся в результате быстрой кристаллизации из ударного расплава.

Учитывая специфику пород мишени Карской астроблемы, представленную сложным чередованием осадочных пород с разной литологией, но близким химическим составом и значительной долей чёрных сланцев и известняков, эффективность рентгеновской микротомографии представляется сложной и требует применения большего разрешения без уменьшения объёма анализа.

Обнаруженный эффект «занижения» или «завышения» коэффициентов естественного затухания материалов из-за высокого содержания мелкодисперсных сильноконтрастных микроразмерных фаз свидетельствует о возможном принципиальном использовании косвенной информации для получения 3D-информации о характере их распределения во вмещающей породе, а также может быть использован для КТ-исследований различных материалов с контрастными включениями и структурными дефектами.

В целом проведённое исследование, выявленные артефакты съёмки и интерпретации данных рентгеновской компьютерной томографии могут быть использованы для дальнейшего изучения импактитов Карской астроблемы, а также для анализа импактитов Карской астроблемы, а также для любых других полиминеральных систем и материалов.

### 5.3. Специфика кристаллической компоненты

Парастерезис трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы представлен реликтовыми, синимпактными и постимпактными минералами, находящимися в тесной пространственной ассоциации. Особенности минералов и стёкол, позволяющих отнести их к синимпактному парастерезису, включают – грануляцию, микроскопические размеры (в пределах первых микрометров), наличие текстур течения, участки/зоны плавления реликтовых минералов, пространственные взаимоотношения минералов, термодинамические условия образования. Главными признаками реликтовых минералов являются угловатые очертания, довольно крупные размеры минералов и их агрегатов (от первых микрометров). Постимпактные минералы характеризуются наложенным характером своего пространственного расположения, в частности – по трещинам и открытым порам, представлены типичными гидротермальными и вторичными минералами. Они часто замещают пироксены, алюмосиликатные стёкла, полевошпатовую матрицу. Синимпактный генезис смектита в каплях лешательерита жильных тел подтверждается нахождением в закрытых миндалинах, тесной ассоциацией с коэситом, а также имеющимися данными экспериментального синтеза смектита из обводнённого расплава при высоком давлении.

*Реликтовые минералы* представлены обломками деформированных цирконов, обломками кварца, граната, монацита, титанита, хромита, пирротина и полевых шпатов. *Синимпактные минералы* – полевой шпат (микрористаллический), пироксен (авгит), коэсит, шпинель, ильменит, пирротин, титанит, монацит, анатаз, смектит. *Постимпактные минералы* – пирит, кальцит, цеолиты, смектит, халцедон, гематит, барит, пироклор, гётит. Обособленно среди синимпактных минералов стоит отметить углеродные фазы (апоугольный алмаз, параморфозы алмаза по органическим остаткам, стеклоподобный углерод), которые образовались в ходе твердофазной трансформации и не являются продуктами кристаллизации импактного расплава, поэтому здесь детально не описываются (табл. 5.2).

Ниже описываются наиболее важные и ранее менее изученные минералы и установленные специфичные типоморфные особенности в алфавитном порядке.

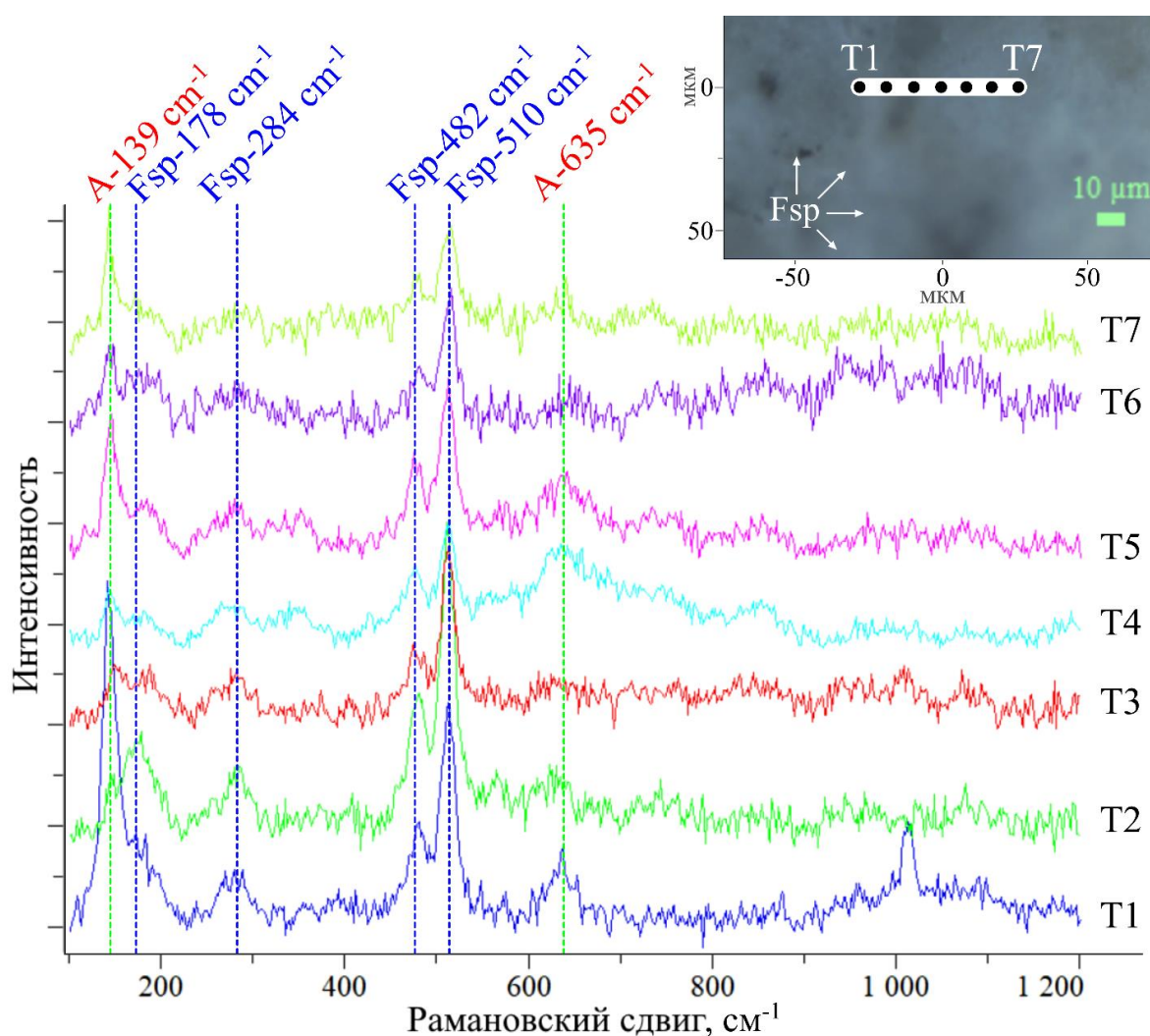
Таблица 5.2. Минеральные ассоциации расплавленных импактитов Карской астроблемы.

		Жильные тела	Массивные тела	Расплавные бомбы	
Минеральные ассоциации	Реликтовые минералы (из пород мишени)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Циркон (деформ.) (2550°C)*</li> <li>• Хромит (2180 °C)</li> <li>• Родолит (~2000°C)</li> <li>• Кварц (1710 - 1728°C)</li> <li>• Полевой шпат (~1200°C)</li> <li>• Пирротин (~1200°C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Кварц (~1710°C)</li> <li>• Полевой шпат (~1200°C)</li> <li>• Магнетит (~1591°C)</li> <li>• Циркон (обломочный, деформированный) (~2550°C)</li> <li>• Сфалерит</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Родолит (~2000°C)</li> <li>• Титанит (~1127-1386°C)</li> <li>• Монацит (~1900-2100°C)</li> <li>• Анатаз (?) (~1870°C)</li> </ul>	
	Синимпактные	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Циркон (гранул.) (2550°C)</li> <li>• Козсит (2400-2700 °C)</li> <li>• Шпинель</li> <li>• Лешательерит (~1700°C)</li> <li>• Ильменит (~1300°C)</li> <li>• Сметит**</li> <li>• Пироксен (~1200°C)</li> <li>• Стекло алюмосиликатное (~1200°C)</li> <li>• Пирротин (~1200°C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Лешательерит (~1700°C)</li> <li>• Ильменит (~1300°C)</li> <li>• Стекло алюмосиликатное (~1200°C)</li> <li>• Полевой шпат (~1200°C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Лешательерит (~1700°C)</li> <li>• Пироксен (~1550°C)</li> <li>• Стекло алюмосиликатное (~1200°C)</li> <li>• Полевой шпат (КРС) (~1200°C)</li> </ul>	
	Минералы и фазы образованные при твердофазной трансформации	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Алмаз</li> <li>• Стеклоподобный углерод</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Алмаз</li> <li>• Стеклоподобный углерод</li> <li>• Графит</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Алмаз</li> <li>• Стеклоподобный углерод</li> <li>• Графит</li> </ul>	
	Постимпактные минералы	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Пирит</li> <li>• Кальцит</li> <li>• Цеолиты</li> <li>• Сметит</li> <li>• Барит</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Пирит</li> <li>• Кристобалит</li> <li>• Цеолиты</li> <li>• Сметит</li> <li>• Халцедон</li> <li>• Гематит</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Барит</li> <li>• Кальцит</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Пирит</li> <li>• Кальцит</li> <li>• Цеолиты</li> <li>• Пирохлор</li> </ul>

**Примечание:** \* - в скобках указана температура плавления, \*\* - потенциально сформирован из импактного расплава, \*\*\* - в зависимости от разновидности расплавленных бомб.



**Анализ (реликтовый или синимпактный).** При профилировании поверхности тонких срезов расплавной матрицы методом спектроскопии комбинационного рассеяния света в некоторых образцах расплавных импактитов помимо полевошпатовой компоненты также было зафиксировано присутствие анатаза (рис. 5.10), что может быть объяснено его тонкодисперсной криптокристаллической формой нахождения в тесном взаимоотношении с полевошпатовой матрицей. Однако, установить его генетическую природу пока не удалось ввиду невозможности установить его взаимоотношения в вмещающей матрице и собственных форм обособлений ни оптически, ни с помощью СЭМ.



**Рисунок 5.10.** КР спектры линейного профиля матрицы расплавной бомбы Б/7-518 и оптическое изображение участка полевошпатовой матрицы бомбы в отражённом свете с профилем (вверху справа). Условные обозначения: А – КРС линии анатаза, Fsp – полевошпат и КРС линии полевого шпата, T1-T7 – точки профиля. Шаг профиля 10 мкм.

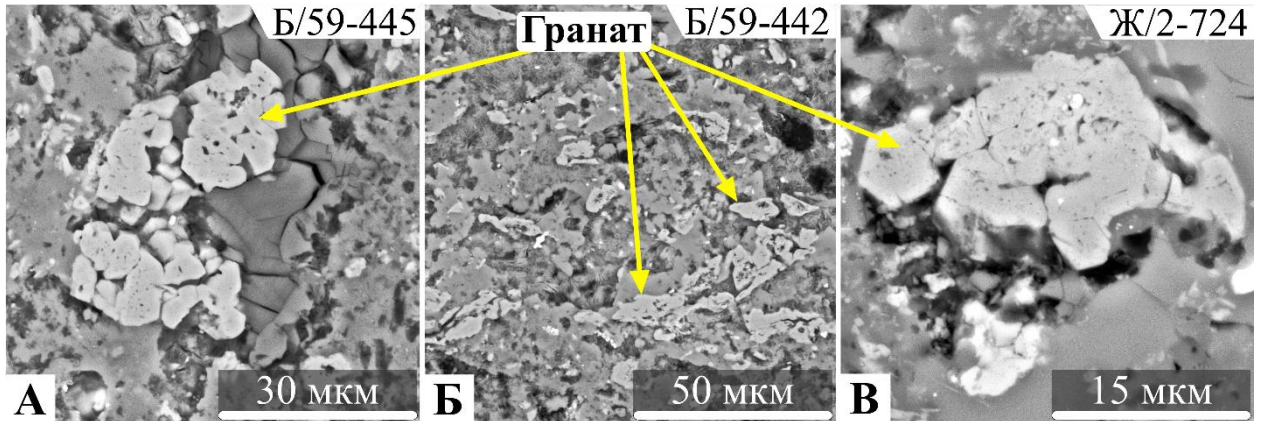
**Барит (постимпактный).** Данный минерал идентифицирован по данным ЭДС во всех трёх типах расплавных импактитов. Преимущественно формирует плотные выделения в округлых и угловатых миндалинах микрокристаллической полевошпатовой матрицы, что обуславливает морфологию выделений (рис. 5.24). Часто образует сингенетичные выделения с цеолитами, также развитыми в миндалинах матрицы. Размер выделений различен, встречаются разности от первых микрометров, различимых только при помощи СЭМ, и до первых сантиметров, наблюдаемых невооружённым глазом.

**Гранат (реликтовый).** Агрегаты минерала гранатового ряда нередко встречаются в расплавных бомбах (рис. 5.11), а также зафиксированы в одном случае в ассимилированном импактным расплавом литокласте породы мишени в жильном теле, что ранее не было отмечено предыдущими исследователями. Единичные зёрна попадают в жильных телах коричневого цвета (рис. 5.11). Присутствие граната подтверждается серией данных СЭМ с энергодисперсионной и КРС спектроскопий. Точечные анализы нескольких агрегатов из разных образцов импактитов характеризуются довольно одинаковым составом (табл. 5.3). Кристаллохимическая формула граната:  $(\text{Mg}_{1.697}, \text{Fe}^{2+}_{1.182})_{2.910}\text{Al}_{2.043}(\text{SiO}_4)_{3.047}$ .

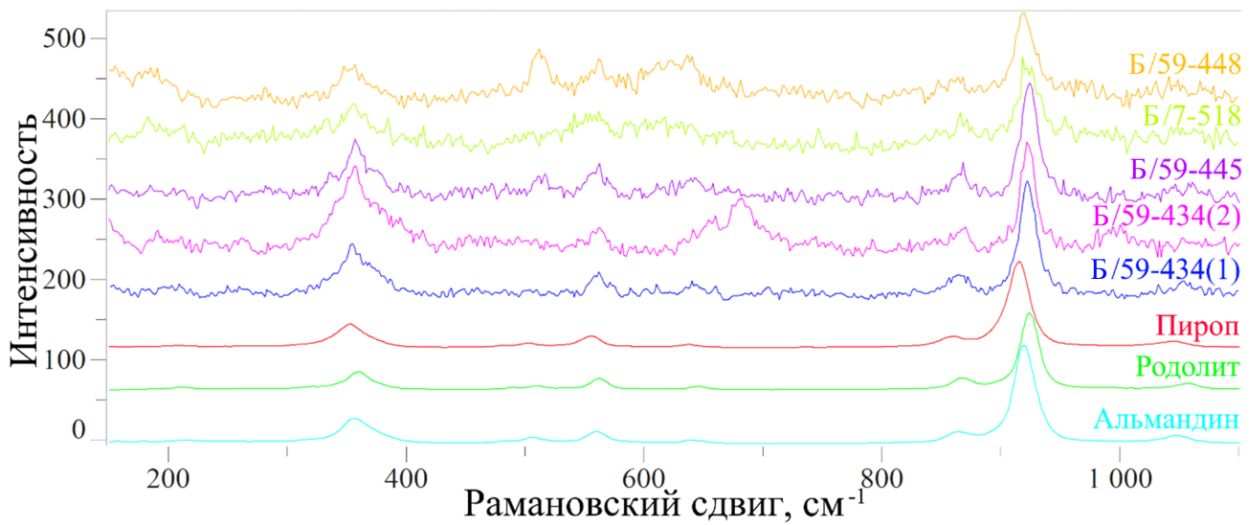
По данным спектроскопии КР спектры гранатов из 4-х образцов расплавных бомб соотносятся с референтными спектрами пироба, родолита и альмандина – минералов альмандинового ряда гранатов (рис. 5.12). Важно отметить, что спектры комбинационного рассеяния света для Fe-Mg ряда гранатов схожи, что не позволяет точно диагностировать разновидность граната данным методом. Однако согласно полученным данным химического состава с помощью энергодисперсионной спектрометрии он ближе к родолиту.

Минералы ряда гранатов по сравнению с другими минералами, претерпевающими ударные изменения, являются более устойчивыми к воздействию ударной волной (Raitala, 1997). В данном случае агрегаты граната вовлечены в стекловатую матрицу алюмосиликатного состава и являются раздробленными, в последствии в малой степени измененными термически, реликтами гранатов из пород мишени, что подтверждается морфологией агрегатов и присутствием данного минерала среди «теней» обломков пород мишени ассимилированных в импактный расплав. Размер данных реликтов и форма их нахождения не позволяет говорить о

них, как о сформировавшихся из расплава. Источником данных гранатов могли послужить скарнированные карбонатные породы на контакте с хенгурским габбро-долеритовым гипабиссальным комплексом ( $v\beta D3h$ ) (Зархидзе, Пискун и др., 2017).



**Рисунок 5.11.** Агрегаты граната в расплавных бомбах (А, Б) и жильном теле (В), данные СЭМ (режим BSE).



**Рисунок 5.12.** Спектры комбинационного рассеяния света граната из расплавных бомб: Б/59-448, Б/7-518, Б/59-445, Б/59-434(1), Б/59-434(2), а также эталонные спектры гранатов ряда Fe-Mg из баз данных Spectral ID и RRUFF: пироп, родолит, альмандин.

**Таблица 5.3.** Химический состав граната в трёх типах расплавных импактитов Карской астроблемы (вес. %) по данным энергодисперсионной спектроскопии.

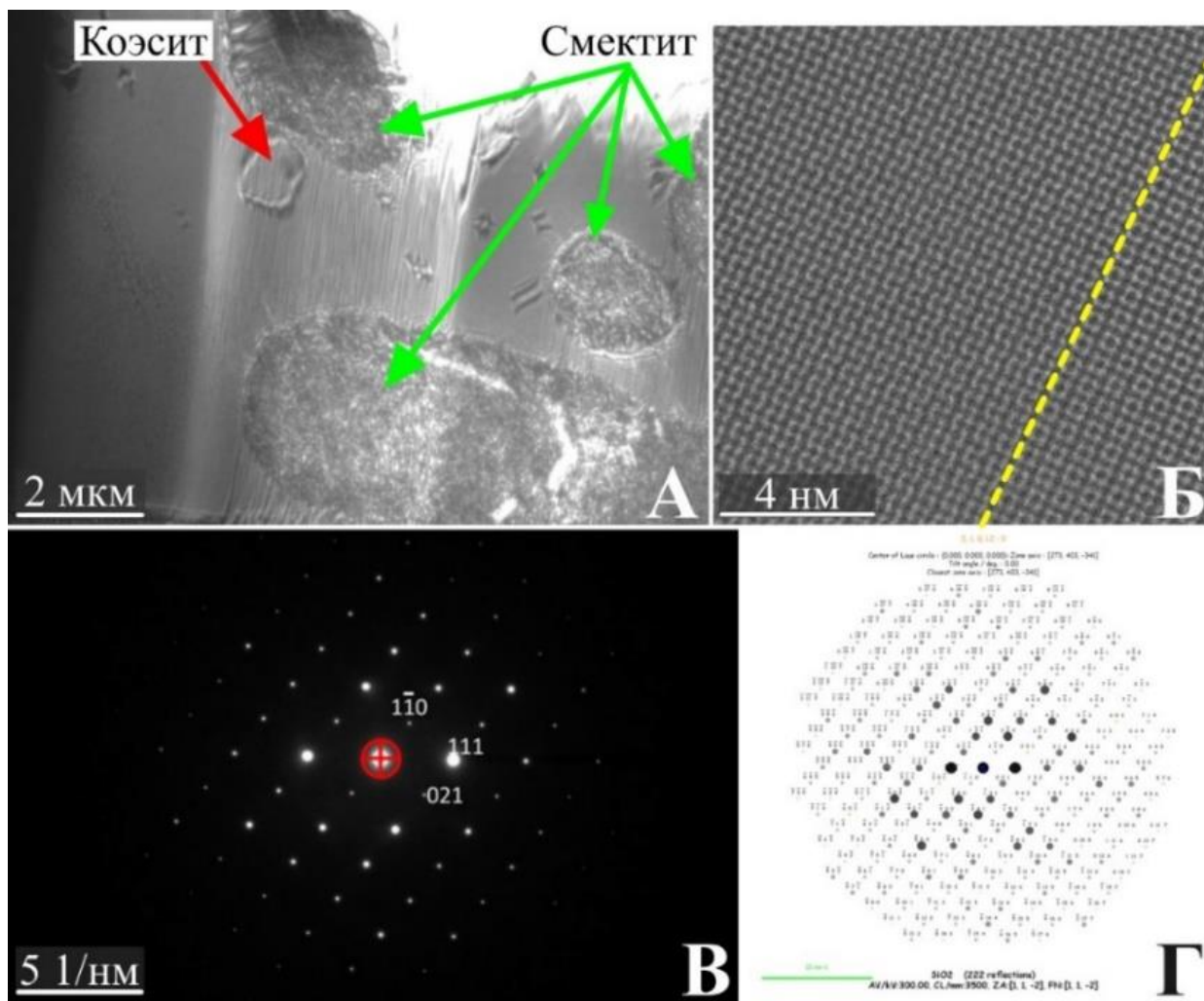
Образец	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Сумма
Б/59-434	48,4	1,4	7,3	11,1	19,0	0,7	0,3	н.о.	н.о.	11,7	99,8
Б/59-448	44,4	0,4	9,4	11,8	19,8	н.о.	1,0	0,2	н.о.	14,4	101,5
Б/59-448	40,2	0,2	6,7	10,4	18,3	0,1	2,8	0,3	0,2	15,0	94,3
Б/59-448	42,3	н.о.	8,3	10,9	19,2	0,2	0,8	0,2	0,2	16,6	98,6
Б/7-518	42,5	н.о.	9,4	11,4	18,5	0,1	н.о.	н.о.	0,3	17,3	99,4
Б/7-518	41,9	0,1	9,9	12,2	17,3	0,4	н.о.	н.о.	0,3	16,1	98,3
Б/7-518	43,7	н.о.	10,7	13,3	17,8	0,2	н.о.	н.о.	0,2	15,9	101,7
Б/7-518	43,1	0,4	9,1	11,7	19,1	0,2	н.о.	0,4	н.о.	15,8	99,7
Б/7-518	42,8	0,1	9,9	11,7	18,6	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	16,0	99,2
Б/59-445	43,6	н.о.	8,7	14,8	18,0	0,2	0,2	н.о.	н.о.	14,4	99,9
Б/59-445	43,5	0,1	9,3	12,4	19,2	0,3	0,2	н.о.	н.о.	14,9	100,0
Б/59-445	43,5	н.о.	8,6	12,7	19,0	0,2	0,2	н.о.	н.о.	16,7	100,8
Кр2-лит.	44,5	0,5	9,1	12,2	20,5	0,4	н.о.	0,2	н.о.	13,7	101,1
Кр2-лит.	44,7	0,4	9,4	13,7	19,3	0,4	0,8	0,3	н.о.	12,5	101,5
Б/59-428	43,2	н.о.	8,1	11,7	19,5	н.о.	0,5	н.о.	0,3	17,3	100,5
Ст. откл.	1,8	0,4	1,0	1,2	0,8	0,2	0,8	0,1	0,0	1,7	1,8

**Примечание:** Кр2-лит. – локальные ЭДС анализы граната из ассимилированного расплавом реликтового литокласта в жильном расплавном импактите черного цвета, н.о. – не обнаружено.

**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).

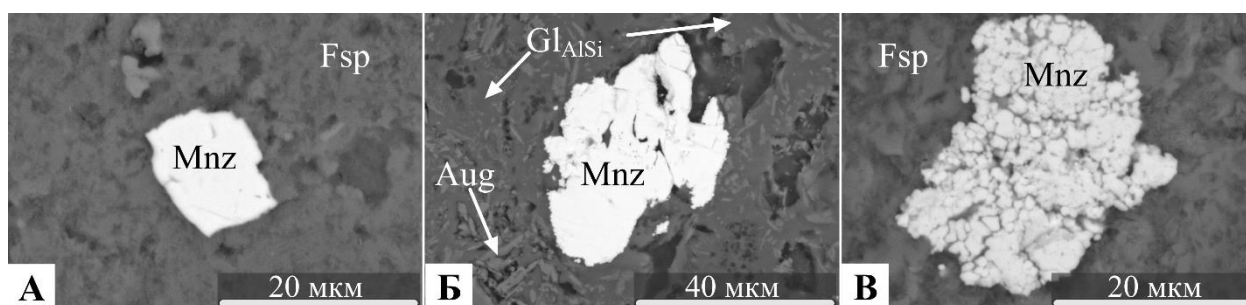
Коэсит в жильных расплавных телах находится в тесном пространственном взаимоотношении с «каплями» стекла SiO<sub>2</sub>. Помимо коэсита в «каплях» присутствуют каплевидные выделения смектита. Морфология кристаллов коэсита колеблется от изометричной до удлинённой.

Полученные данные просвечивающей электронной микроскопии (Shumilova, Zubov et al., 2020) позволили установить, что коэсит в силикатных «каплях» имеет монокристаллическую структуру, не содержит механических дефектов, характеризуется редкими двойниками, свойственными для ростового двойникования (рис. 5.13).



**Рисунок 5.13.** Изображение просвечивающей электронной микроскопии силикатной «капли» с коэзитом и смектитом (А), обозначенная жёлтым цветом граница двойникования коэзита (Б), а также электронная дифракция (В) и её смоделированный узор (Г) (Shumilova, Zubov et al., 2020).

**Монацит (реликтовый).** Присутствие редких обособлений монацита установлено во всех трёх типах расплавных импактитов при помощи СЭМ (рис. 5.14). Размер обособлений находится в пределах 20-40 мкм. Морфология зёрен обломочная (рис. 5.14 А, Б), следов внешнего плавления (взаимодействия с алюмосиликатным расплавом) не обнаружено. В одном случае зерно раздроблено (рис. 5.14 В). Вещественный состав монацитов согласно данным ЭДС по оксиду  $P_2O_5$  выдержанный (28-29%), в то же время по ряду элементов лантаноидов La-Gd и актиноида Th отмечается вариативность (табл. 5.4).



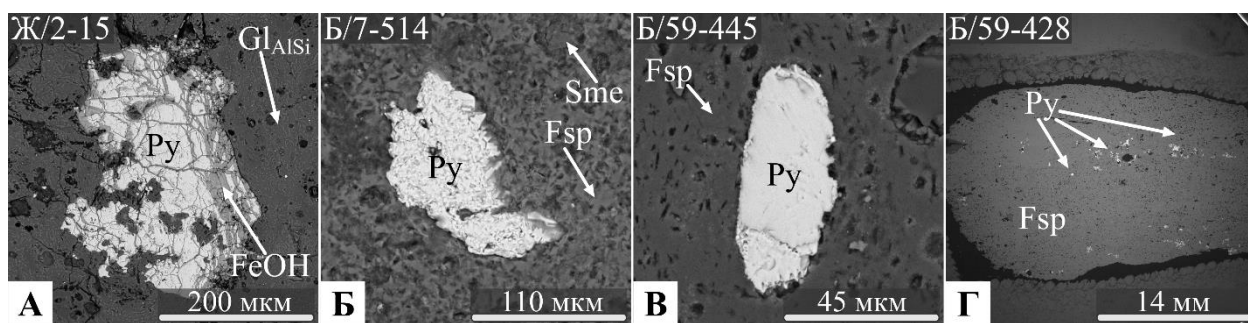
**Рисунок 5.14.** Монацит в массивном (А) и жильном (Б) телах, а также в бомбе (В) по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Fsp – полевой шпат, Aug – авгит,  $Gl_{AlSi}$  – алюмосиликатное стекло, Mnz – монацит.

**Таблица 5.4.** Данные вариативности вещественного состава монацитов по данным ЭДС.

Образец	Точка анализа	$La_2O_3$	$Ce_2O_3$	$Pr_2O_3$	$Nd_2O_3$	$Sm_2O_3$	$Gd_2O_3$	$ThO_2$
М/2-361	4_1	12.27	30.90	3.68	16.67	3.12	1.68	
Ж/109-649	1_1	12.71	33.11	3.97	16.69	2.54	1.01	
Б/58-4176	6_1	12.34	31.08	3.34	10.16	1.51	0.93	0.74
Б/59-445	6_1	13.09	29.28	3.34	13.58	3.29	1.53	2.50
Б/59-445	8_1	24.60	31.18	2.28	7.47	1.00	0.63	0.35
Б/7-514а	2_1	13.82	33.94	3.26	11.29	1.51	1.49	
Б/7-514а	3_1	7.18	27.58	4.25	18.97	4.48	2.64	0.98
Б/27-234	3_1	6.04	26.78	4.56	21.28	5.21	3.03	1.44
Б/27-235	3_1	8.52	29.60	3.73	15.89	3.35	2.39	0.00

**Пирит (постимпактный).** Данный минерал часто встречается среди трёх типов расплавных импактитов, заполняет миндалины в полевошпатовой матрице или алюмосиликатном стекле (рис. 5.15). Морфология пирита разнообразна, представлена округлыми формами выделений, угловатыми и со сложной морфологией поверхности. Зачастую пирит подвержен замещению  $FeOH$  (рис. 5.15 А).

**Пироксен (синимпактный).** Значимым аспектом в изучении расплавных импактитов Карской астроблемы является присутствие пироксенов в матрице расплавных импактитов. Кристаллы пироксенов сформированных из импактного расплава проявляют различия в морфологии как среди жильных стёкол, так и среди расплавных бомб (рис. 5.16).

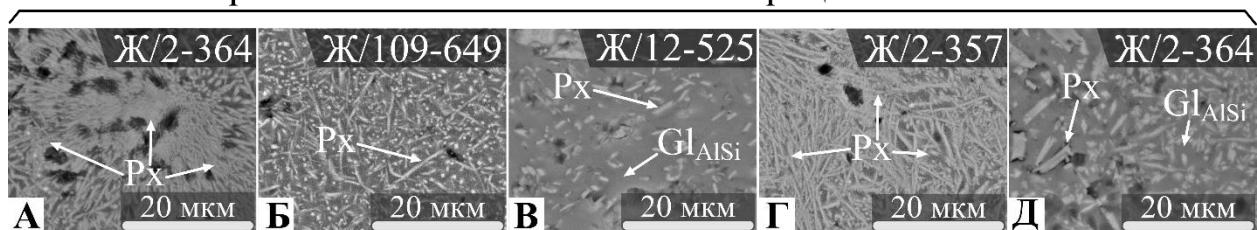


**Рисунок 5.15.** Пирит в расплавных импактитах Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE): А – в алюмосиликатной стекловатой матрице с интенсивно развитой по пириту псевдоморфозой FeOH; Б, В, Г – в полевошпатовой микрокристаллической матрице бомб. Условные обозначения:  $Gl_{AlSi}$  – алюмосиликатное стекло, Fsp – полево шпат, Py – пирит, Sme – смектит,  $Fe(OH)_2$  – гидроксид железа.

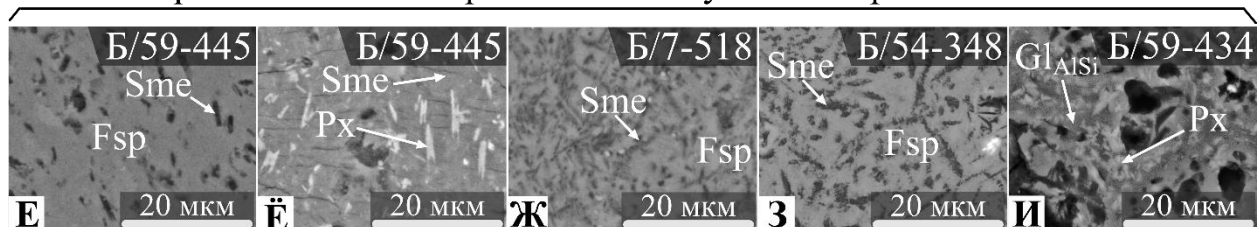
В тагамитах сохранившиеся кристаллы пироксенов обнаружены только в образце на р. Кара в виде их скопления на небольшом участке полевошпатовой матрицы (до 20 мкм в длину), что по всей видимости связано с тесным пространственным взаимоотношением с жильным восходящим комплексом на р. Кара.

Выполнить точные замеры элементных составов микрофаз методом энергодисперсионной спектроскопии для всех разновидностей расплавных импактитов без фонового влияния состава вмещающей их матрицы не представляется возможным в связи с их малыми размерами, достигающими в сечении не более 3 мкм в поперечнике. В связи с этим фазовая диагностика проводилась на основе спектров КРС. В жильных образованиях микрокристаллы пироксена представлены авгитом (Shumilova et al., 2019). Более точная фазовая диагностика пироксенов в расплавных бомбах при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния света затруднена в связи с наложением фоновой компоненты от матрицы расплавного импактита.

## Пироксены в алюмосиликатной матрице в жильных телах



## Пироксены и постпироксеновые “пустоты” в расплавных бомбах



**Рисунок 5.16.** Характер распределения и морфология пироксенов в жильных телах и бомбах (А-Д, Ё, И), а также псевдоморфозы смектита по пироксену (Е, Ж, З) в алюмосиликатной матрице бомб расплавных импактитов Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Sme – смектит, Px – пироксен, Fsp – полевой шпат,  $Gl_{AlSi}$  – алюмосиликатное стекло.

**Пирротин (реликтовый и синимпактный).** Пирротины – широко распространённая группа минералов с общей формулой  $Fe_{1-x}S$  являющихся дефектными производными структуры типа никелина  $NiAs$ . *Троилит* – минерал, являющийся конечным членом группы пирротина со стехиометрическим  $FeS$  или нестехиометрическим  $(Fe_{1-x}S)$  (Oshtrakh et al., 2016; Schrader et al., 2021), бронзово-жёлтого цвета, является антиферромагнетиком (Becker et al., 2010). Обычно образуется в восстановительных средах, встречается в метеоритах и медно-никелевых рудах (Scott, 2020; Kaliwoda et al., 2013; Maksimova et al., 2020; Becker et al., 2010). Кристаллическая симметрия пирротинов в целом, включая троилит, относится к структуре  $NiAs$ , которая стабильна при температуре ниже  $140\text{ }^{\circ}C$ , выше переходит в высокотемпературную разновидность (Pedoussaut, Lind, 2007). Пространственная группа троилита – 190 (Skala, 2006). Минерал очень часто содержит в виде твердого раствора до 1 % примеси – Cr, Mn, Zn, Ni, Cu и Co (Buddhue, 1945; Buchwald, 1977).

Присутствие пирротинов установлено в алюмосиликатной стекловатой матрице жильных стёкол (рис. 5.17). Более детально рассмотрим на примере коричневого стекла. Пирротины обнаружены в алюмосиликатной стекловатой матрице.

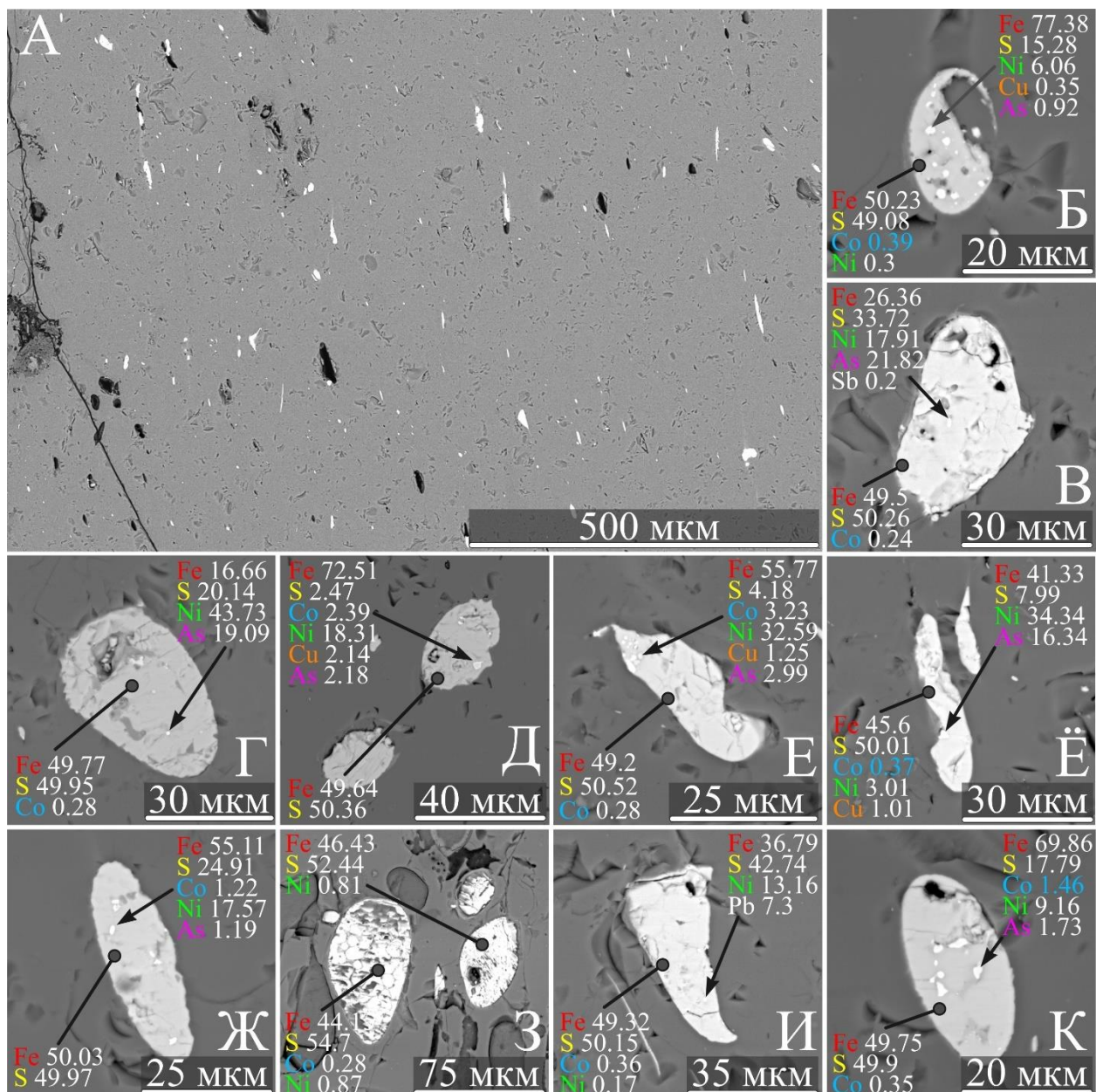


По данным *сканирующей электронной микроскопии* установлено, что выделения сульфидов представлены в виде обломков и округлых выделений размером ~20 мкм с различным удлинением – от полностью изометричных до существенно удлинённых форм – с коэффициентом удлинения 10.

Следов плавления на контакте с алюмосиликатной матрицей не выявлено, из чего следует, что температура окружающей алюмосиликатной матрицы не превышала 1188 °С (Березин, 2018).

Часто в пирротинах присутствуют сульфидные включения размером в пределах первых микрометров. Состав данных выделений вариативен, также практически всегда присутствует As; иногда также отмечаются Co, Cu, Pb. Примеры процентного содержания обозначенных выше элементов вынесены на рис. 5.17. Данные точечных анализов по данным ЭДС пирротинов приведены в таблице 5.5.

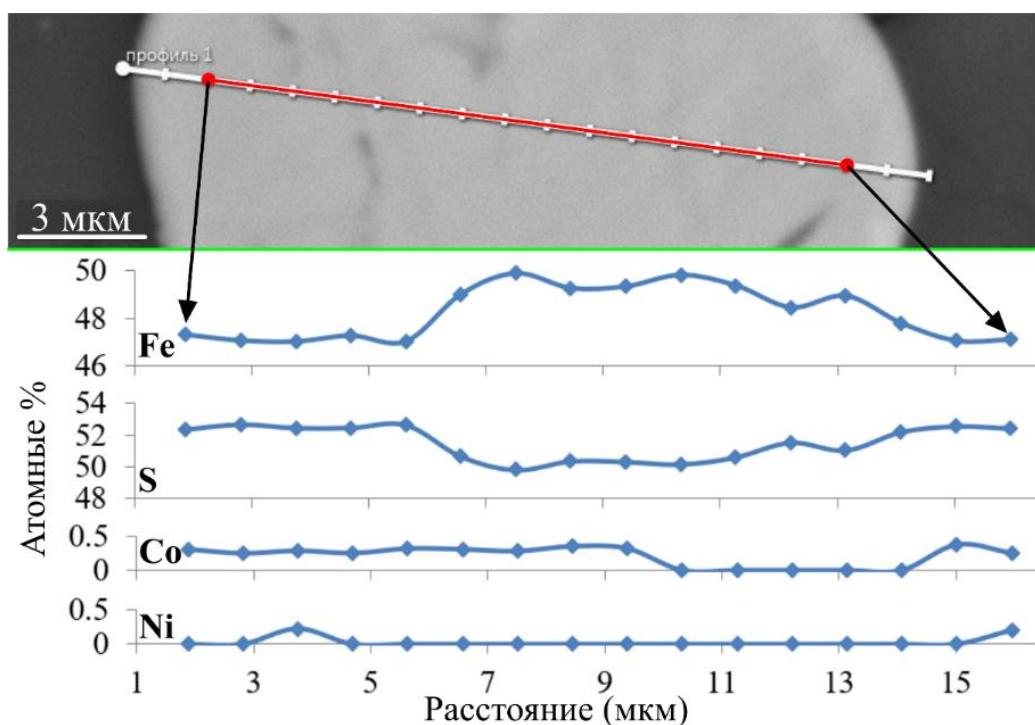
При анализе вещественного состава были получены данные профилирования нескольких выделений пирротинов при помощи *энергодисперсионной спектроскопии*. Пример профиля приведён на рис. 5.18. В целом профиль показывает вариативность соотношений Fe и S колеблющихся в пределах Fe – 52, S – 48 (ат. %) и Fe – 50, S – 50 (ат. %), что соответствует присутствию двух разновидностей пирротинов, последняя из которых относится к троилиту.



**Рисунок 5.17.** Разнообразие выделений сульфидной минерализации в алюмосиликатной матрице жильных тел коричневого цвета по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: А – общий план включений пирротинов в алюмосиликатной матрице коричневого жильного стекла, Б-К – увеличенные изображения пирротинов, символ ● – точечный анализ преобладающего по объёму в выделении, символ → – точечный анализ ярких включений в пирротинах (неизвестных минеральных фаз).

**Таблица 5.5.** Данные точечных ЭДС анализов пирротинов в коричневом жильном расплавленном импактите (ат. %).

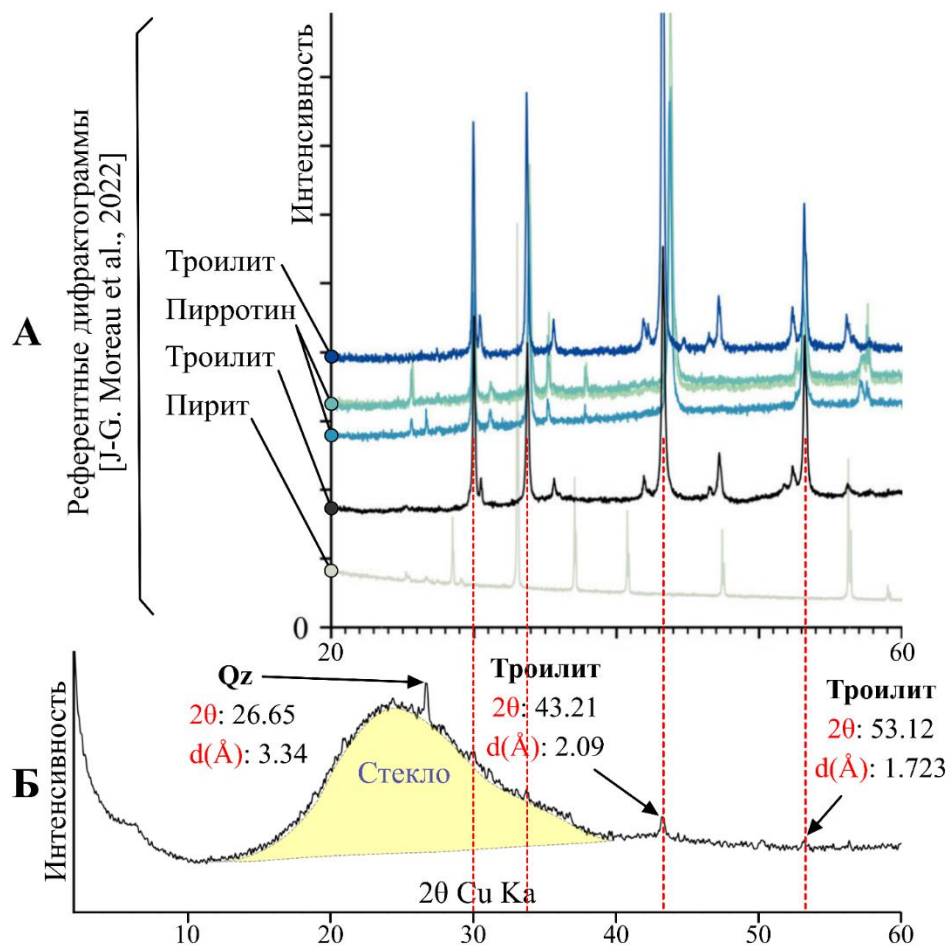
<b>Образец</b>	<b>Номер ЭДС анализа</b>	<b>S</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Fe/S</b>
<b>Ж/2-724</b>	9_1	50.52	49.2	0.28	–	0.97
<b>Ж/2-724</b>	10_1	50.43	49.25	0.32	–	0.98
<b>Ж/2-724</b>	11_1	50.26	49.46	0.28	–	0.98
<b>Ж/2-724</b>	11_3	49.95	49.8	0.25	–	1.00
<b>Ж/2-724</b>	12_1	55.66	43.11	–	1.23	0.77
<b>Ж/2-724</b>	13_1	50.55	49.22	0.22	–	0.97
<b>Ж/2-724</b>	14_1	49.58	50.28	–	0.14	1.01
<b>Ж/2-724</b>	14_2	50.4	49.6	–	–	0.98
<b>Ж/2-724</b>	15_1	55.35	43.58	–	1.07	0.79
<b>Ж/2-724</b>	16_2	55.07	44.05	–	0.88	0.80
<i>Ср. знач.</i>		<i>51.78</i>	<i>47.76</i>	<i>0.14</i>	<i>0.33</i>	<i>0.93</i>
<i>Ст. откл.</i>		<i>2.49</i>	<i>2.91</i>	<i>0.14</i>	<i>0.51</i>	<i>0.10</i>
<i>Мин. знач.</i>		<i>49.58</i>	<i>43.11</i>	–	–	<i>0.77</i>
<i>Макс. знач.</i>		<i>55.66</i>	<i>50.28</i>	<i>0.32</i>	<i>1.23</i>	<i>1.01</i>
<b>Ж/2-723-2</b>	1_10	50.26	49.74	–	–	0.99
<b>Ж/2-723-2</b>	3_3	49.08	50.23	0.39	0.3	1.02
<b>Ж/2-723-2</b>	4_1	49.97	50.03	–	–	1.00
<b>Ж/2-723-2</b>	5_1	49.95	49.77	0.28	–	1.00
<b>Ж/2-723-2</b>	6_1	50.26	49.5	0.24	–	0.98
<b>Ж/2-723-2</b>	7_1	50.36	49.64	–	–	0.99
<b>Ж/2-723-2</b>	8_1	50.15	49.32	0.36	0.17	0.98
<b>Ж/2-723-2</b>	9_1	49.9	49.75	0.35	–	1.00
<b>Ж/2-723-2</b>	10_1	54.7	44.15	0.28	0.87	0.81
<b>Ж/2-723-2</b>	10_2	54.9	44.08	0.23	0.79	0.80
<b>Ж/2-723-2</b>	11_7	51.22	48.11	0.25	0.42	0.94
<i>Ср. знач.</i>		<i>50.98</i>	<i>48.57</i>	<i>0.22</i>	<i>0.23</i>	<i>0.96</i>
<i>Ст. откл.</i>		<i>1.96</i>	<i>2.27</i>	<i>0.15</i>	<i>0.33</i>	<i>0.08</i>
<i>Мин. знач.</i>		<i>49.08</i>	<i>44.08</i>	–	–	<i>0.8</i>
<i>Макс. знач.</i>		<i>54.9</i>	<i>50.23</i>	<i>0.39</i>	<i>0.87</i>	<i>1.02</i>



**Рисунок 5.18.** Графики содержания Fe, S, Co и Ni вдоль профиля по выделению троилита (вверху по данным СЭМ (режим BSE)) в жильном коричневом стекле по данным точечных анализов ЭДС.

По данным точечных микронзондовых анализов состав некоторых зёрен пирротинов близко соотносится со стехиометричным FeS ( $Fe/S = 1:1$ , как у троилита). Чтобы подтвердить присутствие троилита был применен комплекс методов – рентгенодифракционный анализ, спектроскопия КРС и метод дифракции обратно рассеянных электронов.

При помощи *рентгеновской дифрактометрии* порошковой пробы коричневого стекла удалось подтвердить присутствие троилита. Полученная на медном рентгеновском излучении дифрактограмма демонстрирует рефлексы на углах  $2\theta$ :  $43.21^\circ$ ,  $53.12^\circ$ , что соответствует полученным межплоскостным расстояниям для троилита согласно карточке дифракционного стандарта троилита (рис. 5.19, табл. 5.6). Основное различие между графиками рентгеновской дифракции пирротина и троилита заключается в смещении основного пика с  $\sim 43,8^\circ 2\theta$  до  $\sim 43,2^\circ 2\theta$  (Moreau et al., 2022; Clayton et al., 2023). Полученный параметр нестехиометричности, который рассчитывается по линейной формуле  $d_{114} = -0.2494x + 2.0936$  при параметре главного рефлекса троилита  $d_{114} = 2.09 \text{ \AA}$  согласно методике (Kruse, 1990; Oshtrakh et al., 2016) для троилита, составляет  $x \approx 0.0144$  у.е.



**Рисунок 5.19.** Рентгеновские дифрактограммы – эталонная и от порошковой пробы расплавленного импактита жильного типа коричневого цвета: А – референтные дифрактограммы (Moreau et al., 2022), Б – дифрактограмма порошковой пробы коричневого стекла с троилитом. Условные обозначения: Qz – кварц, Тро – троилит, Ру – пирит, Ро – пирротин.

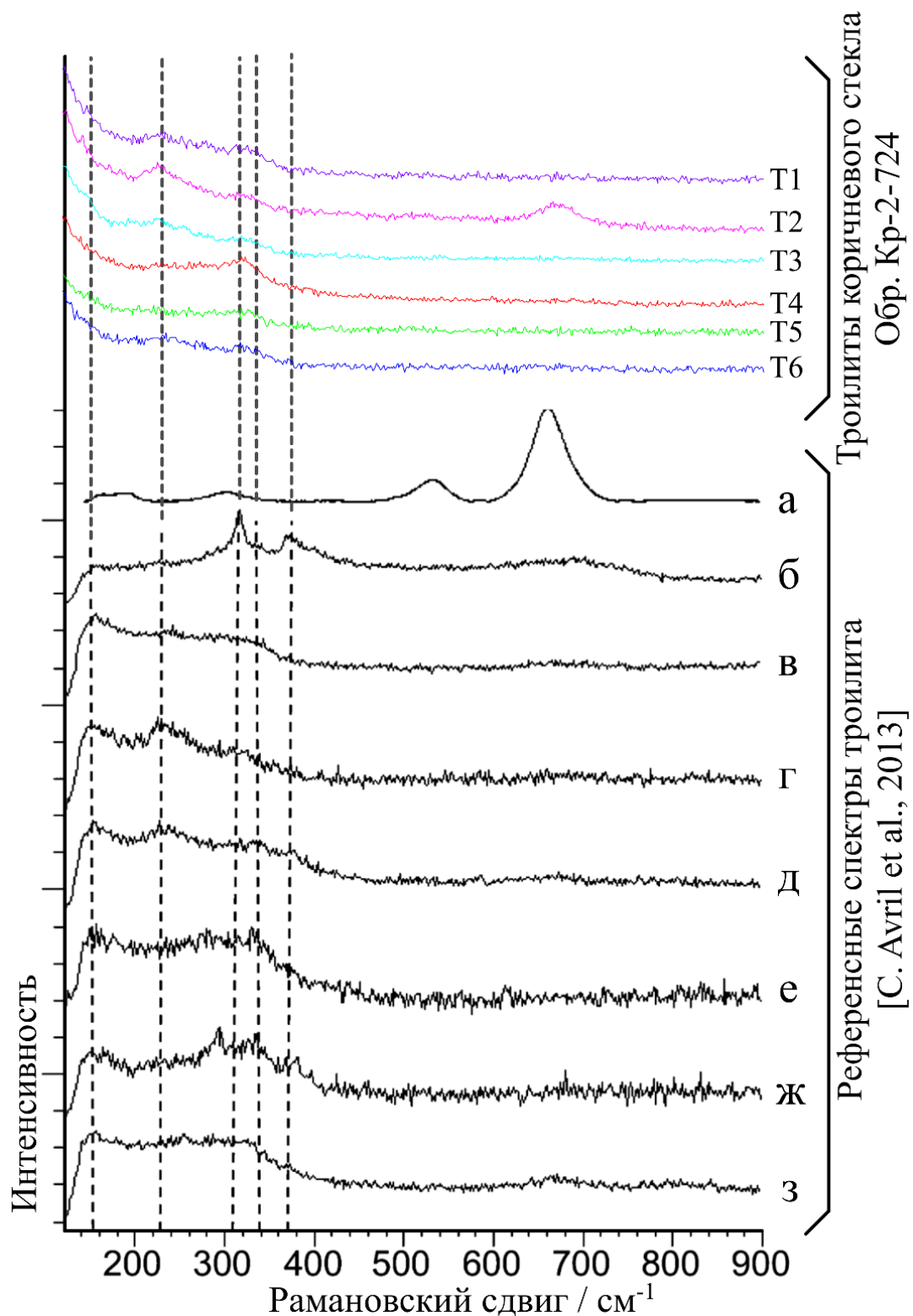
**Таблица 5.6.** Данные дифракционного стандарта троилита \*.

d Å	I/I <sub>0</sub>	h k l	d Å	I/I <sub>0</sub>	h k l	d Å	I/I <sub>0</sub>	h k l
2.1560	4	203	1.4920	3	220	1.1320	2	405
2.1380	2	105	1.4858	2	304	1.1171	8	308
<b>2.0920</b>	<b>100</b>	<b>114</b>	1.4675	5	008	1.1076	2	412
1.9270	5	211	1.4460	3	222	1.0897	2	317
1.7478	4	213	1.4229	2	311	1.0528	7	414
<b>1.7228</b>	<b>28</b>	<b>300</b>	1.3300	10	224	0.9947	2	330
1.6363	4	116	1.3169	4	118			
1.5017	2	215	1.1348	2	323			

**Примечание:** жирным шрифтом обозначены идентифицированные главные рефлексы троилита на рис. 5.19, \* - по данным (Joint Committee on Chemical Analysis..., 1950).

*Спектроскопия комбинационного рассеяния света* позволила уточнить фазовую диагностику данного минерала. Получить КРС спектр троилита (особенно природного) довольно проблематично. Вероятную причину данного факта связывают с сильным поглощением лазерного излучения сульфидами железа (Avril et al., 2013). Кроме того, пирротины показывают тенденцию вступать в реакцию с O или OH из атмосферного воздуха, образуя оксиды, такие как, например, магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) или гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Weber et al., 2015; 2017). Троилит обладает слабым эффектом комбинационного рассеяния (Saikia et al., 2017). Типичный спектр КРС троилита содержит полосы:  $148\text{ cm}^{-1}$ ,  $197\text{ cm}^{-1}$ ,  $228\text{ cm}^{-1}$ ,  $255\text{ cm}^{-1}$ , and  $308\text{--}331\text{ cm}^{-1}$ , обусловленные колебаниями S–S и Fe–S (Li Xiaoguang et al., 2023). Референтные спектры КРС троилита при комнатной температуре демонстрируют три полосы –  $160$ ,  $290$ , and  $335\text{ cm}^{-1}$ , полосы  $160$  и  $290\text{ cm}^{-1}$  не всегда проявляются, что может быть связано с ориентировкой образца. В синтетическом троилите присутствует пик  $240\text{ cm}^{-1}$  (Avril et al., 2013).

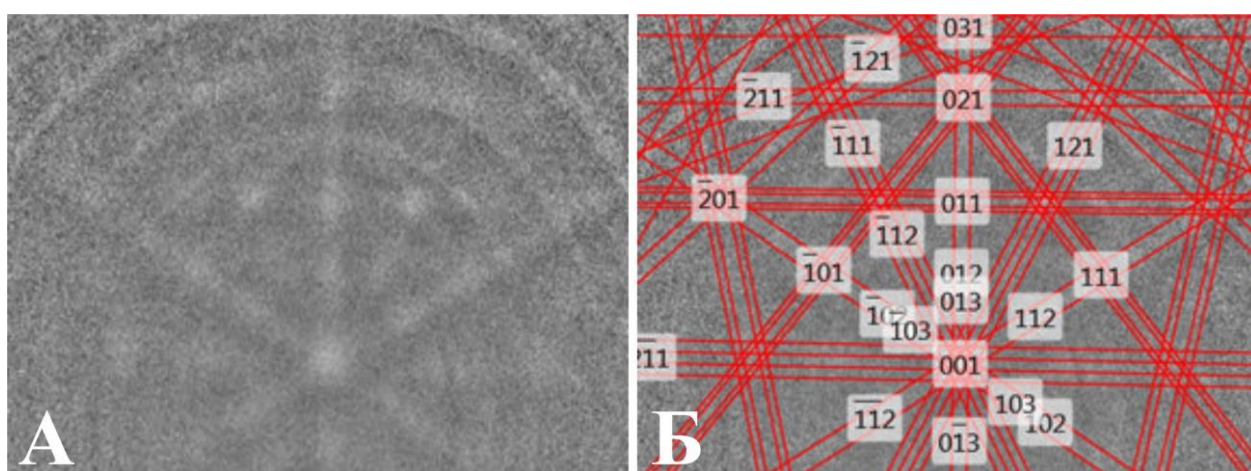
Спектры комбинационного рассеяния света, полученные для пирротина/троилитов из коричневых жильных стёкол Карской астроблемы, сопоставимы с референтными спектрами природных троилитов (рис. 5.20) (Avril et al., 2013). Широкие полосы могут указывать на комбинацию нескольких сульфидных фаз (Wang et al., 2004), однако метод рентгеновской дифрактометрии подтверждает присутствие троилита (рис. 5.3.10).



**Рисунок 5.20.** Спектры КР пирротина/троилита жильных коричневых стёкол Карской астроблемы (Т1-Т6) в сравнении с референсными спектрами синтетического и природного троилитов по Avril и др. (2013). Условные обозначения: а – спектр природного магнетита, б – чистый синтетической порошок FeS, в – FeS в образце метеорита #ENS5-1, г – FeS в образце метеорита #ENS3-1, д – FeS in #ENS3-2, е – FeS в образце метеорита #ENS3-1, и зёрна природного троилита в: ж – Bustee, з – Aubres (Avril et al., 2013).

**Метод дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD)** также подтвердил присутствие троилита в коричневом стекле (рис. 5.21). Согласно дифракционной картине фаза идентифицирована как «Troilite 2H», кристаллическая система – гексагональная, группа Лауэ –  $6/mmm$ , пространственная группа – 190, параметры ячейки:  $a=6.00\text{\AA}$ ,  $b=6.00\text{\AA}$ ,  $c = 11.73\text{\AA}$ , углы:  $\alpha=90^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$ ,  $\gamma=120^\circ$ .

Таким образом, совокупность полученных аналитических данных вещественного состава и кристаллической структуры пирротина позволили впервые установить присутствие троилита в жилых коричневых стёклах Карской астроблемы.

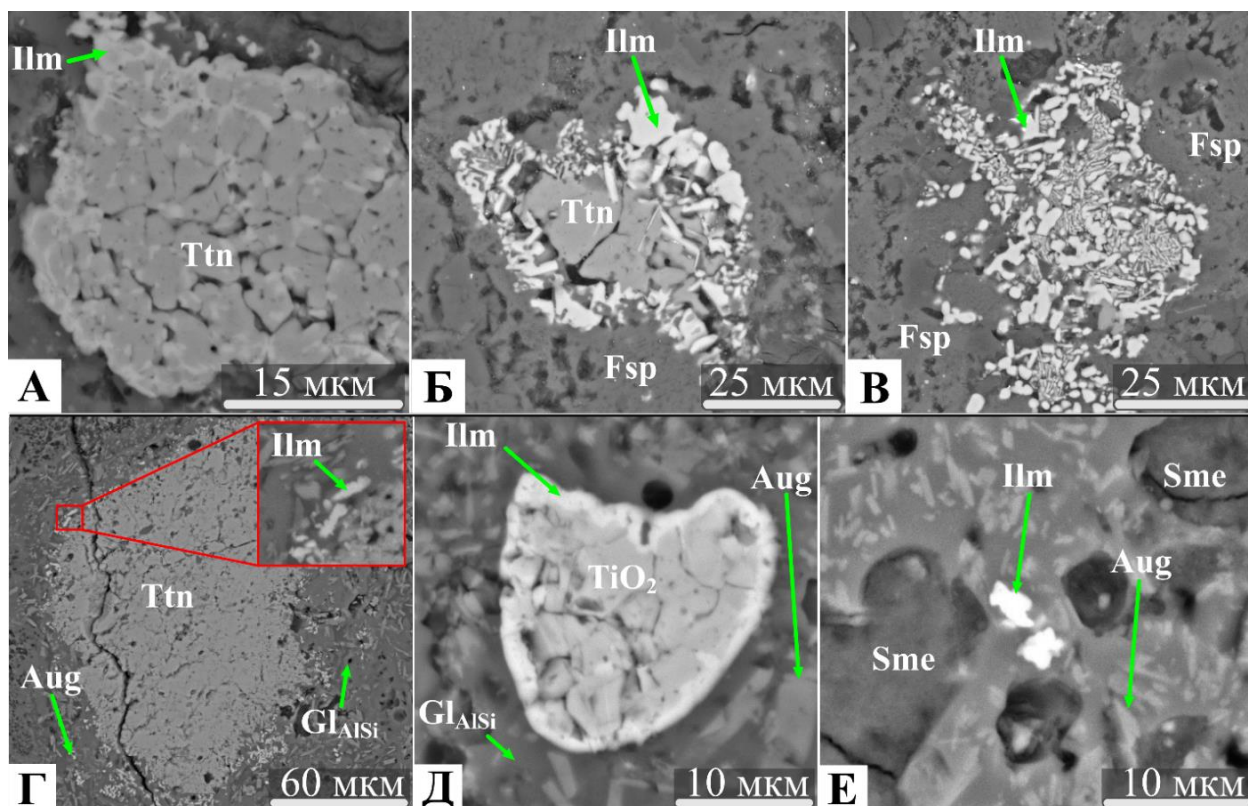


**Рисунок 5.21.** Данные дифракции отражённых электронов для троилита в коричневом жильном стекле (А) и интерпретация линий Кикучи по базе данных ICSD (Б).

**Титановые минералы (реликтовые и синимпактные).** Данные фазы были обнаружены в их тесном пространственном взаимоотношении при помощи сканирующей электронной микроскопии в образцах «in situ». Выявлены три разновидности обособлений минералов титана: 1 – титанит с ильменитом (рис. 5.22 Б, Г), 2 –  $\text{TiO}_2$  с ильменитом (рис. 5.22 Д), 3 – самостоятельные обособления ильменита (рис. 5.22 Е) в том числе с грануляцией (рис. 5.22 В). В первых двух разновидностях титанит, либо в некоторых случаях  $\text{TiO}_2$ , образуют центральную часть выделения с угловатой реликтовой морфологией. Ильменит образует вокруг центральной части обособления кайму с морфологией гранулярного ильменита, указывающего на его образование из расплава, который мог сформироваться при плавлении реликтового титанита или  $\text{TiO}_2$  с поступлением Fe из окружающего



алюмосиликатного расплава. На рисунке 5.22 (Б, Г) титанит судя по морфологии является реликтовым. Ильменит на том же рисунке во всех случаях синимпактный.



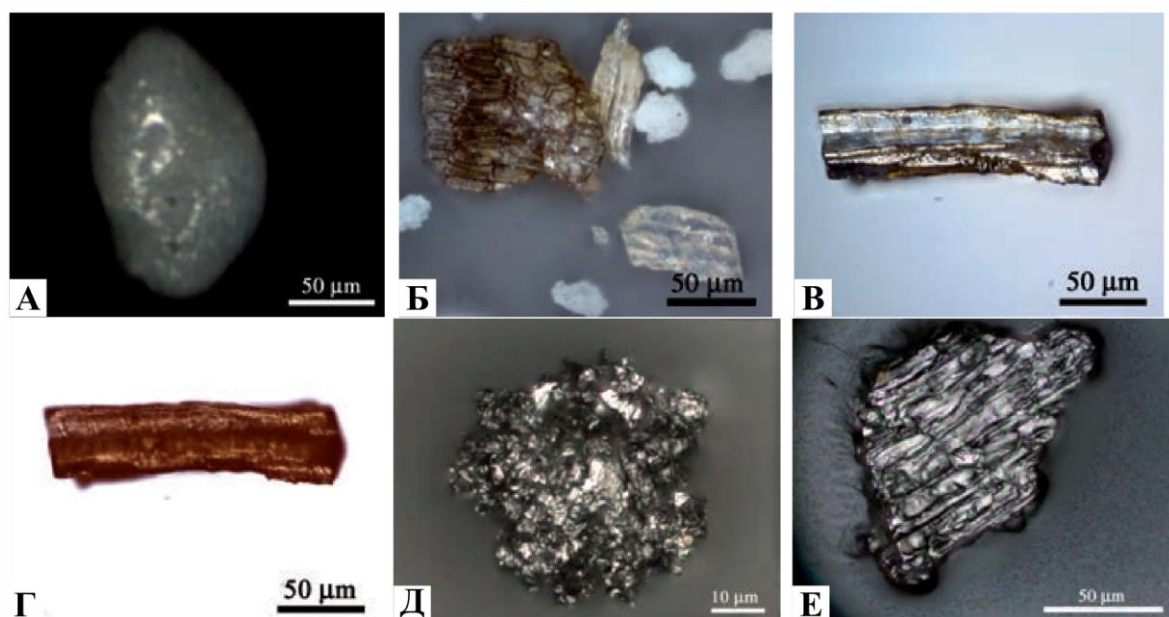
**Рисунок 5.22.** Разнообразие минералов титана в массивных (А-В) и жильных телах (Г-Е) по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Fsp – полевоы шпат, Sme – смектит, Aug – авгит, Ttn – титанит, Ilm – ильменит, Gl<sub>AlSi</sub> – алюмосиликатное стекло.

### Углеродные фазы (синимпактные)

*Алмазы* в импактиках Карской астроблемы представлены двумя разновидностями: апоугольные «сахароподобные» агрегаты, а также параморфозы по органическим остаткам, названные «каритом» (рис. 5.23) (Shumilova et al., 2018, 2020). Форма *апоугольных алмазов* в основном неправильная, они характеризуются преимущественно белым цветом, но также встречаются серые и коричневатые оттенки, «алмазный» блеск отсутствует. Размеры алмазных частиц составляют от первых десятков микрометров до нескольких сотен микрометров (Shumilova et al., 2018; Shumilova et al., 2020), они представляют собой агрегаты нанокристаллитов размером 20-40 нм. Особенностью параморфоз алмаза по органическим остаткам является сохранность клеточной морфологии растительных остатков (рис. 5.23).

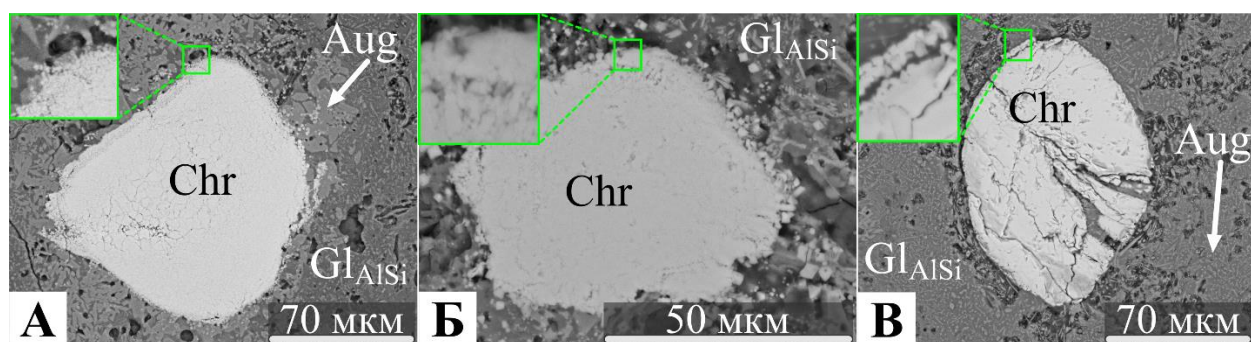
Данная разновидность алмаза встречается чаще всего в зювитах, максимальные содержания характерны для расплавных бомб (Shumilova et al, 2019). **Стеклоподобный углерод** образуется по углистым частицам и органическим остаткам является наиболее распространенной углеродной фазой. Частицы стеклоподобного углерода имеют жирный блеск, размер частиц составляет до нескольких сотен микрометров, форма частиц неправильная (рис. 5.23 Е). Другие углеродные фазы представлены графитом (рис. 5.23 Д),  $\alpha$  и  $\beta$  карбином (Уляшев, 2021). **Графит** характеризуется поликристаллическими агрегатами (рис. 5.23 Д) размером до первых сотен микрометров. **Карбин** имеет монокристаллическое строение, представлен тонкими плоскими образованиями неправильной формы. Размер частиц карбина составляет первые микрометры (Уляшев, 2021).

Скуппулезное изучение углеродных фаз проводилось ранее предшественниками, поэтому в данной диссертационной работе подробного описания не приводится.



**Рисунок 5.23.** Оптические изображения разновидностей импактных углеродных веществ по углю, отобранные из концентрата (неполяризованный отраженный свет): (А) светло-серый, полностью кристаллический, плотный «сахароподобный» алмаз с округлой формой; (Б) алмазные псевдоморфозы по органике и рыхлые «сахароподобные» частицы; (В) алмазная псевдоморфоза по органическим реликтам; (Г) то же самое, что и (В) на просвет; (Д) графитовый агрегат; (Е) стеклоподобный углерод псевдоморфоза по органике (Shumilova et al., 2018).

**Хромит (реликтовый).** Выделения хромита имеют явный реликтовый генезис, поскольку их морфология не несёт признаков синимпактной кристаллизации. Морфология выделений угловатая, местами наблюдаются признаки деформаций, такие как интенсивные трещины и тонкое дробление (рис. 5.24 А). Данный минерал обнаружен только в алюмосиликатной матрице жильных тел. Вещественный состав хромитов плавающий, в большом количестве присутствует примесь Mg (табл. 5.7).

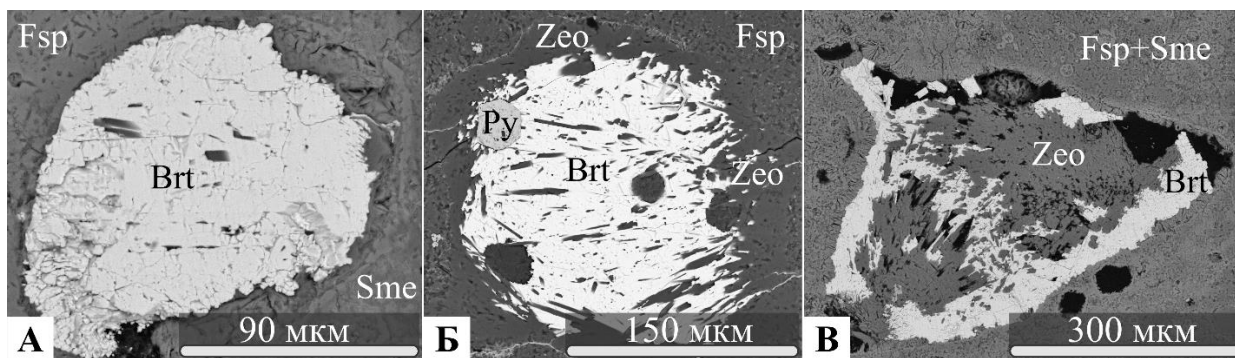


**Рисунок 5.24.** Выделения хромита в алюмосиликатной матрице жильных расплавных импактитов по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Chr – хромит,  $Gl_{AlSi}$  – алюмосиликатное стекло, Aug – авгит.

**Таблица 5.7.** Данные вариативности состава хромитов по данным ЭДС.

Образец	Точка анализа	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO (общ.)	Сумма
Ж/2-15	2_1	9.41	8.17	0.4	60.62	0.49	18.13	97.19
Ж/109-649	2_1	7.35	8.67	0.3	54.25	0.63	29.2	100.4
Ж/109-649	8_2_1	12.2	22.5	0.3	47.58		17.21	99.74

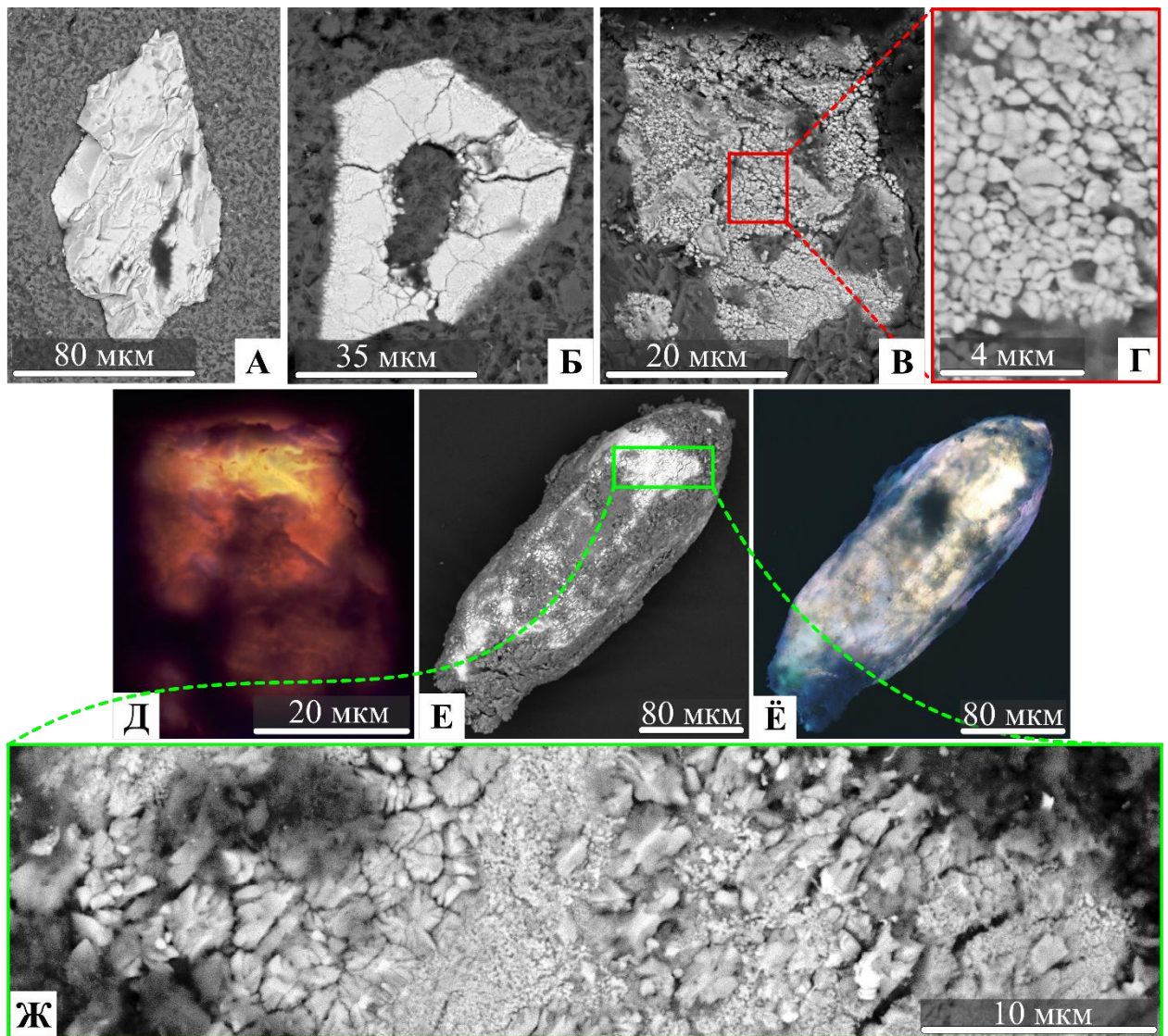
**Цеолит (постимпактный).** Широко распространённый постимпактный минерал, присутствующий во всех трёх типах расплавных импактитов. Идентифицирован по данным СЭМ (рис. 5.25). Образует выделения в миндалинах расплавных импактитов размером до первых сантиметров. Зачастую находится в тесном пространственном взаимоотношении с баритом, пиритом (рис. 5.25 Б).



**Рисунок 5.25.** Выделения барита и цеолита в миндалинах алюмосиликатной матрицы расплавных импактитов (бомб) по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Fsp – полевой шпат, Sme – смектит, Zeo – цеолит, Brt – барит, Py – пирит.

**Циркон (реликтовый и синимпактный).** Данный минерал может подвергаться при импактном метаморфизме разным изменениям: по нему может образовываться высокобарная фаза – рейдит, могут возникать планарные элементы, образовываться гранулярные текстуры, циркон может разлагаться с образованием  $ZrO_2$  (бадделеит) и  $SiO_2$  при температурах около  $1676^\circ C$ . Присутствие  $ZrO_2$  в гранулированном цирконе свидетельствует о давлении 65-70 ГПа (Глазовская, 2021).

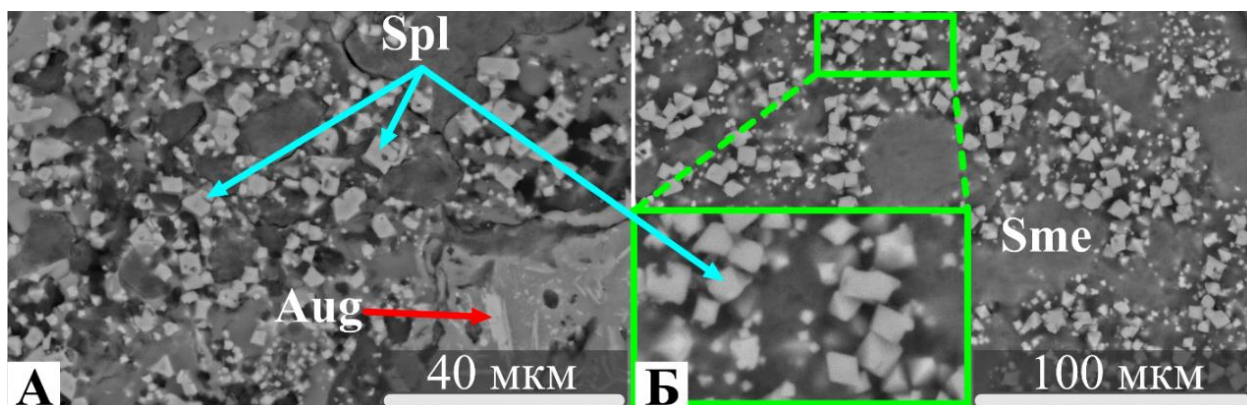
Для Карской астроблемы присутствие цирконов установлено в жильном и массивном расплавных импактитах (рис. 5.26). В жильных телах циркон был обнаружен в 2018 г (Shumilova et al., 2018, 2020). Благодаря применению сканирующей электронной микроскопии установлено, что характер данных цирконов разнообразен: в виде обломков кристаллов (рис. 5.26 А), деформированных кристаллов (рис. 5.26 Б, В) и гранулированных агрегатов (Shumilova et al., 2018, 2020). В последних иногда фиксируется присутствие  $ZrO_2$  (бадделеита) (по данным ЭДС). Цирконы имеют особо значимую роль при геологическом датировании, в частности при определении возраста астроблем, которое необходимо выполнять только для новообразованных цирконов непосредственно при перекристаллизации первичных цирконов из пород мишени в импактном расплаве. Поэтому выявление гранулированных цирконов имеет важное значение для уточнения возраста Карского импактного события.



**Рисунок 5.26.** Разновидности цирконов в трёх типах расплавных импактитов Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE): А – обломочная разновидность в матрице массивного расплавного импактита, Б – деформированная разновидность с гранулированной внешней зоной со смектитом заполняющим центральную часть циркона (из бомбы), В – полностью деформированная разновидность в реликте породы мишени в массивном расплавном импактите, Г – увеличенная область на рисунке В, Д – цветная катодоллюминесценция циркона на рисунке В, Е – кристалл деформированного и гранулированного с поверхности циркона из жильного импактита, Ё – цветная катодоллюминесценция циркона на рисунке Е, Ж – увеличенная область с гранулированным цирконом на рисунке Е.

**Шпинель (синимпактная).** Единственный случай выявления данного минерала относится к жильному расплавному импактиту серого цвета. В структуре жильного тела шпинель в виде кристаллов октаэдрического облика относительно

равномерно распределена в обособлении слоистых силикатов (сметита?), вероятно являющихся продуктом постимпактного преобразования импактита (рис. 5.27).



**Рисунок 5.27.** Октаэдрические кристаллы шпинели в обособлении слоистых силикатов в жильном теле серого цвета по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Spl – шпинель, Sme – сметит, Aug – авгит.

#### 5.4. Последовательность минералообразования

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

*В массивных расплавных импактитах* установлены следующие синимпактные фазы в порядке их образования при снижении температуры неомогенного расплава: ильменит (здесь и далее в скобках – температура плавления  $\sim 1300$  °C (14)) – пироксен ( $\sim 1200$  °C (Thy, Leshner et al., 1999)) – лешательерит ( $\sim 1700$  °C) – алюмосиликатное стекло ( $\sim 1200$  °C) – полевой шпат ( $\sim 1200$  °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. 5.28 Г). Полученная цветная карта энергодисперсионной спектроскопии и СЭМ снимок матрицы массивного

расплавного импактита свидетельствуют о преобладании в массивном расплавном импактите полевого шпата, что подтверждается данными спектроскопии КРС.

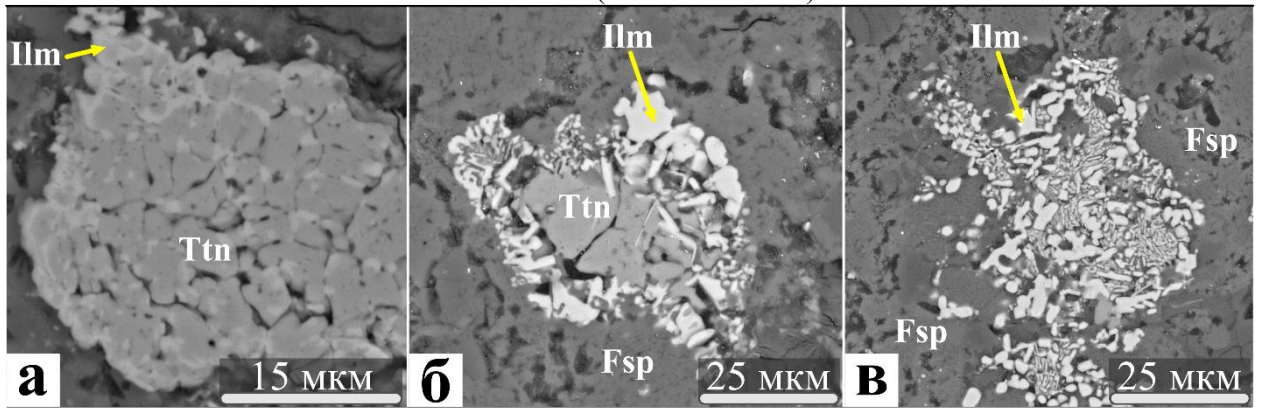
В *расплавных бомбах* выявлено присутствие следующих синимпактных минералов в порядке их солидификации: пироксен – алюмосиликатное стекло – полевой шпат. Необходимо отметить, что анатаз был диагностирован при КРС профилировании полевошпатовой матрицы импактной бомбы, однако, его морфологические особенности не ясны, так как самостоятельные обособления при СЭМ исследованиях не были выявлены. Исследованные бомбы представлены несколькими разновидностями в зависимости от соотношения кристаллической и аморфной компонент, 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. 5.28 Д). В данном случае последовательность их образования, исходя из их морфологических взаимоотношений следующая: пироксен – алюмосиликатное стекло.

*Микрокристаллическая разновидность* практически нацело представлена микрокристаллическим полевым шпатом. В полевошпатовой матрице наблюдается практически полное замещение микрокристаллов пироксена смектитом (рис. 5.28 Е). Данная разновидность характеризуется следующей последовательностью минералообразования из импактного расплава: пироксен (~1200 °C (Thy, Leshner et al., 1999)) – полевой шпат (~1200 °C (Sobolev, Mal'tsev et al., 2021)).

*Смектитовая* разновидность сложна для изучения в связи с интенсивным выветриванием и замещением бомб смектитовой и глинистой компонентой, поэтому последовательность синимпактного минералообразования в ней на данный момент не однозначна и требует более прецизионных исследований (рис. 5.28 И).

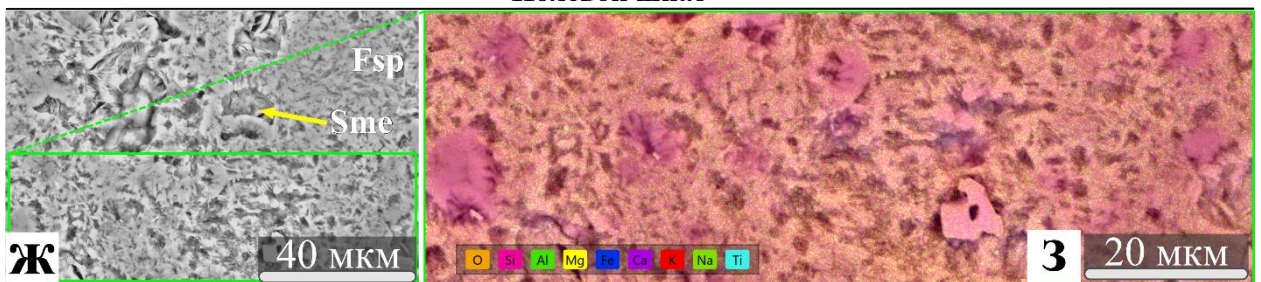
**Ильменит (массивные тела)**



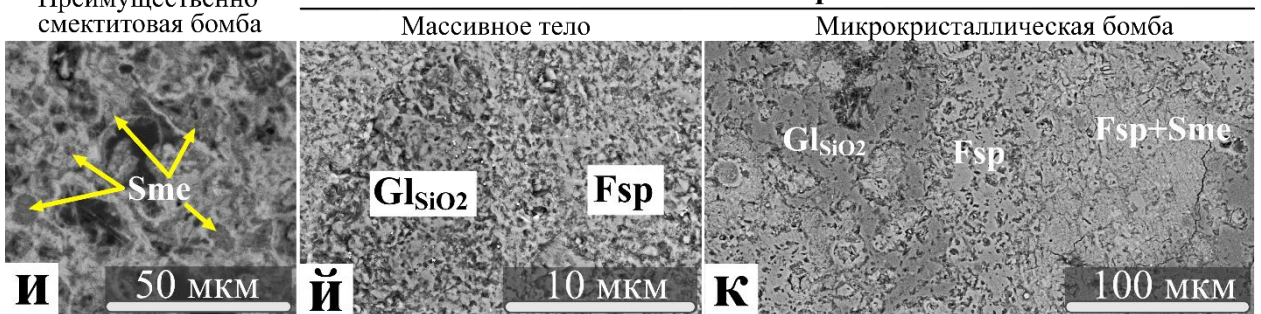
**Пироксены**



**Полевой шпат**



**Лешательерит**



**Рисунок 5.28.** Минералы и стёкла расплавного парастерезиса в массивных телах (Ф-Г, Ж, З, Й) и бомбах (Д, Е, К) Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: Fsp – полевой шпат, Sme – смектит, Px – пироксен, Ttn – титанит, Ilm – ильменит, Grt – гранат. На рисунке 3 – цветная карта распределения элементов по данным ЭДС спектроскопии участка полевошпатовой матрицы (Ж) образца массивного расплавного импактита на р. Анарога.



Для *жильных расплавных импактитов* ранее нами была установлена синимпактная последовательность минералообразования из импактного расплава (Shumilova, Isaenko et al., 2018; Shumilova, Zubov et al., 2020). На текущий момент парагезис минералов дополнен и последовательность минералообразования уточнена:

1 – *циркон (гранулярный)* (здесь и далее по тексту в скобках температура плавления  $\sim 2500$  °C (Nakamori, Ohishi et al., 2017)) встречается на границе реликтовых кристаллов циркона, которые зачастую дезинтегрированы (рис. 5.29 А). 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* ( $\sim 2400-2700$  °C (Kayama, Nagaoka et al., 2018)) присутствует в структуре капель лешательерита в виде идиоморфных удлинённых кристаллов размером до 2 мкм в поперечнике (рис. 5.29 В). В совместной системе с вмещающим коэсит лешательеритом, коэсит согласно пространственным взаимоотношениям и фазовой диаграмме  $\text{SiO}_2$  сформировался раньше стекла;

3 – *лешательерит* ( $\sim 1700$  °C) представлен множеством силикатных капель в структуре алюмосиликатного стекла (рис. 5.29 Б, 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  $\text{SiO}_2$  – смектит;

4 – *смектит* ( $\sim 1600$  °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, Yamada et al., 1992). Специфика нахождения смектита в структуре капель 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. 5.29 Б, В);

5 – *ильменит* ( $\sim 1300$  °C (Habashi, 2016)) часто встречается в структуре алюмосиликатной матрицы. Его разнообразие нахождения представлено тремя

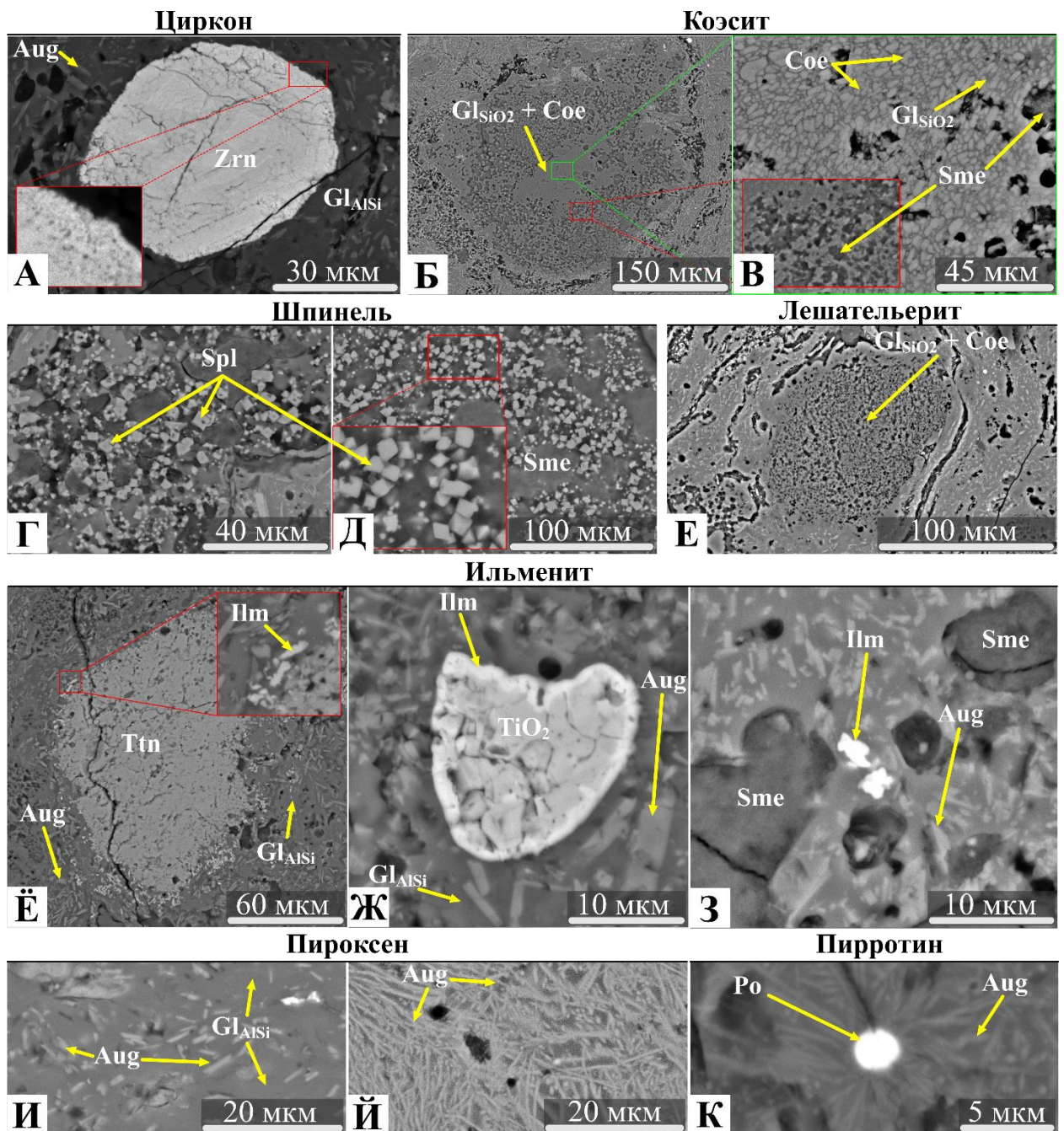
разновидностям: в виде небольших выделений вокруг зёрен титанита (рис. 5.29 Ё), в виде каймы вокруг титанита (рис. 5.29 Ж) и как обособления (рис. 5.29 З). Первые два варианта встречаются наиболее часто. Зачастую вместо титанита встречается фаза  $TiO_2$ , идентификация которой требует применения спектроскопии КРС. Гранулярная морфология данного минерала и тесные пространственные взаимоотношения с вмещающей алюмосиликатной стекловатой матрицей обуславливают его синимпактную природу;

6 – *пироксен (авгит)* ( $\sim 1200$  °C (Thy, Leshner et al., 1999)) в большом количестве распространены в стекле алюмосиликатного состава (рис. 5.29 И, Ё, К). Характер их пространственного взаимоотношения указывает на явное формирование пироксена до солидификации (стеклования) окружающего алюмосиликатного расплава. Игольчатая морфология и микроскопический размер авгита (рис. 5.29 Ё) свидетельствует о быстром росте кристаллов из импактного расплава (рис. 5.29 И);

7 – *алюмосиликатное стекло полевошпатового состава* ( $\sim 1200$ °C) занимает основную часть объёма жильного тела, имеет флюидальную текстуру и отсутствие пористости (рис. 5.29 А, Е, З, И);

8 – *пирротин* ( $\sim 1200$  °C (Nakazawa, Yamada et al., 1992)) встречается относительно редко, имеет округлые очертания и в некоторых случаях обрамляется по периферии кристаллами пироксенов перпендикулярной ориентировки к поверхности пирротина (рис. 5.29 К).

Помимо перечисленных минералов в смектитовых обособлениях среди алюмосиликатной стекловатой основной массы жильных стекол была обнаружена синимпактная шпинель, кристаллы которой имеют идиоморфный октаэдрический облик, размер кристаллов до 2 мкм (рис. 5.29 Г, Д). По данным ЭДС шпинель характеризуется следующим составом (вес. %):  $MgO$  – 16.43%,  $Al_2O_3$  – 60.9%,  $SiO_2$  – 8.4%,  $FeO$  – 16.9%. При этом, точная диагностика разновидности шпинели затруднительна в связи с малыми размерами кристаллов и вероятным искажением состава за счет возможного частичного вклада окружающей матрицы. Принимая во внимание, что диапазон температур шпинели на фазовой диаграмме (Simon, Shearer et al., 2022) довольно широк, на данный момент определить ее положение в последовательности минералообразования не представляется возможным.



**Рисунок 5.29.** 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 – коэсит, Aug – авгит, Ttn – титанит, Pm – ильменит, Zrn – циркон.

В результате комплексных исследований минералов в разновидностях расплавных импактитов Карской астроблемы нами установлено, что парастрезис минералов, образовавшихся непосредственно из импактного расплава в массивных телах и бомбах однообразен и довольно примитивен. В тоже время, жильные тела

характеризуются большим разнообразием синимпактных минералов, образовавшихся из неомогенного импактного расплава. Продукты кристаллизации из импактного расплава обладают крайне малыми размерами кристаллов.

Анализ морфологии и пространственных взаимоотношений минеральных фаз и референтных температур плавления минералов позволил установить последовательность минералообразования для расплавных импактитов Карской астроблемы: 1) в массивных расплавных импактитах: пироксен – алюмосиликатное стекло – полевои шпат; 2) в жильных телах: циркон – коэсит – лешательерит – смектит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло – пирротин; 3) в бомбах: пироксен – алюмосиликатное стекло – полевои шпат.

### **5.5. Особенности силикатной компоненты**

В данном разделе в качестве силикатной компоненты подразумеваются кристаллические и аморфные обособления  $\text{SiO}_2$ , и их полифазные системы, формирование которых теоретически возможно посредством нескольких механизмов:

1) **Кристаллизация расплава  $\text{SiO}_2$ .** Продуктами кристаллизации силикатного расплава в принципе могут быть полиморфные модификации кремнезёма, такие как:  $\alpha$ -кварц,  $\beta$ -кварц,  $\alpha$ -тридимит,  $\beta$ -тридимит,  $\alpha$ -кристобалит,  $\beta$ -кристобалит, коэсит, стишовит. Данные минералы отличаются сингонией, параметрами кристаллической решётки, плотностью, а также термодинамическими условиями формирования. В условиях импактитогенеза, при солидификации силикатного расплава ( $\text{SiO}_2$ ) также могут образовываться минералы из выше приведённого ряда.

2) **Стеклование в результате закалки расплава  $\text{SiO}_2$**  (переохлаждения). Одной из фундаментальных особенностей силикатных расплавов является их способность при быстром охлаждении переходить в стеклообразное состояние. Стеклом в классическом понимании называется аморфное, термодинамически нестабильное, но кинетически устойчивое вещество, образующееся в результате «замораживания» структуры жидкости при снижении температуры (Двухфазные стёкла..., 1991).

3) **Аморфизация в результате твердофазной трансформации  $\text{SiO}_2$ ,** продуктом которой является «диаплектовое стекло». Термин был введен фон

Энгельхардтом и др. (1967) для описания аморфной фазы без пузырьков и структур потока. Диаплектовое стекло образуется в результате воздействия ударных волн на материал мишени, в результате которого разрушается кристаллическая решетка; после сброса давления вещество остается при температуре ниже его точки плавления, при этом данное стекло сохраняет границы зёрен, химический состав и зональность первичного минерала (Engelhardt et al. 1967; Fritz, Assis et al., 2019). В настоящее время имеются работы, посвящённые выявлению и изучению диаплектовых стёкол в природных ударных образованиях (Kieffer, 1971; Diemann et al., 1984; Feldman, 1992; Feldman, Sazonova et al., 2006), а также их созданию и исследованию в лабораторных условиях (Kowitz et al., 2013; Gleason et al., 2017).

Необходимо отметить, что помимо обозначенных выше механизмов образования силикатной компоненты, являющихся основными, в расплавных импактитах присутствуют редкие фрагменты реликтового кремнезема, представленного кварцем из пород мишени.

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. В бомбах обособлений кремнезема не выявлено.

При рассмотрении системы  $\text{SiO}_2$  в расплавных импактитах Карской астроблемы особый интерес представляют жильные тела серого цвета, а также коричневые жильные тела, которые ниже описываются более детально (Зубов, Шумилова и др., 2023).

**Реликтовая обломочная силикатная компонента** в жильных расплавных телах представлена только редкими обломками кварца, неравномерно распределенными в алюмосиликатной матрице альбитового состава, имеет размеры в поперечнике до 100 мкм (рис. 5.30 А). Встречается только в коричневых жильных стеклах.

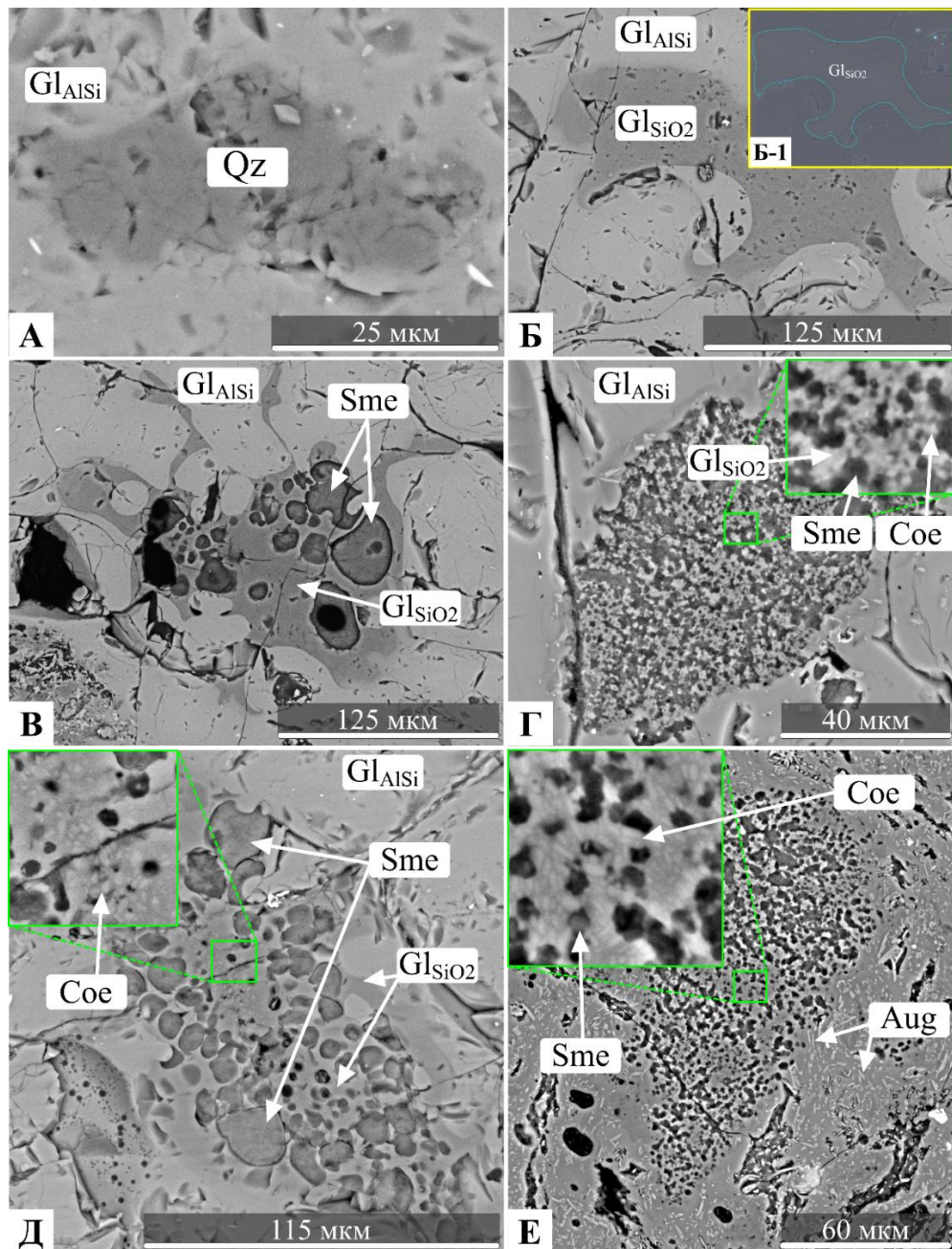
**Расплавная система.** Продукты закалки и частичной кристаллизации силикатного импактного расплава в жильных стеклах представлены тремя ассоциациями:

1) *монофазные расплавные стёкла*  $\text{SiO}_2$  обнаружены только в коричневых жильных стёклах, находятся внутри алюмосиликатной матрицы, имеют сложную

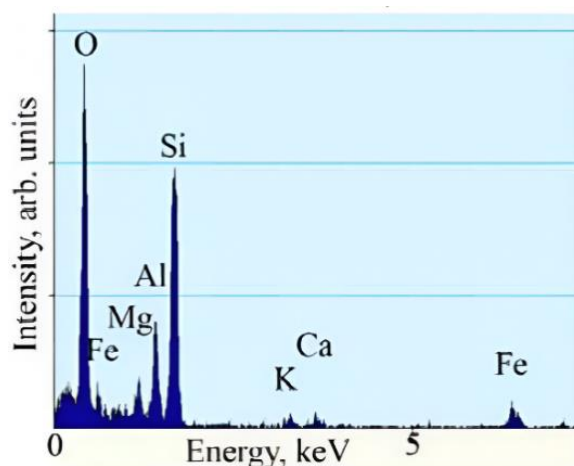
морфологию и микронеоднородности (рис. 5.30 Б). Обособления кремнезёма имеют размеры до 200 мкм в поперечнике, распределены неравномерно, являются относительно редкими;

2) *расплавные ксеноморфные силикатные стёкла с каплевидными включениями смектита* встречаются в жильных коричневых стёклах (рис. 5.30 В). Морфология выделений аналогична таковым в других «каплях» лешательерита с коэситом в серых или коричневых жильных стёклах. Размер до 200 мкм в поперечнике. Выделения смектита размером до 50 мкм имеют округлые и вытянутые каплевидные очертания.

3) *расплавные силикатные стёкла с коэситом и каплевидными выделениями смектита* присутствуют в жильных телах как серого, так и коричневого цвета. В серых жильных телах серого цвета нами установлены обособления расплавных силикатных ( $\text{SiO}_2$ ) стёкол в виде «капель»  $\text{SiO}_2$  с коэситом и смектитом (рис. 5.30 Е) (Shumilova et al., 2017; 2018; 2019). В коричневых стёклах наблюдаются две разновидности – с мелкими выделениями смектита размером до 5 мкм (рис. 5.30 Г) и с крупными выделениями, размером до 40 мкм (рис. 5.30 Д). В обоих случаях смектит ассоциирует со скоплениями мелких кристаллов коэсита в центральной части «капель»  $\text{SiO}_2$ . Вещественный состав смектита в миндалинах силикатных «капель» установлен при помощи метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии: О – 70%, Mg – 2%, Al – 7%, Si – 20%, Ca – 0.5%, Fe – 0.5% (ат. %) (рис. 5.31), а по данным рамановской спектроскопии идентифицирован как монтмориллонит (Shumilova, Zubov et al., 2020).



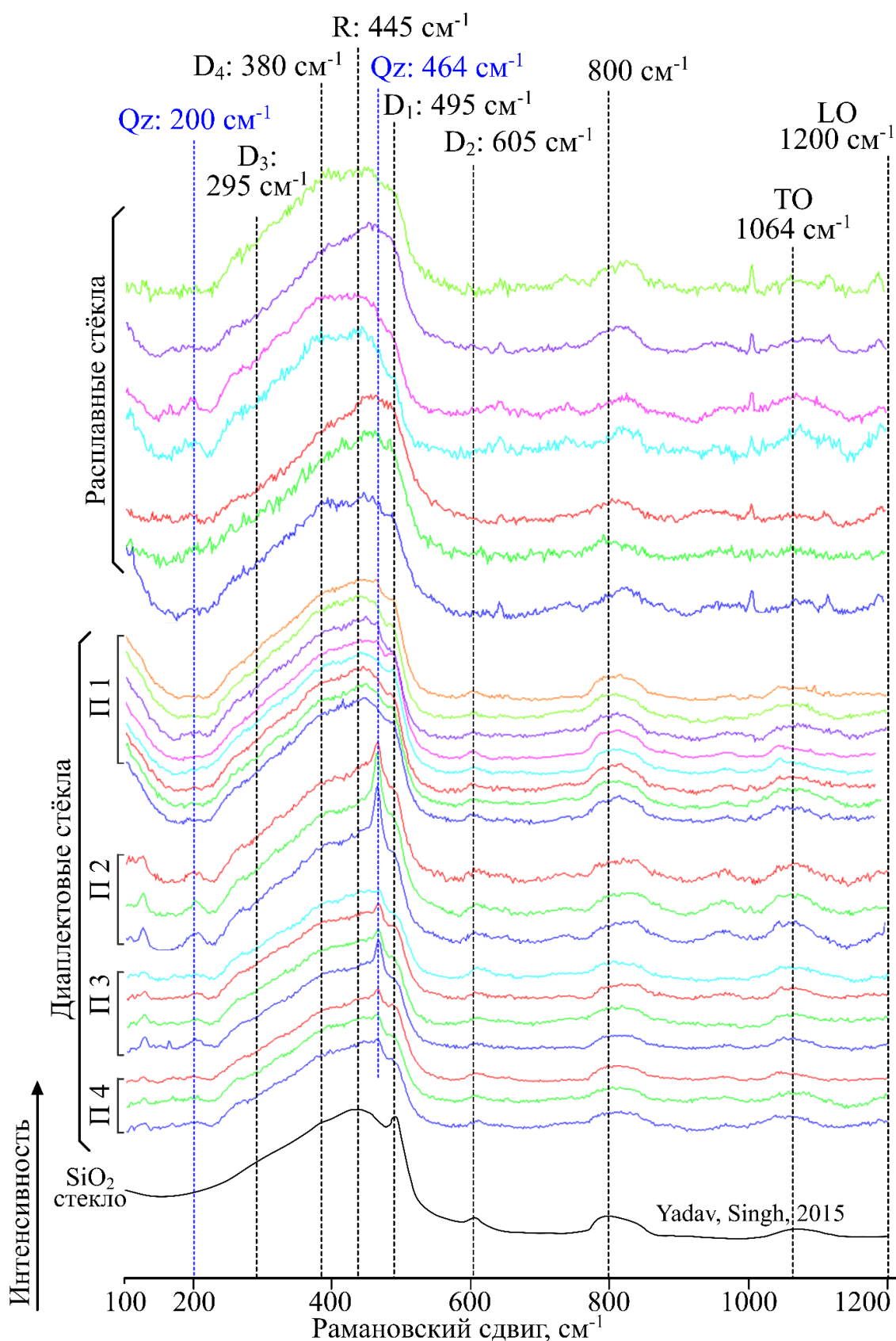
**Рисунок 5.30.** Разновидности силикатной компоненты жильных тел расплавных импактитов Карской астроблемы по данным СЭМ (режим BSE). Условные обозначения: А – реликтовый обломок кварца в алюмосиликатной матрице коричневого стекла, Б – силикатное стекло ( $\text{SiO}_2$ ) в коричневом алюмосиликатном стекле и изображение цветной катодолуминесценции данного стекла (Б-1), В – силикатное стекло ( $\text{SiO}_2$ ) со смектитом в алюмосиликатном коричневом стекле, Г – силикатное стекло с коэзитом и каплевидными образованиями смектита (в коричневом стекле), в правом верхнем углу – увеличенный фрагмент из центральной части основного изображения, Д – пористое силикатное стекло как в предыдущем случае, но с большим размером обособлений смектита, в левом верхнем углу – увеличенный фрагмент из центральной части основного изображения, Е – силикатная капля стекла со скоплениями коэзита и смектитом в сером стекле, в левом верхнем углу – увеличенный фрагмент из центральной части основного изображения,  $\text{Gl}_{\text{AlSi}}$  – алюмосиликатное стекло,  $\text{Gl}_{\text{SiO}_2}$  – силикатное стекло, Coe – коэзит, Sme – смектит, Aug – авгит, Qz – кварц.



**Рисунок 5.31.** Вещественный состав смектита по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (TEM EDX) (Shumilova, Zubov et al., 2020).

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. 5.32). 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. Непосредственно в расплавленном стекле  $\text{SiO}_2$  включения пироксенов по данным СЭМ не регистрируются, однако в окружающей алюмосиликатной матрице выделения пироксена многочисленны (Shumilova et al., 2018; Golubev et al., 2020). В связи с этим, полосы пироксена в анализируемых спектрах силикатного стекла могут возникнуть за счет сигнала от окружающей матрицы алюмосиликатного стекла с микрокристаллами пироксена.





**Рисунок 5.32.** Спектры комбинационного рассеяния света расплавных и диалектовых силикатных стёкол Карской астроблемы, а также референтный спектр стекла  $\text{SiO}_2$ . Условные обозначения: П1-4 – профили рамановской съёмки по разным диалектовым стёклам.

**Твердофазно-расплавная силикатная система** представлена в виде угловатых структур зонального строения в расплавных импактатах в прикраевой (эндоконтактной) зоне жильных тел серого цвета. В центре располагается однородное диаплектовое стекло. Промежуточная зона, представленная кварцем, окаймляет вокруг центральное диаплектовое стекло. Внешняя зона из силикатного расплавного стекла обрамляет зону из кварца (рис. 5.33). Зональное строение обособлений особенно четко проявляется на данных цветной катодолюминесценции – красное свечение стекла в центре и голубовато-белое свечение кварцевой каймы вокруг стекла (рис. 5.33 В). На контакте силикатного диаплектового стекла и кварца встречен агрегат коэсита с системой трещин.

*В центральной части* обособления располагается непосредственно диаплектовое стекло, которое характеризуется однородным строением, не содержит видимых на микроуровне включений других минеральных фаз, что подтверждается данными КР, ЭДС и СЭМ (рис. 5.33 А, рис. 5.32). В некоторых случаях в спектрах КР диаплектового стекла присутствует главная полоса кварца  $464\text{ см}^{-1}$  (рис. 5.32). Иногда по всему обособлению наблюдаются трещины. Данная зона характеризуется красным цветом катодолюминесценции (рис. 5.32 В).

Рамановские спектры получены для четырех обособлений диаплектового стекла в виде профилей с шагом профилирования – 2 мкм (рис. 5.32, П1-4). Наиболее интенсивной является асимметричная полоса в интервале  $200\text{-}500\text{ см}^{-1}$  с положением около  $445\text{ см}^{-1}$ . 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. Выделения кварца, видимо, локализованы в мелких трещинах и имеют то же происхождение, что и кварц промежуточной зоны. Относительная интенсивность линий кварца сильно различается в разных обособлениях и заметно варьирует по профилям. Существенно менее интенсивные широкие полосы присутствуют в диапазонах  $750\text{-}900$  и  $1000\text{-}1100\text{ см}^{-1}$ , максимумы которых, соответственно, приходятся на  $445$ ,  $605$ ,  $800\text{-}820$ ,  $970$ ,  $1064\text{ см}^{-1}$ . Соотношение интенсивностей и форма основных широких полос в целом хорошо выдержаны для разных обособлений, при этом, заметные вариации демонстрирует полоса  $495\text{ см}^{-1}$ .

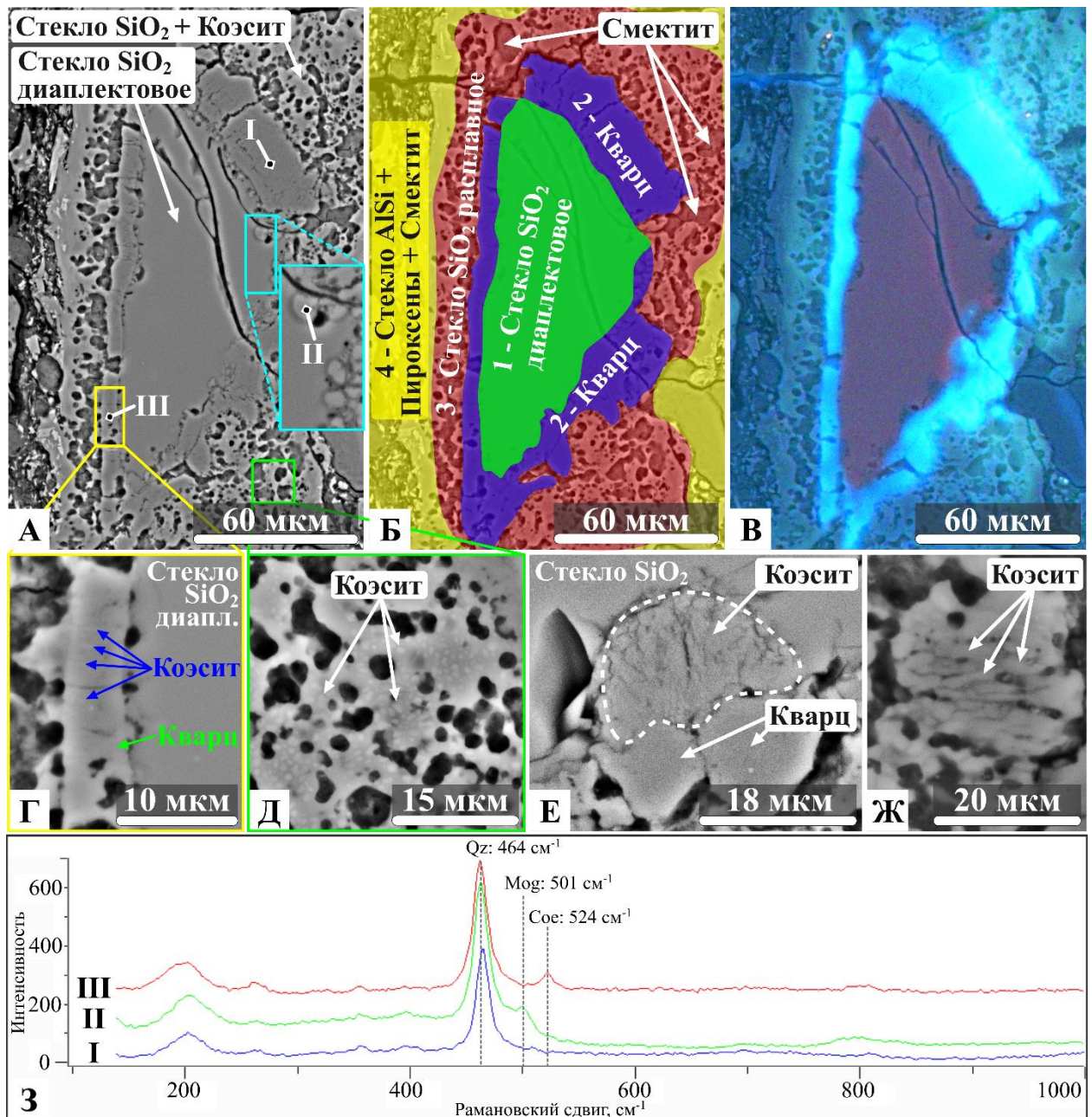
В целом рамановские спектры диаплектового стекла по форме полос и соотношению их интенсивностей очень близки к спектрам синтетического

плавленого 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.

**Промежуточная зона** обособления, окаймляющая центральную зону диаплектового силикатного стекла, согласно спектрам комбинационного рассеяния, является  $\alpha$ -кварцем (рис. 5.33 З). В некоторых участках диагностируется слабоинтенсивная полоса  $504\text{ см}^{-1}$ , которая может быть отнесена к могоаниту (рис. 5.33 З) (Jackson et al., 2016). По совокупным данным СЭМ и КР спектроскопии непосредственно в самом кварце местами фиксируется присутствие мелких кристаллов коэсита размером до  $1\text{ мкм}$  (рис. 5.33 Г), иногда имеющего удлинённую форму (рис. 5.33 Ж). Данная зона имеет ярко выраженное голубовато-белое свечение катодолюминесценции (рис. 5.33 В). В единичном случае на контакте силикатного диаплектового стекла и кварца обнаружено присутствие относительно крупного агрегата коэсита с системой радиальных трещин (рис. 5.33 Е).

**Внешняя зона** обособления представлена силикатным стеклом с коэситом и каплевидными обособлениями (микроминдалинами) смектита (рис. 5.33 Д). Данная зона согласно совокупности морфологических особенностей составляющих ее фаз имеет расплавную природу. Рамановские спектры силикатного стекла в данной зоне получить не удалось вследствие интенсивной люминесценции вызванной, предположительно, включениями смектита.

Подобные сложные силикатные образования с зональной структурой были обнаружены ранее в тектитах Муонг-Нонг (Masotta et al., 2020), в которых центральное стекло содержит коэсит, а кварцевая кайма была интерпретирована как реликтовая, однако генетическая природа данной каймы не была раскрыта. В нашем рассматриваемом случае кварцевая кайма имеет радиально-лучистое строение (халцедон), силикатное диаплектовое стекло в центральной части, судя по спектрам КР, не содержит коэсита. Наличие внешней зоны с расплавленным стеклом указывает на то, что в данном случае диаплектовое стекло с поверхности претерпело частичное плавление. Таким образом, в данном случае мы наблюдаем пространственно-близкорасположенное положение двух типов силикатных стекол.

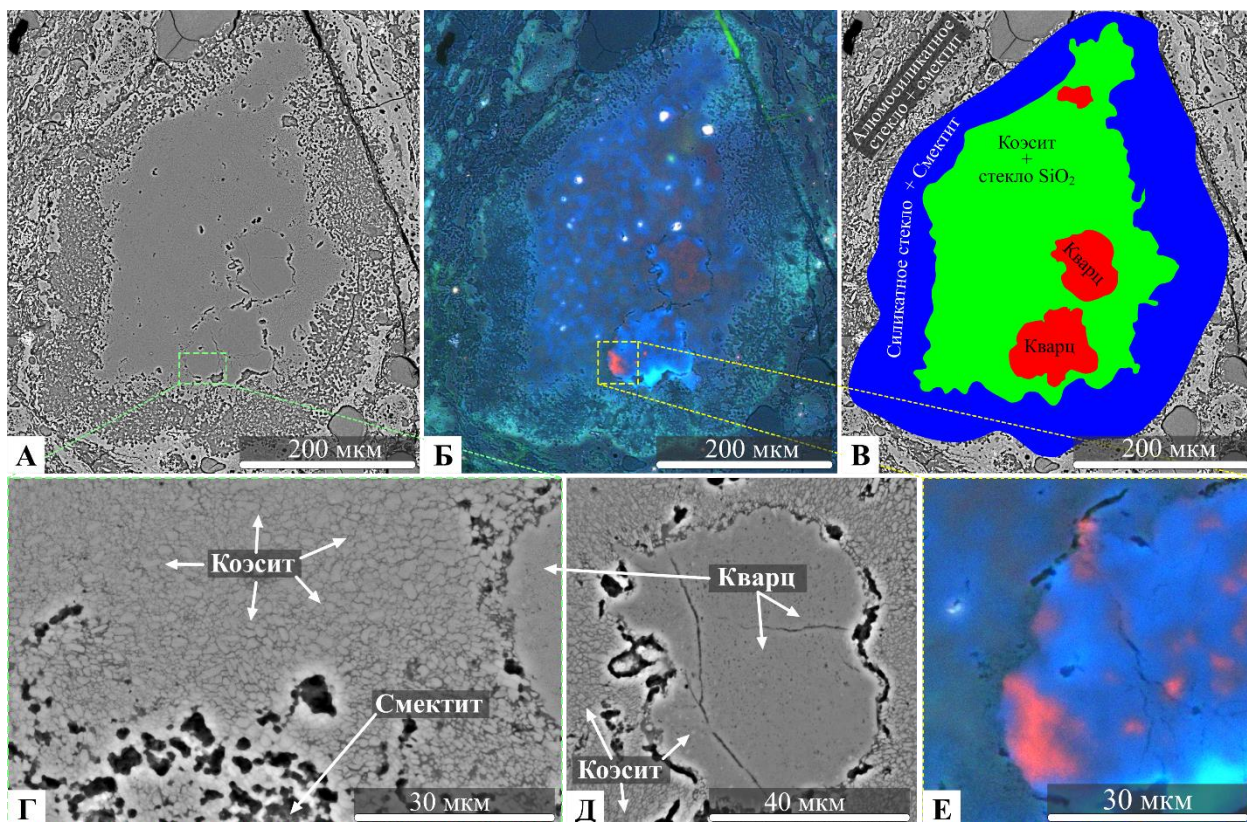


**Рис. 5.33.** Сложное зональное силикатное обособление с диаплектовым стеклом в центральной части (1), халцедоновой промежуточной зоной (2), расплавленным стеклом во внешней зоне (3) и зоной алюмосиликатного стекла с пироксенами и смектитом (4) из жильного расплавленного импактита Карской астроблемы: А – комплексное силикатное обособление (СЭМ (режим BSE)), Б – схема зональности обособления, В – изображение цветной катодолуминесценции, Г – мелкие включения коэсита в кварце переходной зоны (увеличенный фрагмент СЭМ изображения на рис А), Д – коэсит в расплавленном силикатном стекле из внешней зоны силикатного обособления (увеличенный фрагмент СЭМ изображения на рис А), Е – крупное обособление коэсита на контакте диаплектового силикатного стекла и кварцевой каймы (по данным СЭМ), Ж – удлинённые кристаллы коэсита (по данным СЭМ), З – спектры КР кварца (I), кварца с могонитом (II) и кварца с коэситом (III).

В экспериментальной работе (Kowitz et al., 2013), посвящённой получению диаплектового силикатного стекла при разных давлениях отмечается сохранение главной полосы кварца  $464 \text{ см}^{-1}$  (при снятии давления), которая с возрастанием давления смещается в низкочастотную область спектра. Согласно данным Ковиц и Гюльдемайстера в нашем случае полностью аморфизованный прекурсор соответствует ударному давлению  $> 36 \text{ ГПа}$ , демонстрируя при этом наличие главной кварцевой полосы  $464 \text{ см}^{-1}$ . Причину этого на данный момент выяснить невозможно и можно лишь предположить, что наличие данной полосы в позиции  $464 \text{ см}^{-1}$  является, по всей видимости, результатом сохранения локальных реликтовых мотивов структуры исходного кварца в диаплектовом стекле.

*Силикатное сложное обособление проблемного генезиса* обнаружено в ходе исследований жильных стёкол серого цвета, которое ранее в расплавных массивных телах и бомбах не встречалось.

В структуре прожилка данное силикатное образование расположено ближе контактовой области с вмещающим зювитом, в то время как силикатные «капли» стекла с коэситом и смектитом распределены в центральной части прожилка. Обособление представлено скоплением кристаллов коэсита с псевдомозаичной текстурой (рис. 5.34, рис. 5.34 Г). Кристаллы коэсита угловатые, размером до  $2 \text{ мкм}$ . В данном скоплении присутствует несколько обломков кварца, диагностированного методом КРС, который, судя по его угловатой морфологии и наличию трещиноватости, является реликтовым. При этом, в самом кварце местами также отмечается присутствие коэсита, идентифицируемого по наличию полосы  $521 \text{ см}^{-1}$ . Цветная катодолюминесценция данного обособления показывает красновато-голубое свечение кварцевых обломков и пятнистое красновато-синеватое свечение коэситового скопления (рис. 5.34 Б, Е).



**Рисунок 5.34.** Силикатное обособление с плотным скоплением коэсита в центральной части, реликтами кварца и пористой зоной со смектитом вокруг в алюмосиликатной матрице жильного расплавного тела серого цвета. Условные обозначения: А – общий вид силикатного обособления по данным СЭМ (режим BSE), Б – общий вид по данным цветной катодоллюминесценции, В – схема силикатного обособления (для А), Г, Д – увеличенные области с коэситом и кварцевым реликтом по данным СЭМ (режим BSE), Е – увеличенная область на границе коэсита (слева) и реликтового кварца (справа) по данным цветной катодоллюминесценции.

### Спектроскопическая характеристика диаплектовых и расплавных силикатных стёкол

Референтный спектр комбинационного рассеяния силикатного стекла (Suprasil) раскладывается на следующие компоненты (рис. 5.35 В). Бозонный пик  $\sim 50 \text{ см}^{-1}$ , который характерен для аморфного состояния вещества (Ando, Benzine et al., 2018; Courtens et al., 2002; Чмель и др., 2011). В нашем случае бозонный пик не исследован, поскольку использованный в работе рамановский спектрометр не позволяет работать с диапазоном частот менее  $100 \text{ см}^{-1}$ . Согласно Хендерсон Г.С. и др. (Henderson et al., 2009), низкочастотная область спектра силикатного стекла состоит из широкой R-полосы  $\approx 445 \text{ см}^{-1}$ , которая относится к симметричному

растяжению мостикового кислорода, связанного с 6- и более членными кольцами  $\text{SiO}_4$ , полосы  $D_1 \approx 495 \text{ см}^{-1}$ , относящейся к колебаниям мостиковых атомов кислорода в 4-членных кольцах  $\text{SiO}_4$ , а также полосы  $D_2 \approx 605 \text{ см}^{-1}$ , соответствующей колебаниям мостиковых атомов кислорода в трёхчленных кольцах  $\text{SiO}_4$ .  $D_1$  и  $D_2$  называют полосами «дефектов». Согласно М. Члигуи с соавторами дополнительно выделяются полосы  $D_3 \approx 295 \text{ см}^{-1}$  и  $D_4 \approx 380 \text{ см}^{-1}$ , где  $D_3$  относится к ножничной моде кремнекислородного тетраэдра, а полосы  $D_4$  и  $465 \text{ см}^{-1}$  соотносятся с модой изгиба в многочленных кольцах  $\text{SiO}_4$  (Chligui et al., 2010). Среднечастотная область содержит полосу  $\approx 750\text{--}850 \text{ см}^{-1}$ . В высокочастотной области присутствуют полосы ТО (поперечно-оптические фононы)  $\approx 1060 \text{ см}^{-1}$  и LO (продольно-оптические фононы)  $\approx 1200 \text{ см}^{-1}$ .

В ходе исследования получены спектры КР для 7 локальных точечных измерений в однофазных расплавных силикатных стёклах без смектита и коэсита из коричневого жильного тела (рис. 5.32). Спектроскопия диаплектовых стёкол произведена в нескольких силикатных обособлениях в виде профилей по нескольким точкам с шагом профилирования – 2 мкм (рис. 5.32 П1-4). В качестве референтного использован спектр синтетического стекла (Suprasil).

*Спектры КР силикатных диаплектовых и расплавных стёкол* из жильных расплавных импактитов в сравнении с референтными спектрами силикатных стёкол демонстрируют аналогичную широкую R-полосу  $445 \text{ см}^{-1}$ , а также отсутствуют полосы  $D_3$  ( $295 \text{ см}^{-1}$ ),  $D_4$  ( $380 \text{ см}^{-1}$ ).

Полученные спектроскопические данные двух разных по механизму формирования стёкол аналогичны по следующим спектроскопическим характеристикам:

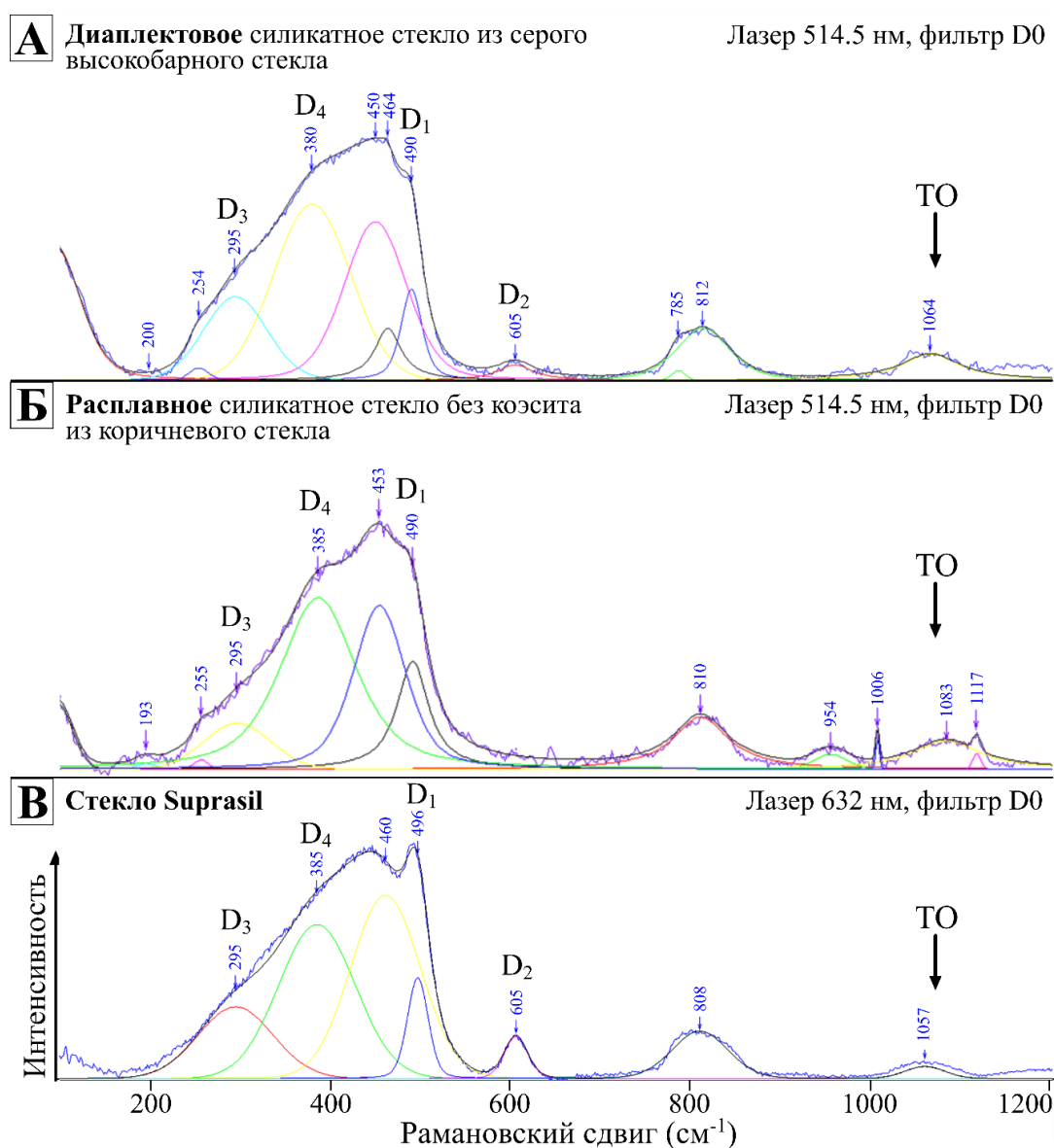
1) высокая степень полимеризации проявляется в спектрах высоким отношением сумм площадей низкочастотной области спектра ( $A_{500}$ ) к сумме площадей высокочастотной области ( $A_{1000}$ ). Силикатные стёкла характеризуются малыми значениями сумм площадей высокочастотной области спектра ( $A_{1000}$ ) (Colomban, Tournie et al., 2006);

2) присутствие в обоих случаях широкой асимметричной R-полосы  $450 \text{ см}^{-1}$ , характеризующей моду изгиба связи Si-O-Si по (Chligui et al., 2010);

3) аналогичная интенсивность полос  $D_3$  и  $D_4$ , относящихся к ножничной моде и моде изгибания связи Si-O-Si соответственно по (Chligui et al., 2010);

4) наличие полосы  $800\text{ см}^{-1}$  соответствующей колебаниям в тетраэдре  $\text{SiO}_4$  по (Yoshida et al., 2018).

Различие спектроскопических характеристик данных стёкол заключается в том, что диалектовые стёкла характеризуются постоянным присутствием полосы  $D_2$ , соответствующей колебаниям трехчленных колец  $\text{SiO}_4$ , а полоса  $D_1$ , отвечающая колебаниям четырехчленных колец  $\text{SiO}_4$ , проявлена более интенсивно чем в расплавных.



**Рис. 5.35.** Разложенные на компоненты спектры комбинационного рассеяния света диалектового силикатного стекла (А), расплавного силикатного стекла без коэсита (Б) и синтетического эталона стекла  $\text{SiO}_2$  (В) (Suprasil).



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  $\text{SiO}_2$ ). Структура стекла полностью полимеризована, т. е. четыре атома кислорода всех тетраэдров  $\text{SiO}_4$  являются мостиковыми ( $Q_4$ ). 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.). Референтный спектр комбинационного рассеяния силикатного стекла раскладывается на следующие компоненты (рис. 5.35в). Бозонный пик  $\sim 50 \text{ см}^{-1}$ , который характерен для аморфного состояния вещества (Courtens et al., 2002). 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  $D_3 \approx 295 \text{ см}^{-1}$  и  $D_4 \approx 380 \text{ см}^{-1}$ , которые относятся к широкой R-полосе (Chligui et al., 2010). Различие в ширине основной полосы и наличие  $D_3$ - и  $D_4$ -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  $D_1$  и  $D_2$  (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; Mysen, Richet, 2018). Такие колебания иногда называют «дыхательными» («breathing»). Интересно, что в рамановских спектрах

диаплектового стекла эти полосы в разной степени всегда проявляются, в то время, как в расплавленном силикатном стекле коричневых тел они не обнаруживаются.

Широкие полосы в области  $800\text{ см}^{-1}$ ,  $1060$  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 расплавленного 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 с конфигурации  $Q^4$ . Кроме того, как уже было отмечено выше, во всех спектрах диаплектового стекла и некоторых спектрах расплавленного стекла наблюдается малоинтенсивная полоса  $970\text{ см}^{-1}$ , которая может быть связана с валентными колебаниями группы – Si-OH или  $Q^3(\text{OH})$  (Paleari, 2000; Kalampounias et al., 2006; Mysen, Richet, 2018).

Анализ полученных данных показывает, что сравниваемые диаплектовое и расплавленное стекла в жильных телах Карской астроблемы 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 расплавленных всегда содержат малоинтенсивные полосы  $D_1$  и  $D_2$ , отвечающие за колебания в четырех- и трёхчленных кольцах  $\text{SiO}_4$ . Кроме того, в диаплектовых стеклах весьма часто наблюдается основная диагностическая полоса кварца ( $464\text{ см}^{-1}$ ), отражающая присутствие реликтовых структурных элементов исходного кварца. В целом, наблюдаемые различия в спектрах диаплектовых и расплавленных стекол можно объяснить различными условиями стеклообразования, согласно фазовой диаграмме состояния  $\text{SiO}_2$  (Mysen, Richet, 2018) расплавленные образуются при существенно более высоких температурах и давлении – порядка  $2500\text{-}2700\text{ °C}$  и  $4\text{-}8\text{ ГПа}$ .

## 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 криптокристаллической 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, пирротинном. 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.

## Список литературы

1. Анфилогов В.Н., Быков В.Н., Осипов А.А. Силикатные расплавы. // Отв. ред. С.Л. Вотяков. Институт минералогии УрО РАН. – М.: Наука, 2005. – 357 с. – ISBN 5-02-032893-6.
2. Афанасьев В.П., Похиленко Н.П. Попигайские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий // Инноватика и экспертиза: научные труды. – 2013. – № 1(10). – С. 8-15.
3. Афанасьев В.П., Угапьева С.С., Елисеев А.П., Громилов С.А., Павлушин А.Д. Якутиты – импактные алмазы попигайской астроблемы // Руды и металлы. – 2019. – № 2. – С. 30-37.
4. Багрий И.Д. Гидрогеоструктурные особенности формирования месторождений углеводородов импактных структур на примере Болтышской астроблемы // Геологический журнал. – 2017. – № 2. – С. 5-34.
5. Бадюков Д.Д. Воздействие ударных волн на основные типы породообразующих минералов // Метеоритика. – 1986. – № 45. – С. 122-130.
6. Бадюков Д.Д. Экспериментальное моделирование ударного метаморфизма породообразующих минералов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук // МГУ. – М. – 1987. – 18 с.
7. Баклунд О.О. Общий обзор деятельности экспедиции братьев Кузнецовых на Полярном Урале в 1909 г. // Записки Императорской Академии наук. Сер. 8. – 1911. – Т.28. – №1. – 128 с.
8. Березин С.С. Фазовые равновесия в системах Fe - S, Ga - S и синтез сульфидов галлия и железа с использованием галогенидов  $FeX_2$  ( $X \neq F$ ) и  $GaI_3$  // Диссертация на соискание учёной степени кандидата химических наук.
9. Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ // М.: Недра. – 1985. – 200 с.
10. Витязь П.А., Сенють В.Т., Жорник В.И., Валькович И.В., Парницкий А.М., Ковалева С.А., Афанасьев В.П. Синтез наноструктурного алмаз-лонсдейлитного инструментального композита для абразивной обработки // Актуальные вопросы машиноведения. – 2019. – Т. 8. – С. 352-356.

11. Вишневский С.А., Маслов М.А., Пальник Н.А., Пономарев Г.Я. Коэсит в породах Карской структуры // ДАН СССР. – 1977. – Т. 232. – №2. – с. 446-448.
12. Вишневский С.А., Афанасьев В.П., Пальчик Н.А., Аргунов К.П. Импактные алмазы. Особенности, происхождение и значение. – Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1997. – 53 с.
13. Вишневский С.А. Астроблемы // Новосибирск: Нонпарель. – 2007. – 288 с.
14. Геологический словарь: в трех томах / Гл. ред. О.В. Петров. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб: ВСЕГЕИ, 2010.
15. Глазовская Л.И. Условия плавления циркона в импактном процессе // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле : Двадцать вторая международная конференция. Материалы конференции, Москва, 27 сентября 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук. – 2021. – С. 66-69.
16. Глазовская Л.И. Рингвудит из пемз района Эль Гаско (Эстремадура, Испания) / Л.И. Глазовская, Н.В. Трубкин // Доклады РАН. – Т. 405. – № 3. – 2005. – С. 385-388.
17. Глазовская Л.И., Щербаков В.Д. Высокобарные модификации минералов в импактитах логойского кратера // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле. Материалы Девятнадцатой международной конференции. – 2018. – С. 69-71.
18. Глазовская Л.И., Щербаков В.Д. Особенности образования высокобарных фаз при ударном метаморфизме // Материалы X-ой Всероссийской петрографической конференции с международным участием "Петрология магматических и метаморфических комплексов". – Томск. – 2018. – С. 51-60.
19. Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатилов О.А. Конденсатные стекла кратера Жаманшин. I. Иргизиты // Петрология. – 2016. – 24. – С. 3-24. – DOI: 10.7868/S0869590315060023.
20. Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатилов О.А. Конденсатные стекла кратера Жаманшин. II. Жаманшиниты // Петрология. – 2017. – Т. 25. – № 1. – С. 3-25.

21. Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатиков О.А. Сравнение состава и микроструктуры импактных стекол на примере Земли (Кратер Жаманшин) и Луны (АС «Луна-16, -20, -24») // Петрология. – 2019. – Т. 27. – №1. – С. 105-119.
22. Горностаева Т.А., Мохов А.В., Рыбчук А.П., Карташов П.М., Богатиков О.А. Высокотемпературный импактный конденсат кратера Лонар (Индия) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 494. № 1. – С. 33-38. – DOI: 10.31857/S268673972009008X.
23. Граханов С.А. Алмазы импактного генезиса в россыпях северо-востока Сибирской платформы // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2001. – №12.
24. Гурович Ж.Г. Водосодержащие стекла Карского взрывного кратера. Проблемы геологии Тимано-Североуральского сегмента литосферы/РАН. УрО. Коми научный центр. Институт геологии. – Сыктывкар. – 1993.– С. 12.
25. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение / (О.В. Мазурин, Г.П. Роскова, В. И. Аверьянов, Т. В. Антропова); Отв. ред. Б. Г. Варшал; АН СССР // Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова. – Ленинград : Наука : Ленинградское отделение. – 1991. – 275 с.
26. Езерский В.А. Ударно-метаморфизованное углистое вещество в импактитах // Метеоритика. – 1982. – № 41. – С. 134-140.
27. Езерский В.А. Гипербарические полиморфы, возникшие при ударном преобразовании углей. Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1986. – Ч. СХV. – Вып. 1. – С. 26-33.
28. Енокян В.С., Зенченко М.С., Водолазский В.Н., Ящук В.И. Новое о строении Усть-Карской депрессии на Пай-Хое // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока Европейской части СССР. – Сыктывкар, 1970. – № 6. – С. 238-242.
29. Зархидзе Д.В., Пискун П.П., Красножен А.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Вайгачско-Пайхойская. Листы R-41-XXVIII, XXIX (Усть-Кара). Объяснительная записка. // М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ». – 2017. – 180 с.



30. Зубов А.А. Структурно-текстурные особенности зювитов и тагамитов Карской астроблемы по данным вычислительной микротомографии // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 27-й научной конференции. Сыктывкар: Геопринт. – 2018а. – С. 58-61.

31. Зубов А.А., Шумилова Т.Г. Возможности рентгеновской вычислительной микротомографии в изучении зювитов Карской астроблемы // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018б. – С. 97-98.

32. Зубов А.А., Шумилова Т.Г., Исаенко С. И. Применение беспилотного летательного аппарата в геологической экспедиции на территории Карской астроблемы // Материалы 20-й научной конференции "Геолого-археологические исследования в Тимано-Североуральском регионе". Сыктывкар, 26 октября 2017 г. – 2017. – С. 28-31.

33. Зубов А.А. Сравнительная минералого-петрохимическая характеристика тагамитов и жильных импактных стекол Карской астроблемы (бассейн р. Кара, Пай-Хой, Россия) // Человек и окружающая среда (Электронный ресурс): IX Всероссийская молодежная научная конференция, посвященная 100-летию Республики Коми (22–24 апреля 2021 г., г. Сыктывкар) : сборник докладов : текстовое научное электронное издание на компакт-диске / отв. ред. Ю. Н. Шабалина; отв. за выпуск В. В. Мазур / Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Сыктыв. гос. ун-т им. Питирима Сорокина». – Электрон. текстовые дан. (4,5 Мб). – Сыктывкар: Изд-во СГУ им. Питирима Сорокина. – 2021.

34. 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.

35. Зубов А.А. Разнообразие структур расплавных импактитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) // Материалы докладов IV Всероссийской (XIX) молодежной научной школы-конференции «Молодежь и наука на Севере – 2022». Том I. Сыктывкар. – 2022. – С. 108-109. – DOI: 10.19110/89606-042

36. Зубов А.А. Сравнительная характеристика геохимии трёх типов расплавленных импактитов карской астроблемы (предварительные данные) // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 31-й научной конференции. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2022. – С. 50-52.
37. Зубов А.А., Шумилова Т.Г. Синимпактное минералообразование в расплавленных импактитах Карской астроблемы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. (в печати)
38. Зубов А.А., Шумилова Т.Г., Исаенко С.И. Сравнительная характеристика диаплектовых и расплавленных силикатных стёкол Карской астроблемы // Вестник геонаук. – 2023. (в печати)
39. Импактиты. Под ред. А.А. Маракушева // М.: Изд-во МГУ. 1981. 240 с. 10.
40. Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя. Ред. В.Л. Масайтис // Л.: Наука. – 1990. – 185 с.
41. Инструкция НСАМ № 50-Х. Определение закиси железа объёмным бихроматным методом // М.: ВИМС. – 1966. – 12 с.
42. Инструкция НСАМ № 138-Х. Ускоренные химические методы определения породообразующих элементов // М.: ВИМС. – 1976. – 58 с.
43. Иорданский, Н.Н. Следы мезозойской вулканической деятельности на Пай-Хое // Палеонтология и стратиграфия. – 1933. – Сб. 1. – Новосибирск. – С. 2-3.
44. Исаенко С.И., Макеев Б. А., Шумилова Т. Г. Особенности исследований структурно-фазового состояния импактных стекол Карской астроблемы // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – № 3. – С. 26-31.
45. Исаенко С.И. Рамановское картирование минеральных фаз УНРНТ-стекол Карского метеоритного кратера (Пай-Хой, Россия) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения–2020): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2020. – С. 335.
46. Кашкаров Л.Л., Назаров М.А., Калинина Г.В., Лоренц К.А., Кононкова Н.Н. (2000). Распределение урана в импактных стеклах Карской и Болтышской ударных структур // Москва, Вестник ОГГТГН РАН. – 2000. – Т. 2. – № 2. – Вып. 12.

47. Корочанцев А.В. Ударное преобразование битумов: приложение к органическому веществу метеоритов и импактитов // Диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. – М.: ГЕОХИ РАН. – 2004. – 179 с.
48. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Божежа Д.Н., Прилуков В.В. Результаты оценки перспектив нефтегазоносности участков расположения импактных структур частотно-резонансным методом обработки данных дистанционного зондирования Земли // Геоинформатика. – 2016. – № 1. – С. 5-21.
49. Литвинов Б.В. Избранные труды / Рос. акад. наук, Рос. федер. ядер. центр – ВНИИ техн. физики им. акад. Е. И. Забабахина; отв. ред. В.Б. Литвинов. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. – 647 с.: ил. – (Памятники отечественной науки. XX век). – Библиогр. в конце ст. – Имен. указ.: С. 595-599. – Список трудов авт.: С. 600-647.
50. Лысюк А.Ю. Фульгуриты и их роль в формировании минералогического облика литосферы // Теория, история, философия и практика минералогии : материалы IV международного минералогического семинара, Сыктывкар, Республика Коми, 17-20 мая 2006 г. – Сыктывкар : Геопринт. – 2006а. – С. 51-53.
51. Лысюк А.Ю., Юргенсон Г.А., Юшкин Н.П. Фульгуриты – новый тип электроатмогенных геологических образований // Литосфера. – 2006б. – № 3. – С. 125-140.
52. Лысюк А.Ю. Петрофульгуриты: электроатмогенная дифференциация вещества // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. – 2009. – 5. – С. 14-17.
53. Лютоев В.П., Лысюк А.Ю. Структура и текстура кремнезема импактитов Карской астроблемы // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2015. – № 9. С. 24-32.
54. Лютоев В.П. Спектроскопические маркеры Карского импактного события // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы VII Всероссийской молодежной научной конференции (Екатеринбург, 29-31 октября, 2015). – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН. – 2015. – С. 73-76.

55. Мальков Б.А. Купроаурид в жильных тагамитах Карской астроблемы / Б.А. Мальков, В.Н. Филиппов // Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы IV Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт. – 2006.
56. Мальков Б.А., Андреичев В.Л. Алмазоносные тагамиты Карской астроблемы // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2010. – №3.
57. Максименко Н.И., Зубов А.А., Шумилова Т.Г., Ковальчук Н.С. Сравнительный анализ кластогенных и жилоподобных импактных стекол в зювитах Карской астроблемы // Сборник тезисов докладов VII Российской молодёжной научно-практической школы «Новое в познании процессов рудообразования», ИГЕМ РАН, 13–17 ноября 2017.
58. Максименко Н. И., Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С. Геолого-минералогические особенности разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой) // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Сыктывкар: Геопринт. – 2017. – С. 262-263.
59. Максименко Н.И. Сравнительный анализ структурно-вещественных особенностей разновидностей зювитов Карской астроблемы // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 27-й научной конференции. Сыктывкар: Геопринт. – 2018. – С. 121-124.
60. Максименко Н.И., Шумилова Т.Г., Ковальчук Н.С. Своеобразие обломочной компоненты разновидностей зювитов Карской астроблемы // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – С. 189-190.
61. Максименко Н.И. Структурно-вещественные особенности матрикса разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой). Материалы X Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН. – 2019а. – № 10. – С. 150-151.

62. Максименко Н.И. Геологическая позиция и геоморфологические особенности разновидностей зювитов Карской астроблемы. Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 28-й научной конференции 26–28 ноября. – Сыктывкар: Геопринт. – 2019б.
63. Максименко Н.И. Структурно-текстурные и петрохимические особенности зювитов на р. Саяха (Карская астроблема, Россия) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. – 2020а. – № 11. – С. 169-171.
64. Максименко Н.И. Сравнительный анализ вещественного состава литокластов разновидностей зювитов и пород мишени Карской астроблемы // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2020): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2020б. – С. 341-342.
65. Максименко Н.И. Структурно-текстурные особенности и вещественный состав зювитов на р. Путью (Карская астроблема) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2020): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2020в. – С. 343-344.
66. Максименко Н.И. Сравнительный анализ структурно-текстурных особенностей и вещественного состава литоидной компоненты зювитов р. Путью и предполагаемого протолита (Карская астроблема) // 29-я Всероссийская научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента» г. Сыктывкар. – 2020г. – С. 41-45.
67. Максименко Н.И., Шумилова Т.Г., Ковальчук Н.С. Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия). Петрология. 2020. – № 5. – DOI: 10.31857/S0869590320050039.
68. Максименко Н.И. Минералого-петрохимические особенности матрикса зювитов Карской астроблемы (р. Саяха и р. Путью) // Человек и окружающая среда: сборник докладов IX Всероссийской молодёжной научной конференции, посвященной 100-летию Республики Коми. Сыктывкар: Изд-во СГУ им. Питирима Сорокина. – 2021а. – С. 23-28.

69. Максименко Н.И. Сравнительный анализ структурно-вещественных особенностей литокластов зювитов р. Саяха и предполагаемого протолита (Карская астроблема, Пай-Хой) // Петрология и геодинамика геологических процессов: Материалы XIII Всероссийского Петрографического совещания (с участием зарубежных ученых). Иркутск Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. – 2021б. – В 3-х томах. – Т. 2. – С. 130-132.

70. Максименко Н.И., Шумилова Т.Г., Уляшев В.В. Структурно-текстурные и петрохимические особенности зювитов р. Большая Вануйта (Карская астроблема, Пай-Хой) // Материалы IV Всероссийской (XIX) молодежной научной школы-конференции «Молодежь и наука на Севере – 2022». В 2-х томах. Том I. Сыктывкар, ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. – 2022. – С. 117-118. – DOI 10.19110/89606-042.

71. Максименко Н.И., Шумилова Т.Г., Ковальчук Н. С. Сравнительный анализ структурно-текстурных и петрохимических особенностей литокластов зювитов р. Большая Вануйта и пород мишени Карской астроблемы // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2022): Материалы российской конференции с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2022. – С. 204-205.

72. Масайтис В.Л. Алмазы в импактитах Попигайского метеоритного кратера / В.Л. Масайтис, С.И. Футергендлер, М.А. Гневушев // ЗВМО. – 1972. – Ч. 101. – Вып. 1. – С. 108-112.

73. Масайтис В.Л. Геологические последствия падений кратерообразующих метеоритов / М.: Недра. – 1973. – 18 с.

74. Масайтис В.Л. Некоторые древние метеоритные кратеры на территории СССР / В.Л. Масайтис // Метеоритика. – 1974. – Вып. 33. – С. 64-68.

75. Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С. Геология астроблем. Л.: Недра. – 1980. – 231 с.

76. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шафрановский Г.И. Алмазоносные импактиты Попигайской астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. – 1998. – 179 с.

77. Масайтис В.Л., Гневушев М.А., Шафрановский Г.И. Минеральные ассоциации и минералогические критерии генезиса астроблем // Зап. ВМО. – 1979. – Ч.108. – Вып.3. – С. 257-273.
78. Масайтис В.Л., Райхлин А.И., Селивановская Т.В. Импациты и импактные брекчии // Классификация и номенклатура метаморфических горных пород: Справочное пособие. Новосибирск: ОИГТМ СО РАН. – 1992. – С.168-187.
79. Маслов М.А. Верхнемезозойские вулcano-тектонические структуры областей активизации крайнего северо-востока европейской части СССР // Эволюция вулканизма в истории Земли. – М. – 1973. – С. 213-215.
80. Маслов М.А. Генезис палеогеновых магм одной из структур северо-востока европейской части СССР // Геодинамика вулканизма и гидротермального процесса. – Петропавловск-Камчатский. – 1974. – С. 28-29.
81. Маслов М.А. О происхождении Карской депрессии // Метеоритика. – 1977. – № 36. – С. 123-130.
82. Мащак М.С. Морфология и внутреннее строение Карской и Усть-карской астроблем. В кн.: Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя. Л.: Наука. – 1990. – С. 37-55.
83. Мащак М.С. Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя, Л. – 1990. – С. 24-37.
84. Мохов А.В., Рыбчук А.П., Горностаева Т.А., Карташов П.М. Конденсационный процесс при импакте // Минералы: строение, свойства, методы исследования. – 2020. – № 11. – С. 195-197.
85. Мохов А.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М. (и др.). Самородный кобальт из реголита Моря Кризисов // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 491. № 2. – С. 42-45. – DOI: 10.31857/S268673972004012X.
86. Мохов А.В., Карташов П.М., Горностаева Т.А. (и др.). Электронная микроскопия в изучении лунного реголита // Кристаллография. – 2021. – Т. 66. – № 4. – С. 610-618. – DOI 10.31857/S0023476121040147.
87. Микляев А.С. Импактные алмазы Карской астроблемы // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: Материалы Всерос. совещ. Сыктывкар: Геопринт. – 2001. – С. 160-162.

88. Назаров М.А. Геохимические свидетельства крупных ударных событий в геологической истории Земли // Докторская диссертация. Москва. – 1995. – 50 с.
89. Наумов М.В. Основные закономерности постимпактного гидротермального процесса // *Астрономический вестник*. 1996. Т. 30. № 1. С. 25-32.
90. Наумов М.В., Ляхницкая В.Д., Яковлева О.А. Сульфидная минерализация в Попигайской импактной структуре // *Докл. РАН*. – 2004. – Т. 399. – N 5. – С. 665-670
91. Нерович Л.И., Ильченко В.Л., Каулина Т.В., Базай А.В., Кунаккузин Е.Л., Мудрук С.В., Борисенко Е.С., Сосновская М.А. Первая находка псевдотахилитовой брекчии и другие признаки ударного метаморфизма в породах обрамления массива Ярва-варака (Мончегорский рудный район) // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. – 2020. – № 17. – С. 384-389. – DOI 10.31241/FNS.2020.17.073.
92. Петровский А.П., Анищенко Ю.В., Федченко Т.А., Ганженко Н.С. Оболонская астроблема – интегральная геолого-геофизическая модель нетрадиционных резервуаров как новый объект нефтегазопоисковых работ // *Геофизика*. – 2015. – № 2. – С. 61-68.
93. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание третье, исправленное и дополненное. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. – 2009. – 200 с.
94. Пономарева Т.А., Шумилова Т.Г. Магнитная характеристика пород восточной и юго-восточной части Карской астроблемы (Пай-Хой) // *Материалы конференции: Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать вторая международная конференция*. Москва. – 2021. – С. 209-212.
95. Рысюков И.А. Молодые вулканические образования Пай-Хоя / И.А. Рысюков // *Проблемы Арктики*. – 1939. – № 9. – С. 30-48.
96. Сазонова Л.В., Никишина Н.Н. Связь внутреннего строения и условий залегания плавленых стекол Карского метеоритного кратера // *Космохимия метеоритов, Луны и планет*. – Киев: Наук. думка. – 1980. – С. 45-55.
97. Сазонова Л.В., Милявский В.В., Бородина Т.И., Соколов С.Н., Жук А.З. Ударный метаморфизм плагиоклаза и амфибола (экспериментальные данные) // *Физика Земли*. – 2007. – № 8. – С. 90-96.



98. Селивановская Т.В., Мащак М.С., Масайтис В.Л. Импактные брекчии и импактиты Карской и Усть-Карской астроблем / Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя. – Л. – 1990. – С. 55-96.

99. Сергиенко Е.С., Цельмович В.А., Попов В.В., Драбкина Е.А., Цибульская А.Е., Петров И.Н. Микроструктура, состав и магнитные свойства зювитов Карской астроблемы // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: материалы международного семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород. – Санкт-Петербург: Петродворец. – 2010. – С. 227-233.

100. Сергиенко Е.С., Янсон С.Ю., Костеров А.А., Харитонский П.В. Микровключения в иргизитах астроблемы Жаманшин (Казахстан) // Минералогические музеи - 2019. Минералогия вчера, сегодня, завтра : Материалы конференции, посвященной 200-летию кафедры минералогии Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, 17–19 сентября 2019 года / Санкт-Петербургский государственный университет, Всероссийское Минералогическое общество. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет. – 2019. – С. 172-174.

101. Сергиенко Е.С., Янсон С.Ю., Левицкий И.А., Папко Л.Ф. Импактные стекла. Первые эксперименты по физическому моделированию // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества - взгляд в будущее : Сборник статей II Международной научно-технической конференции. В 3-х томах, Минск, 11–12 декабря 2019 года. Том 2. – Минск: Белорусский государственный технологический университет. – 2020. – С. 179-182.

102. Сергиенко Е.С., Костеров А.А., Янсон С.Ю., Харитонский П.В., Карпинский В.В., Левицкий И.А., Папко Л.Ф. Магнитные свойства и структурно-фазовый состав искусственных аналогов импактных образований астроблемы Жаманшин // Инновационные силикатные и тугоплавкие неметаллические материалы и изделия: свойства, строение, способы получения : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 03 декабря 2020 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет. – 2020а. – С. 27-33.

103. Сергиенко Е.С., Костеров А.А., Сухаржевский С.М., Никитина А.В., Янсон С.Ю., Левицкий И.А., Папко Л.Ф., Харитонский П.В., Крехов А.К.

Формирование железосодержащей фазы в синтетических аналогах импактных расплавов // Минералы: строение, свойства, методы исследования. – 2020б. – № 11. – С. 263-265.

104. Сергиенко Е.С., Янсон С.Ю., Левицкий И.А., Папко Л.Ф. Получение искусственных аналогов импактных стекол // Химическая технология и техника : Материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января – 12 2022 года / Отв. за издание И.В. Войтов. – Минск: Белорусский государственный технологический университет. – 2022. – С. 69-71.

105. Соболев Н.В. Коэсит как индикатор сверхвысоких давлений в континентальной литосфере // Геология и геофизика. – 2006. – № 47(1). – С. 95-104.

106. Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов. - Л.: Недра, 1983. - 159 с.

107. Тимонин Н.И. Импактные кратеры на Пай-Хое, Урал // Уральский геологический журнал. – 2006. – Т. 53. – № 5. – С. 3-20.

108. Термический анализ минералов и горных пород. – Л.: Недра. – 1974. – 399 с. Авт.: В.П. Иванова, Б.К. Касатов, Т.Н. Красавина, Е.Л. Розина.

109. Угапьева С.С., Молотков А.Е., Громилов С.А., Афанасьев В.П., Павлушин А.Д., Елисеев А.П., Попов В.И. Особенности текстуры и структуры якутитов из россыпей Анабарского алмазоносного района // Записки Российского минералогического общества. – 2022. – Т. 151, № 1. – С. 15-28. – DOI: 10.31857/S0869605522010105.

110. Удоратин В.В., Конанова Н.В., Попов И.В. Глубинное строение Карской кольцевой структуры // Известия Коми научного центра УРО РАН. – 2010. – № 4 (4).

111. Уляшев В.В., Шумилова Т.Г., Кульницкий Б.А., Пережогин И.А., Бланк В.Д. Наноструктурные особенности углеродных полифазных агрегатов апоугольных продуктах импактного метаморфизма // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН № 8. Сыктывкар. – 2018а. – С. 26-33. – DOI: 10.19110/2221-1381-2018-8-26-33

112. Уляшев В.В. Особенности полифазных апоугольных веществ Карской астроблемы // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского

сегмента: Материалы 27-й научной конференции. – Сыктывкар: Геопринт. – 2018б. – С. 222-225.

113. Уляшев В.В., Шумилова Т.Г., Исаенко С.И., Кульницкий Б.А., Пережогин И.А., Бланк В.Д. Преобразование наноструктуры стеклоуглерода под воздействием короткоимпульсного лазерного излучения // Сборник тезисов докладов II Международной конференции молодых ученых, работающих в области углеродных материалов. – Москва, Троицк. – 2019. – С. 274-276.

114. Уляшев В.В., Шумилова Т.Г., Исаенко С.И. Характеристика стекол в продуктах экспериментального моделирования импактных расплавов // Стекло и керамика. – 2023. – Т. 96. – № 5. – С. 14–22. – DOI: 10.14489/glc.2023.05.pp.014-022.

115. Уляшев В.В. Импактные углеродные вещества Карской астроблемы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – 2021.

116. Устрицкий В.И. Мезозойские отложения, кайнотипные лавы и туфобрекчии Пай-Хоя / В.И. Устрицкий // Труды Института геологии Арктики. – 1953. – Т. 72. – Вып. 4. – С. 3-13.

117. Фельдман В.И. Петрология импактитов. – М: Издательство МГУ. – 1990. – 299 с.

118. Фельдман В.И., Сазонова Л.В., Козлов Е.А. Высокобарические полиморфные модификации некоторых минералов в импактитах: геологические наблюдения и экспериментальные данные // Петрология. – 2007. – Т. 15. – № 3. – С. 241-256.

119. Фельдман В.И., Глазовская Л.И. Импактитогенез: учебное пособие. М.: КДУ. – 2018. – 151 с.

120. Цельмович В.А. Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества: проблемы структурирования, упорядочения и эволюции структуры. Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар, 4-7 июня 2012 г. Геопринт. – 2012. – С. 343-345.

121. Цельмович В.А., Сергиенко Е.С., Долотов А.В., Попов В.В., Сапожников А.В., Смирнов Р.В. Магнитные минералы Карской астроблемы // Материалы международной школы-семинара «Проблемы палеомагнетизма и

магнетизма горных пород» Санкт-Петербург, Петергоф 8 – 12 октября 2012 г. – СПб: СОЛО. – 2012.

122. Чмель А.Е., Смирнов А.Н., Шашкин В.С. Фракционные колебания на нанотрещинах в стеклообразном SiO<sub>2</sub> по данным рамановского исследования // Физика твердого тела. – 2001. – Том 43. – Вып. 5.

123. Шайбеков Р.И., Уляшева Н.С., Хубанов В.Б., Исаенко С.И., Тропников Е.М., Игнатьев Г.В. Метагаббро-долериты центральной части Карской депрессии (Ненецкий автономный округ, Россия): влияние импактного события и U-Pb (LA-ICP-MS) возраст // Геохимия. – 2023а. – Т. 68. – № 4. – С. 379-394.

124. Шайбеков Р.И., Уляшева Н.С., Тропников Е.М., Игнатьев Г.В. Петрогеохимическая характеристика позднедевонских метагаббро-долеритов Карской астроблемы (Ненецкий автономный округ, Россия) // Петрология. – 2023б. – Т. 31. – № 4. – С. 419-435.

125. Шишкин М.А., Шкарубо С.И., Молчалова Е.В., Маркина Н.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Южно-Карская. Лист R-41. Объяснительная записка. СПб, ВСЕГЕИ. – 2012.

126. Штырляева А.А., Журавлев А.В., Герасимова А.И. Перспективы и проблемы использования компьютерной микротомографии для изучения образцов ядра // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2016. – №1.

127. Шумилова Т.Г. Карская астроблема - алмазная кладовая // Природное геологическое наследие Европейского Севера России: Материалы Всероссийской научной конференции. Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 17–18 октября 2017. Сыктывкар: Геопринт. – 2017. – С. 106-107.

128. 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

129. Шумилова Т.Г., Зубов А.А., Исаенко С.И. Ликвация в ультравысокобарном импактном расплаве // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018):

Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – С. 68-69.

130. Шумилова Т.Г., Зубов А.А. Карская астроблема - уникальный модельный объект для изучения импактитов // Природное геологическое наследие Европейского Севера России: Материалы Всероссийской научной конференции. Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 17–18 октября 2017. Сыктывкар: Геопринт, – 2017. – С. 104-105.

131. Шумилова Т.Г., Исаенко С.И., Макеев Б.А., Зубов А.А. Признаки ликвации импактного расплава в ультравысокобарных условиях // Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО». СПб. – 2017. – Т.2. – С. 355.

132. Шумилова Т.Г., Исаенко С.И., Макеев Б.А., Зубов А.А. Проявления стекол жильного типа в импактитах Карской астроблемы, Пай-Хой // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Сыктывкар: Геопринт. – 2017. – С. 245.

133. Юдин В.В. Тектоника Карской впадины (Северо-Восточный Пай-. Хой) // В сб.: “Шарьирование и геологические процессы”. Изд. Института геологии Уфимского НЦ РАН. Уфа. – 1992. – С. 55-66.

134. Юшкин Н.П., Маслов М.А., Микляев А.С. Цеолиты (ломонтит, анальцит) Карской кольцевой депрессии на Пай-Хое и их парагенезис // Минералы и парагенезисы минералов горных пород : Сборник статей. Л.: Наука, Ленингр. отделение. – 1976. – Ч. 105. – Вып. 8. – С. 71-76.

135. Юшкин Н.П., Лысюк А.Ю. Сценарий и основные параметры Карского импактного события // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2001. – № 8. – С. 14-17.

136. Юшкин Н.П. Аллогенные бомбы – новый тип импактных структур // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2001. – № 8. – С. 17.

137. Afanasiev V., Pokhilenko N., Eliseev A., Gromilov S., Ugapieva S., Senyut V. Impact Diamonds: Types, Properties and Uses // In: Glagolev S. (eds) 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). ICAM 2019. Springer Proceedings in

Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. – 2019. – DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0\_41.

138. Ahrens T.J., Petersen C.F., Rosenberg J.T. Shock compression of feldspars // *Journal of Geophysical Research*. – 1969. – 74(10). – P. 2727–2746. – DOI: 10.1029/jb074i010p02727.

139. Allaby M. *A Dictionary of Geology and Earth Sciences*. – 2020. – DOI: 10.1093/acref/9780198839033.001.0001.

140. Ando M.F., Benzine O., Pan Z. et al. Boson peak, heterogeneity and intermediate-range order in binary SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses // *Sci Rep*. – 2018. – 8. – 5394. – DOI: 10.1038/s41598-018-23574-1.

141. Arndt J., Hummel W., Gonzalez-Cabeza I. Diaplectic labradorite glass from the manicouagan impact crater. *Phys Chem Minerals*. – 1982. – 8. – P. 230–239. – DOI: 10.1007/BF00309482.

142. Avril C., Malavergne V., Caracas R., Zanda B., Reynard B., Charon E., Bobocioiu E., Brunet F., Borensztajn S., Pont S., Tarrida M., Guyot F. Raman spectroscopic properties and Raman identification of CaS-MgS-MnS-FeS-Cr<sub>2</sub>FeS<sub>4</sub> sulfides in meteorites and reduced sulfur-rich systems // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2013. – 48(8). – P. 1415–1426.

143. Badjukov D.D., Nazarov M.A., Suponeva I.V. Impact glasses from the Kara and Ust-Kara structures // *Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. – 1989. – V. 20, P. 36.

144. Badyukov D.D., Bezaeva N.S., Rochette P., Gattacceca J., Feinberg J.M., Kars M., Egli R., Raitala J., Kuzina D.M. Experimental shock metamorphism of terrestrial basalts: Agglutinate-like particle formation, petrology, and magnetism // *Meteorit Planet Sci*. – 2018. – 53. – P. 131-150. – DOI: 10.1111/maps.13006.

145. Badyukov D.D. High-pressure phases in impactites of the Zhamanshin crater (USSR) // *XVI Lunar and Planetary Science Conference, Houston*. – 1985. – P. 21–22.

146. Becker M., de Villiers J., Bradshaw D. The Mineralogy and Crystallography of Pyrrhotite from Selected Nickel and PGE Ore Deposits // *Economic Geology*. – 2010. – 105(5). – P. 1025–1037. – DOI: 10.2113/econgeo.105.5.1025.

147. Benoit P.H., Sears D.W.G. The breakup of a meteorite parent body and the delivery of meteorites to Earth // *Science*. – 1992. – 255. – P. 1685–1687.

148. Mysen B.O., Finger L.W., Virgo D., Seifert F.A. Curve-fitting of Raman spectra of silicate glasses // *American Mineralogist* 1982; 67 (7-8): 686–695.
149. Mysen B., Richet P. *Silicate Glasses and Melts* / 2nd Edition. – 2018. – 720 p.
150. Block K.M. Fulgurite classification, petrology, and implications for planetary processes // Master's Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ, USA. – 2011.
151. Buchwald V.F. *The Mineralogy of Iron Meteorites* // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1977. – 286(1336). – P. 453-491. – DOI: 10.1098/rsta.1977.0127.
152. Buddhue J.D. Some Meteoritic Iron Sulfides // *Contributions of the Society for Research on Meteorites*. – 1945. – 3. – P. 217-220. – DOI: 10.1111/j.1945-5100.1945.tb00053.x.
153. Campanale F., Mugnaioli E., Folco L., Gemmi M., Lee M.R., Daly, L., Glass B.P. Evidence for subsolidus quartz-coesite transformation in impact ejecta from the Australasian tektite strewn field // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – DOI: 10.1016/j.gca.2019.08.014.
154. Campanale F., Mugnaioli E., Gemmi M., Folco L. The formation of impact coesite // *Sci Rep*. – 2021. – 11(1):16011. – DOI: 10.1038/s41598-021-95432-6.
155. Carter E.A., Hargreaves M.D., Kee T.P., Pasek M.A., Edwards H.G. A Raman spectroscopic study of a fulgurite // *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. – 2010 Jul 13. – 368(1922). – P. 3087-3097. – DOI: 10.1098/rsta.2010.0022.
156. Cesare B., Nestola F., Johnson T. et al. Garnet, the archetypal cubic mineral, grows tetragonal // *Sci Rep*. – 2019. – 9. – 14672. – DOI: 10.1038/s41598-019-51214-9.
157. Chao E.C.T., Shoemaker E.M., Madsen B.M. First Natural Occurrence of Coesite // *Science*. – 1960. – 132. – P. 220-222. – DOI: 10.1126/science.132.3421.220.
158. Chao E.C.T. Pressure and temperature histories of impact metamorphosed rocks – based on petrographic observations // B.M. French and N.M. Short (eds.). *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Baltimore: Mono Book Corp. – 1968. – P. 135-158.
159. Chao E.C.T. Shock effects in certain rock-forming minerals // *Science*. – 1967. – V. 156(3772). – P. 192—202.

160. Chiara E., Jiangzhi C., David G., Reto G. Mineralogical and compositional features of rock fulgurites: A record of lightning effects on granite // *American Mineralogist*. – 2017. – 102. – P. 1470-1481. – DOI: 10.2138/am-2017-5971.
161. Chen M., Sharp T., El Goresy A., Wopenka B., Xiande X. (1996). The High-Pressure Assemblage Majorite-Pyrope Solid Solution + Magnesio-wustite: A New Constraint on the High Pressure and Temperature History of Shock Melt Veins in Chondrites. – 27. – 211.
162. Chen M., Xiao W., Xie X. Coesite and quartz characteristic of crystallization from shock-produced silica melt in the Xiuyan crater // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2010. – 297(1-2). – P. 306–314. – DOI: 10.1016/j.epsl.2010.06.032.
163. Chligui M., Guimbretière G., Canizarès A., Matzen G., Vaills Y., Simon P. New features in the Raman spectrum of silica: key-points in the improvement on structure knowledge. – URL: [hal.archives-ouvertes.fr/hal-00520823](http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00520823).
164. Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences // *Contr. Mineral. and Petrol.* – 1984. – 86. – P. 107–118. – DOI: 10.1007/BF00381838.
165. Cicconi M.R., Neuville D.R. *Natural Glasses* // Springer Handbook of Glass. Springer. – 2019. – P.771-812. – DOI: 10.1007/978-3-319-93728-1\_22.
166. Clayton A., Irvine S., Barrioz V., Zoppi G., Forbes I., Brooks W. A Feasibility Study towards Ultra-Thin PV Solar Cell Devices by MOCVD Based on a p-i-n Structure Incorporating Pyrite. – 2023. – P. 21-24.
167. Coes L. A New Dense Crystalline Silica // *Science*. – 1953. – 118. – P. 131-132. – DOI: 10.1126/science.118.3057.131.
168. Colomban P., Tournie A., Bellot-Gurlet L. Raman identification of glassy silicates used in ceramics, glass and jewellery: a tentative differentiation guide // *J. Raman Spectrosc.* – 2006. – 37. – P. 841-852. – DOI: 10.1002/jrs.1515.
169. Colomban P. Polymerization degree and Raman identification of ancient glasses used for jewelry, ceramic enamels and mosaics // *Journal of Non-crystalline Solids*. – 2003. – 323. – P. 180-187.
170. Courtens E., Yamanaka A., Inoue K. Nature of the Boson peak of silica glasses from hyper-Raman scattering. *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2002. – V. 307-310. – P. 87-91. – DOI: 10.1016/S0022-3093(02)01444-8.



171. De Man B., Nuyts J., Dupont P., Marchal G., Suetens P. Metal streak artifacts in X-ray computed tomography: a simulation study // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1999. – 46. – P. 691-696.
172. Diaz-Martinez E., Sanz-Rubio E., Fernandez C., Martinez-Friaz J. Evidence for a Small Meteorite Impact in Extremadura (W. Spain) // *Abstracts of 6 ESF-Impact Workshop (Granada, 2001).* – P. 21-22.
173. Diemann E., Arndt J. (1984). Diaplectic labradorite glass from the manicouagan impact crater: II. X-ray diffraction studies and structural model // *Physics and Chemistry of Minerals.* – 1984. – 11(4). – P. 178-181. – DOI: 10.1007/bf00387849.
174. Dressler B.O., Reimold W.U. Terrestrial impact melt rocks and glasses // *Earth Science Reviews.* – 2001. – 56. – P. 205-284.
175. Dressler B.O., Weiser T., Brockmeyer P. Recrystallized impact glasses of the Onaping Formation and the Sudbury Igneous Complex, Sudbury Structure, Ontario, Canada // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1996. – 60. – P. 2019-2036.
176. Engelhardt W.V., Arndt J., Stöffler D. et al. Diaplektische Gläser in den Breccien des Ries von Nördlingen als Anzeichen für Stoßwellenmetamorphose // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 1967. – 15. – P. 93-102. – DOI: 10.1007/BF01167216.
177. Engelhardt W.V. Shock produced rock glasses from the Ries crater // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 1972. – 36(4). – P. 265-292. – DOI: 10.1007/bf00444336.
178. Ernstson K., Mayer W., Neumair A., Rappenglueck B., Rappenglück M., Sudhaus D., Zeller K. The Chiemgau Crater Strewn Field: Evidence of a Holocene Large Impact Event in Southeast Bavaria, Germany // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* – 2010. – Vol. 1. – P. 72-103.
179. Faulques E., Fritsch E., Ostroumov M. Spectroscopy of natural silica-rich glasses // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences.* – 2005. – 96. – P. 120-128. – DOI: 10.2465/jmps.96.120.
180. Feldman V.I. Diaplectic transformation of minerals; Vorotilov drill core, Puchezh-Katunki impact crater, Russia // *LPI Contribution.* – 1992. – 790. – P. 25.

181. Feldman V.I., Sazonova L.V., Kozlov E.A. Shock metamorphism of some rock-forming minerals: Experimental results and natural observations // *Petrology*. – 2006. – 14(6). – P. 540-566. – DOI: 10.1134/s0869591106060038.
182. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // *Phil Trans R Soc Lond A*. – 2004. – 362. – P. 2477-2512.
183. French B.M. *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute LPI Contribution. – 1998. – 954.
184. French B.M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth-Science Reviews*. 2010. – 98. – P. 123-170.
185. Fritz J., Assis Fernandes V., Greshake A., Holzwarth A., Böttger U. (2019), On the formation of diaplectic glass: Shock and thermal experiments with plagioclase of different chemical compositions // *Meteorit Planet Sci*. – 2019. – 54. – P. 1533-1547. – DOI: 10.1111/maps.13289.
186. Fu X., Wang A., Krawczynski M. J. Characterizing amorphous silicates in extraterrestrial materials: Polymerization effects on Raman and mid-IR spectral features of alkali and alkali earth silicate glasses // *J. Geophys. Res. Planets*. – 2017. – 122. – P. 839-855. – DOI: 10.1002/2016JE005241.
187. Gleason A.E., Bolme C.A., Lee H.J., Nagler B., Galtier E., Kraus R.G., Mao W.L. Time-resolved diffraction of shock-released SiO<sub>2</sub> and diaplectic glass formation. *Nature Communications*. – 2017. – 8(1). – DOI: 10.1038/s41467-017-01791-y.
188. Golubev Ye. A., Shumilova T.G., Isaenko S.I., Makeev B.A., Utkin A.A., Suvorova E.I., Ernstson K. Nano-heterogeneity of natural impact silica-rich glasses according to atomic force microscopy and spectroscopy data // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2018a. – V. 500. – P. 388-400. – DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2018.08.031.
189. Golubev Ye. A., Shumilova T.G. and Isaenko S.I. Structure of natural impact glasses by microscopic data // *Scanning Probe Microscopy. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018b. – 443. – 012008. – P. 1-7. – DOI: 10.1088/1757-899X/443/1/012008.

190. Golubev Ye.A., Shumilova T.G., Isaenko S.I. Structure of natural impact glasses on AFM data / Scanning Probe Microscopy // Abstract Book of International Conference. Ekaterinburg, Ural Federal University. – 2018B. – P. 61.
191. Golubev Ye.A., Shumilova T.G., Isaenko S.I. Microscopic investigation of nanoscale coesite crystals in ultra-high pressure silica glass from impactites. Scanning Probe Microscopy. Russia-China Workshop on Dielectric and Ferroelectric Materials // Abstract Book of Joint International Conference (Ekaterinburg, August 25-28, 2019) Ekaterinburg, Ural Federal University. – 2019. – P. 28.
192. Golubev Y.A., Shumilova T.G., Isaenko S.I., Radaev V.A., Utkin A.A., Makeev B.A., Ernstson K. Microscopic studies of ultra-high pressure glasses from impactites of the Kara astrobleme // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2020. – 534. – 119951.
193. Gornostaeva T.A., Mokhov A.V., Kartashov, P.M., Bogatikov O.A. Comparison of the Compositions and Microstructures of Terrestrial and Lunar Impact Glasses: Samples from the Zhamanshin Crater and Luna 16, 20, and 24 Missions // Petrology. – 2019. – 27(1). – P. 95-107. – DOI: 10.1134/s0869591119010028.
194. Grieve R.A.F., Masaitis V.L. The economic potential of terrestrial impact craters // Internat. Geol. Rev. – 1995. – 36. – P. 105-151.
195. Grieve R.A.F., Langenhorst F., and Stöffler D. Shock metamorphism of quartz in nature and experiments II: Significance in geoscience // Meteoritics & Planetary Science. – 1996. – 31. – P. 6-35.
196. Gucsik A., Koeberl C., Brandstätter F., Libowitzky E., Zhang M. Infrared, Raman, and cathodoluminescence studies of impact glasses // Meteoritics & Planetary Science. – 2004. – 39. – P. 1273-1285. – DOI: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00946.x.
197. Habashi F. Ilmenite for pigment and metal production // Interdiscip J Chem. – 2016.
198. Hamann C., Fazio A., Ebert M., Hecht L., Wirth R., Folco L., Deutsch A., Reimold W.U. Silicate liquid immiscibility in impact melts // Meteoritics & Planetary Science. – 2018. – DOI: 10.1111/maps.12907.
199. Han C., Chen M., Rasch R., Yu Y., Zhao B. Structure Studies of Silicate Glasses by Raman Spectroscopy // In: Reddy, R.G., Chaubal, P., Pistorius, P.C., Pal, U. (eds) Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International

Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016. Springer, Cham. – 2016. – DOI: 10.1007/978-3-319-48769-4\_18.

200. Hanna R.D., Ketcham R.A. X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies // *Chemie der Erde – Geochemistry*. – 2017. – 77(4). P. 547-572.

201. Hemley R.J., Mao H.K., Bell P.M., Mysen B.O. Raman Spectroscopy of SiO<sub>2</sub> Glass at High Pressure // *Physical Review Letters*. – 1986. – 57(6). – P. 747-750. – DOI: 10.1103/physrevlett.57.747.

202. Henderson G.S. The structure of silicate melts: a glass perspective // *The Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43. – P. 1921-1958. – DOI: 10.2113/gscanmin.43.6.1921.

203. Henderson G., Neuville D., Cochain B., Cormier L. The Structure of GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Glasses and Melts: A Raman Spectroscopy Study // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2009. – 355. – P. 468-474. – DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.01.024.

204. Hounsfield G.N. Computerized transverse axia scanning (tomography). Part 1: Description of system. *British Journal of Radiology*. – 1973. – 46. – P. 1016-1022. – DOI: 10.1259/0007-1285-46-552-1016.

205. Hsieh J. *Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances*. Second ed. SPIE John Wiley & Sons Inc., Bellingham, Washington Hooken, New Jersey. – 2009.

206. Ivanda M., Clasen R., Hornfeck M., Kiefer W. Raman spectroscopy on SiO<sub>2</sub> glasses sintered from nanosized particles. *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2003. – 322. – P. 46-52. – DOI: 10.1016/S0022-3093(03)00172-8.

207. Isaenko S.I., Shumilova T.G. Raman mapping of mineral phases within UHPHT vein impact glass of the giant Kara meteorite crater // *Large Meteorite Impacts VI*. – 20196. – LPI Contrib. No. 2136.

208. Jackson J.C., Horton J.W., Jr., Chou I.M. and Belkin H.E. Coesite in suevites from the Chesapeake Bay impact structure // *Meteorit Planet Sci*. – 2016. – 51. – P. 946-965. – DOI: 10.1111/maps.12638.

209. James S., Chandran S.R., Santosh M., Pradeepkumar A.P., Praveen M.N., Sajinkumar K.S. Meteorite impact craters as hotspots for mineral resources and energy

fuels: A global review // *Energy Geoscience*. – 2022. – Vol. 3. – No. 2. P. 136–146. – DOI: 10.1016/j.engeos.2021.12.006.

210. Joint Committee on Chemical Analysis by X-ray Diffraction Methods // *X-ray Diffraction Data Cards*, Vols. 1 through 13. The American Society for Testing and Materials, Philadelphia. – 1950.

211. Kalampounias A. G., Yannopoulos S. N., Papatheodorou G. N. Temperature-induced structural changes in glassy, supercooled, and molten silica from 77 to 2150 K // *The Journal of Chemical Physics*. – 2006. – V. 124. – 014504. – DOI: 10.1063/1.2136878.

212. Kaliwoda M., Hochleitner R., Hoffmann V.H., Mikouchi T., Gigler A.M., Schmahl W.W. New Raman Spectroscopic Data of the Almahata Sitta Meteorite // *Spectroscopy Letters: An International Journal for Rapid Communication*. – 2013. – 46:2. – P. 141-146. – DOI: 10.1080/00387010.2011.610423

213. Kayama M., Nagaoka H., Niihara T. Lunar and Martian Silica // *Minerals*. – 2018. – V. 8. – P. 267.

214. Kieffer S.W. Shock metamorphism of the Coconino Sandstone at Meteor Crater, Arizona // *Journal of Geophysical Research*. – 1971. – 76(23). – P. 5449-5473. – DOI: 10.1029/jb076i023p05449.

215. Kenkmann T. Structural geology of impact craters / T. Kenkmann, M.H. Poelchau, G. Wulf // *Journal of structural geology*. – 2014. – V. 62. – P. 156–182. – DOI: 10.1016/j.jsg.2014.01.015.

216. Ketcham R.A. New algorithms for ring artifact removal // In: *Proc. SPIE 6318, Developments in X-Ray Tomography V*, San Diego, CA. – 2006.

217. Koeberl C. The geochemistry and cosmochemistry of impacts // *Treatise on Geochemistry* (eds. Holland, H.D. & Turekian, K.K.) Second Edition. Oxford: Elsevier. – 2014. – 2. – P. 73–118.

218. Koeberl C. Identification of meteoritic components in impactites // In: Grady M. M., Hutchison R., McCall G. J. H. Rothery D. A. (eds) *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects*. Geological Society, London, Special Publications. – 1998. – 140. – P. 133-153.

219. Koeberl C., Denison C., Ketcham R.A., Reimold W.U. High-resolution X-ray computed tomography of impactites // *Journal of geophysical research*. – 2002. – 107(E10). – 5089. – DOI: 10.1029/2001JE001833.

220. Koeberl C., Sharpton V.L., Murali A.V., Burke K. 1990. Kara and Ust-Kara impact structures (USSR) and their relevance to the K/T boundary event // *Geology*. – 1990. – 18. – P. 50-53.
221. Koeberl C. *Terrestrial Impact Structures: The TanDEM-X Atlas*, by Gottwald M., Kenkmann T., Reimold W.U., Verlag F.P. Munich, 2020, two volumes in slipcase, 608 pp., 435 color figures, 205 physical maps, hard cover 32.6 × 24.5 cm (ISBN 978-3-89937-261-8) // *Meteorit Planet Sci.* – 2022. – 57. – P. 1325-1326. – DOI: 10.1111/maps.13828.
222. Kovaleva E., Dixon R. Properties of Impact-Related Pseudotachylite and Associated Shocked Zircon and Monazite in the Upper Levels of a Large Impact Basin: a Case Study From the Vredefort Impact Structure // *Minerals*. – 2020. – 10(12). – P. 1053. – DOI: 10.3390/min10121053.
223. Kowitz A., Güldemeister N., Reimold W. U., Schmitt R. T., Wünnemann K. Diaplectic quartz glass and SiO<sub>2</sub> melt experimentally generated at only 5 GPa shock pressure in porous sandstone: Laboratory observations and meso-scale numerical modeling // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2013. – 384. – P. 17–26. – DOI: 10.1016/j.epsl.2013.09.021.
224. Krumm M., Kasperl S., Franz M. Reducing non-linear artifacts of multi-material objects in industrial 3D computed tomography // *NDT & E Int.* – 2008. – 41. – P. 242-251.
225. Kruse O. Mossbauer and X-ray study of the effect of vacancy concentration in synthetic hexagonal pyrrhotites // *American Mineralogist*. – 1990. – 75. – P. 755-763.
226. Kvasnytsya V., Wirth R. Micromorphology and internal structure of apographitic impact diamonds: SEM and TEM study // *Diam. Relat. Mater.* – 2013. – № 32. – P. 7-16.
227. Langenhorst F., Deutsch A. Shock Experiments on Pre-Heated  $\alpha$ - and  $\beta$ -Quartz: I. Optical and density data // *Earth and Planet. Sci. Lett.* – 1994. – V. 125. – P. 407-420.
228. Langenhorst F., Shafranovsky G., Masaitis V.L. A comparative study of impact diamonds from the Popigai, Ries, Sudbury, and Lappajarvi craters // *Meteoritics & Planetary Science*. – 1998. – 33 (4).

229. Langenhorst F. Shock metamorphism of some minerals: Basic introduction and microstructural observations // *Bulletin of the Czech Geological Survey*. – 2002. – Vol. 77. – No. 4. – P. 265-282.
230. Langenhorst F., Deutsch A. Shock metamorphism of minerals // *Elements*. – 2012. – 8. – P. 31-36.
231. Li X., Chen Y., Xu T., Gu L., Yuan J., Su W., Tian H., Luo H., Cai S., Komarneni S. (2023). Thermally induced phase transition of troilite during Micro-Raman spectroscopy analysis // *Icarus*. – 2023. – 390. – 115299. – DOI: 10.1016/j.icarus.2022.115299.
232. Lyutoev V., Shumilova T., Mazur A., Tolstoy P. NMR Spectral Characteristics of Ultrahigh Pressure High Temperature Impact Glasses of the Giant Kara Crater (Pay-Khoy, Russia) // *Minerals*. – 2021. – 11. – no. 12: 1418. – DOI: 10.3390/min11121418.
233. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: 1. Method and results // *J. Geophys. Res.* – 2007. – № 112. – B03211. – DOI: 10.1029/2005JB004223.
234. Mameli V., Musinu A., Niznansky D., Peddis D., Ennas G., Ardu A., Cannas C. (2016). Much More Than a Glass: The Complex Magnetic and Microstructural Properties of Obsidian // *The Journal of Physical Chemistry*. – 2016. – 120(48). – P. 27635-27645. – DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b08387.
235. Maksimova A.A., Petrova E.V., Chukin A.V., Karabanalov M.S., Nogueira B.A., Fausto R., Yesiltas M., Felner I., Oshtrakh, M.I. Characterization of Kemer L4 meteorite using Raman spectroscopy, X-ray diffraction, magnetization measurements and Mössbauer spectroscopy // *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2020. – 242. – 118723. – DOI: 10.1016/j.saa.2020.118723.
236. Maksimenko N., Shumilova T. Petrographic and petrochemical characteristics of suevite matrix, western part of the Kara Astrobleme (Russia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – 906. – 012088. – DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012088.
237. Martínez J.R., Vázquez-Durán A., Martínez-Castañón G., Ortega-Zarzosa G., Palomares-Sánchez S.A., Ruiz F. Coesite Formation at Ambient Pressure and Low

Temperatures // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2008. – P. 1-6. – DOI: 10.1155/2008/406067.

238. Masaitis V., Mashchak M., Selivanovskaya T., Ezersky V. Dynamics of Clastic Material Distribution in Allogenic Breccias and Suevites of the Kara Astrobleme // *LUNAR AND PLANETARY SCIENCE XII*. - 1981. - 12. - P. 658-660.

239. Masaitis V.L., Mashchak M.S., Selivanovskaya T.V. Parameters of excavation and melting zones of Kara crater // *Lunar and Planet. Sci. - Houston (Tex.)*, 1989. - Vol. 20: 20th Conf., March 13-17, 1989: Abstr. Pap. - P. 622-623.

240. Masaitis V.L. (Ed.). Popigai Impact Structure and its Diamond-Bearing Rocks // *Impact Studies*. – 2019. – DOI: 10.1007/978-3-319-77988-1.

241. Masaitis V.L., Naumov V.V. (eds.) The Puchezh-Katunki Impact Crater: geology and origin // *Switzerland*. – 2020. – 213 p.

242. Mashchak M.S. Morphology and structure of the Kara and Ust'-Kara astroblemes // *International Geology Review*. – 1991. – 33:5. – P. 433-447. – DOI: 10.1080/00206819109465701.

243. Masotta M., Peres S., Folco L., Mancini L., Rochette P., Glass B.P., Campanale F., Gueninchault N., Radica F., Singsoupho S., Navarro E. 3D X-ray tomographic analysis reveals how coesite is preserved in Muong Nong-type tektites // *Sci Rep*. – 2020. – 10. – 20608.

244. McMillan P.F., Piriou B. Raman spectroscopic studies of silicate and related glass structure: a review // *Bulletin de Mineralogie*. – 1983. – 106(1). – P. 57-75.

245. McMillan P.F., Remmele R.L. Hydroxyl sites in SiO<sub>2</sub> glass: A note on infrared and Raman spectra // *Am. Mineral*. – 1986. – 71. – P. 772-778.

246. Melosh H.J. *Impact Cratering: A Geologic Process* // Oxford University Press, New York. – 1989. – 245 p.

247. Melosh H.J. The Mechanics of Pseudotachylite Formation in Impact Events // In: Koeberl C., Henkel H. (eds). *Impact Tectonics*. Impact Studies. Springer, Berlin, Heidelberg. – DOI: 10.1007/3-540-27548-7\_2.

248. Moreau J.G., Jöeleht A., Aruväli J., Heikkilä M.J., Stojic A.N., Thomberg T., Plado J., Hietala S. Bulk synthesis of stoichiometric/meteoritic troilite (FeS) by high-temperature pyrite decomposition and pyrrhotite melting // *Meteorit Planet Sci*. – 2022. – 57. – P. 588-602. – DOI: 10.1111/maps.13782.



249. Nakamori F., Ohishi Y., Muta H., Kurosaki K., Fukumoto K., Yamanaka S. Mechanical and thermal properties of  $ZrSiO_4$  // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2017. – 54:11. – P. 1267-1273.
250. Nakazawa H., Yamada H., Fujita T. Crystal synthesis of smectite applying very high pressure and temperature // *Applied Clay Science*. – 1992. – 6. – P. 395-401. – DOI: 10.1016/0169-1317(92)90006-9.
251. Naumov M.V. Impact-generated hydrothermal systems: Data from Popigai, Kara, and Puchezh-Katunki impact structures // In: Plado J. and Pesonen L.J. (Eds.), *Impacts in Precambrian shields*. Springer-Verlag, Berlin. – 2002. – P. 117-171.
252. Naumov M.V. Principal features of impact-generated hydrothermal circulation systems: mineralogical and geochemical evidence // *Geofluids*. – 2005. – 5(3). – P. 165-184. – DOI: 10.1111/j.1468-8123.2005.00092.x.
253. Nazarov M.A., Barsukova L.D., Badjukov D.D., Kolesov G.M., Nizhegorodova I.V., Alekseev A.S. Geology and chemistry of the Kara and Ust-Kara impact craters // *Lunar and Planetary Science Conference, LPI Houston*. – 1989. – V. 20. – P. 764-765.
254. Németh P., Garvie L., Aoki T., Dubrovinskaia N., Dubrovinsky L., Buseck P. Lonsdaleite is faulted and twinned cubic diamond and does not exist as a discrete material // *Nat Commun*. – 2014. – № 5. – P. 5447.
255. Ohman Y., Raitala J., Badjukov D., Lorenz C. Preliminary studies of the Syadmayakha suevites from Kara Crater, Russia // *65th Annual Meteoritical Society Meeting*. – 2002. – 5151.
256. Oshtrakh M.I., Klencsár Z., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Chukin A.V., Shtoltz A.K., Semionkin V.A. Iron sulfide (troilite) inclusion extracted from Sikhote-Alin iron meteorite: Composition, structure and magnetic properties // *Materials Chemistry and Physics*. – 2016. – 174. – P. 100-111.
257. Osinski G.R. Impact melt rocks from the Ries impact structure, Germany: An origin as impact melt flows? // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2004. – 226. – P. 529-543.
258. Osinski G.R. Impact glasses in fallout suevites from the Ries impact structure, Germany: An analytical SEM study // *Meteoritics & Planetary Science* 38. – 2003. – Nr 11. – P. 1641-1667. – DOI: 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00006.x.

259. Osinski G.R., Grieve R.A.F., Collins G.S., Marion C., Sylvester P. 2008a. The effect of target lithology on the products of impact melting // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2008a. – 43. – P. 1939–1954.
260. Osinski G.R., Grieve R.A.F. Classification of Impact Melt-bearing Impactites: A Discussion // *Meteoritics and Planetary Science Supplement*. – 2009. – 72. – 5335.
261. Osinski G.R., Spray J.G., Grieve R.A.F. 2007. Impact melting in sedimentary target rocks: An assessment // *Geological Society of America Special Paper*. – 2008b. – P. 1-18.
262. Osinski G.R., Pierazzo E. (eds.). *Impact Cratering: Processes and Products* // A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, Blackwell Publishing Ltd. – 2013. – DOI: 10.1002/9781118447307.
263. Paleari A. Ge and Sn doping in silica: structural changes, optically active defects, paramagnetic sites / *Defects in SiO<sub>2</sub> and related dielectrics: science and technology* (Ed. by G. Pacchioni, L. Skuja, D. L. Griscom) // *Proceeding of the NATO Advanced Study Institute*. Erice, Italy. – 2000. – P. 307-327. – DOI: 10.1007/978-94-010-0944-7.
264. Pittarello L., Nestola F., Viti C., Crosta A.P., Koeberl C. Melting and cataclastic features in shatter cones in basalt from the Vista Alegre impact structure Brazil // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2015. – 50. – P. 1228-1243.
265. Pedoussaut N.M., Lind C. Facile Synthesis of Troilite. *Inorganic Chemistry*. – 2008. – 47(2). P. 392-394. – DOI: 10.1021/ic701636h.
266. Pierazzo E., Melosh H. J. Hydrocode modelling of Chicxulub as an oblique impact event // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1999. – 165. – P. 163-176.
267. Pierazzo E., Melosh H. J. Hydrocode modelling of oblique impacts: The fate of the projectile // *Meteorit. Planet. Sci.* – 2000. – 35. – P. 117-130.
268. Ponomareva T., Shumilova T. Magnetic properties of impact UHPHT glasses, melt rocks, suevitic breccia and target rocks of the giant Kara meteorite crater (Pay-Khoy, Arctic seashore, Russia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – 906. – 012086. – DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012086.
269. Raitala J. Impact vs. post-impact metamorphism in impactite garnet // *Lunar and Planetary Science*. – 1997. – 28. – P. 1151-1152.

270. Raitala J., Ojala K., Öhman T., Badyukov D., Lorenz C. Kara crater by remote sensing // LPS XXXIV. – 2003. – 1057.
271. Ribbe P.H. Sulfide Mineralogy: Mineralogical Society of America Short Course Notes // Mineralogical Society of America short course notes. Southern Printing Company. – 1974.
272. Ross N.L., Shu J., Hazen R.M. High-pressure crystal chemistry of stishovite // American Mineralogist. – 1990. – 75 (7-8). – P. 739–747.
273. Rowe M.C., Ellis B.S., Lindeberg A. Quantifying crystallization and devitrification of rhyolites by means of X-ray diffraction and electron microprobe analysis // American Mineralogist. – 2012. – V. 97. – P. 1685-1699.
274. Rubin A.E., Ulff-Moller F., Wasson J.T., Carlson W.D. The Portales Valley meteorite breccia: evidence for impact-induced melting and metamorphism of an ordinary chondrite // Geochim Cosmoch Acta. – 2001. – 65. – P. 323-342.
275. Russell S.S., Howard L. The texture of a fine-grained calcium-aluminium-rich inclusion (CAI) in three dimensions and implications for early solar system condensation // Geochim. Cosmoch. Acta. – 2013. – 116. – P. 52-62.
276. Saikia B., Parthasarathy G., Borah R.R., Satyanarayanan M., Borthakur R., Chetia P. Spectroscopy and Mineralogy of a Fresh Meteorite Fall Kamargaon (L6) Chondrite // Proceedings of the Indian National Science Academy. – 2017. – 83. – P. 941-948.
277. Sergienko E.S., Yanson S.Y., Kosterov A.A., Kharitonskii P.V., Frolov A.M. Secondary Changes of Rocks in Zhamanshin Meteorite Crater (Kazakhstan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Science and Technology Conference "EarthScience", Russky Island. – Vol. 459. – 3. – Chapter 2. – Russky Island: Institute of Physics Publishing. – 2020. – 032003. – DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032003.
278. Sergienko E.S., Yanson S.Y., Kosterov A.A., Kharitonskii P.V., Frolov A.M. Suevites and Tagamites of Zhamanshin Astrobleme: Distribution in the Crater and Petrographic Features // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vladivostok. – 2021. – 042080. – DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042080.
279. Seuthe T., Grehn M., Mermillod-Blondin A., Bonse J., Eberstein M. Compositional dependent response of silica-based glasses to femtosecond laser pulse

irradiation. *Laser-Induced Damage in Optical Materials // Proc SPIE.* – 2013. – 8885. – 88850M. – DOI: 10.1117/12.2028713.

280. Shafranovsky G.I. Impact Diamonds from Shocked Crystalline Rocks and Impactites // In: Masaitis V. (eds) *Popigai Impact Structure and its Diamond-Bearing Rocks. Impact Studies.* Springer, Cham. – 2019. – DOI: 10.1007/978-3-319-77988-1\_6.

281. Simon S. Multiple Shallow Crustal Origins for Spinel-Bearing Lithologies on the Moon: A Perspective From the Luna 20 Mission / S. Simon, C. Shearer, S. Haggerty, D. Moriarty, N. Petro, J. Papike, Z. Vaci // *Journal of Geophysical Research: Planets.* – 2022. – 127.

282. Simpson S., Osinski G., Longstaffe F., Kring D., Schmierer M., Svensson M., Gulick S. Characterization of impact glass alteration and associated secondary clay mineralogy through the upper Chicxulub peak-ring // *49th Lunar and Planetary Science Conference 2018 (LPI Contrib. No. 2083).* – 2018.

283. Schmitt R.T. Shock Experiments with the H6 Chondrite Kernouvé: Pressure Calibration of Microscopic Shock Effects // *Meteoritics & Planet. Sci.* – 2000. – V. 35. – P. 545-560.

284. Shultz M.M. Chemistry of glass // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 1985. – 73 (1). – P. 91-101. – DOI: 10.1016/0022-3093(85)90339-4.

285. Skala R. Inversion twinning in troilite // *American Mineralogist.* – 2006. – 91(5-6). – P. 917-921. – DOI: 10.2138/am.2006.1999.

286. Scott E.R.D. Iron meteorites: Composition, age, and origin // In *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*, Oxford University Press, Oxford. – 2020. – DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.206.

287. Schrader D.L., Davidson J., McCoy T.J., Zega T.J., Russell S.S., Domanik K.J., King A.J. The Fe/S ratio of pyrrhotite group sulfides in chondrites: An indicator of oxidation and implications for return samples from asteroids Ryugu and Bennu // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2021. – 303. – P. 66–91. – DOI: 10.1016/j.gca.2021.03.019.

288. Shumilova T.G., Isaenko S.I., Ulyashev V.V., Kazakov V.A., Makeev B.A. After-coal diamonds: an enigmatic type of impact diamonds // *European Journal of Mineralogy.* – 2018. – 30(1). – P. 61-76. – DOI: 10.1127/ejm/2018/0030-2715.

289. 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.
290. Shumilova T.G., Zubov A.A., Isaenko S.I. Discovery of Upper-Going Intrusive Complex of Ultrahigh Pressure Impact Melt Glasses in Kara Astrobleme // 81st Annual Meeting of The Meteoritical Society. – 2018. – LPI Contrib. No. 2067. – 6089.
291. Shumilova T., Isaenko S. Phase Composition and Microstructure of UHPHT Vein Glass from Giant Diamondiferous Kara Impact Crater by Raman Mapping // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – 362. – 012042. – DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012042.
292. Shumilova T.G., Kovalchuk N.S., Makeev B.A. Geochemical Features of the Diamondiferous Suevites of the Kara Astrobleme (Pay-Khoy) // *Doklady Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 486. – Part 1. – P. 545-548. – DOI: 10.1134/S1028334X19050167.
293. Shumilova T.G., Ulyashev V.V., Kazakov V.A., Isaenko S.I., Vasil`ev E.A., Svetov S.A., Chazhengina Y., Kovalchuk N.S. Karite – diamond fossil: a new type of natural diamond // *Geoscience Frontiers*. – 2019.
294. 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.
295. 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.
296. Shumilova T., Morokhin A., Zubov A., Shaybekov R. Preliminary petrological and geochemical studies of dolerite dikes at the Kara astrobleme central uplift, comparison with UHPHT impact melt glasses (Pay-Khoy, Russia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – 906. – 012087. – DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012087.
297. Sobolev N.V., Shatsky V.S., Vavilov M.A., Goryainov S.V. Zircon in high pressure metamorphic rocks of folded regions as a unique container of inclusions of diamond, coesite and coexisting minerals // *Doklady Russ. Akad. Nauk* – 1994. – 334. P. 488-492.

298. Sobolev R.N., Mal'tsev V.V., Volkova E.A. Experimental Investigation of the Melting of Minerals and Rocks // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2021. – No. 2. – P. 102-108.
299. Stähle V. Impact glasses from the suevite of the Nordlinger Ries // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1972. – 17. – P. 275-293.
300. Stähle V., Altherr R., Koch M. et al. Shock-induced growth and metastability of stishovite and coesite in lithic clasts from suevite of the Ries impact crater (Germany) // *Contrib Mineral Petrol*. – 2008. – 155. – P. 457–472. – DOI: 10.1007/s00410-007-0252-2.
301. Stöffler D. Coesite and stishovite in shocked crystalline rocks // *Journal of Geophysical Research*. – 1971. – 76(23). – P. 5474–5488. – DOI: 10.1029/jb076i023p05474.
302. Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes: I Behavior of minerals under shock compression // *Fortschritte der Mineralogie*. – 1972. – V. 49. – P. 50-113.
303. Stöffler D. Glasses formed by hypervelocity impact // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1984. – 67. – P. 465-502. – DOI: 10.1016/0022-3093(84)90171-6.
304. Stöffler D., Artemieva N.A., Wünnemann K., Reimold W.U., Jacob J., Hansen B.K., Summerson I.A.T. Ries crater and suevite revisited – Observations and modeling Part I: Observations // *Meteorit Planet Sci*. – 2013. – 48. – P. 515-589. – DOI: 10.1111/maps.12086.
305. Stöffler D., Grieve R.A.F. Classification and Nomenclature of Impact Metamorphic Rocks: A Proposal to the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks // *Abstracts of the 25th Lunar and Planetary Science Conference*. 1994. – P. 1347-1348.
306. Stöffler D., Grieve R.A.F. Impactites // *Metamorphic rocks: a classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks*. Cambridge: Cambridge University Press. – 2007. – P. 82-92.
307. Stöffler D., Hamann C., Metzler K. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2018. – 53. P. 5-49.

308. Sugiura H., Yamadaya T. Raman scattering in silica glass in the permanent densification region. *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1992. – 144. – P. 151-158. – DOI: 10.1016/s0022-3093(05)80395-3.
309. Thorpe C.L., Neeway J.J., Pearce C.I., Hand R.J., Fisher A.J., Walling S.A., Hyatt N.C., Kruger A.A., Schweiger M., Kosson D.S., Arendt C.L., Marcial J., Corkhill C.L. Forty years of durability assessment of nuclear waste glass by standard methods // *Npj Mater Degrad* 5. – 2021. – 61. – DOI: 10.1038/s41529-021-00210-4.
310. Thy P., Leshner C., Mayfield J.D. Low-pressure melting studies of basalt and basaltic andesite from the Southeast Greenland continental margin and the origin of dacites at Site 917 // Larsen H.C.; Duncan R.A.; Allan J.F.; Brooks K. (eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program // Scientific Results*, College Station, TX (Ocean Drilling Program). – 1999. – 163. – P. 1-18.
311. Trieloff M., Deutsch A., Jessberger E.K. The age of the Kara impact structure, Russia // *Meteoritics & Planetary Science*. – 1998. – 33. – P. 361-372.
312. Tsuchiyama A., Nakamura T., Nakano T., Nakamura N. Three-dimensional description of the Kobe meteorite by micro X-ray CT method: possibility of three-dimensional curation of meteorite samples // *Geochem J.* – 2002. – 36. P. 369-390.
313. Uesugi M., Uesugi K., Oka M. Non-destructive observation of meteorite chips using quantitative analysis of optimized X-ray micro-computed tomography // *Earth Planet Sci Lett.* – 2010. – 299. – P. 359-367.
314. Uesugi M., Uesugi K., Takeuchi A., Suzuki Y., Hoshino M. and Tsuchiyama A. Three-dimensional observation of carbonaceous chondrites by synchrotron radiation X-ray CT – Quantitative analysis and developments for the future sample return missions // *Geochim Cosmoch Acta.* – 2013. – 116. – P. 17-32.
315. Yadav A.K., Singh P. A review of the structures of oxide glasses by Raman spectroscopy // *RSC Advances*. 2015. 5(83), P. 67583–67609. DOI: 10.1039/c5ra13043c.
316. Yamada H., Nakazawa H., Hashizume H. Formation of smectite crystals at high pressures and temperatures // *Clays and Clay Minerals*. – 1994. – 42(6). – P. 674-678.
317. Yamada H., Nakazawa H., Ito E. Cooling rate dependency of the formation of smectite crystals from a high-pressure and high-temperature hydrous melt // *Clays and Clay Minerals*. – 1995. – 43(6). – P. 693-696. – DOI: 10.1346/CCMN.1995.0430605.

318. Yelissev A., Meng G.S., Afanasyev V., Pokhilenko N., Pustovarov V., Isakova A. Optical properties of impact diamonds from the Popigai astrobleme // *Diamond and Related Materials*. – 2013. – 37(1). – P. 8-16.
319. Yin F., Sharp T.G., Chen M. Nanotextures and formation process of coesite in silica glass from the Xiuyan impact crater // *Meteorit Planet Sci.* – 2021. – 56. – P. 1212-1223. – DOI: 10.1111/maps.13702.
320. Yoshida S., Nguyen T., Yamada A., Matsuoka J. In-Situ Raman Measurements of Silicate Glasses during Vickers Indentation // *Materials Transactions*. 2018. DOI: 10.2320/matertrans.md201901.
321. Wackerle J. Shock wave compression of quartz / J. Wackerle // *Journal of Applied Physics*. – 1962. – V. 33. – P. 922-937.
322. Wannier M.M.A., de Urreiztieta M., Wenk H.-R., Stan C.V., Tamura N., Yue B. Fallout melt debris and aerodynamically-shaped glasses in beach sands of Hiroshima Bay, Japan // *Anthropocene*. – 2019. – 100196. – DOI: 10.1016/j.ancene.2019.100196
323. Wang A., Kuebler K., Jolliff B., Haskin L. Mineralogy of a Martian meteorite as determined by Raman spectroscopy // *Journal of Raman Spectroscopy*. – 2004. – 35. P. 504-514. – DOI: 10.1002/jrs.1175.
324. Weber I., Böttger U., Pavlov S., Hübers H.W. Raman investigation of iron sulfides under various environmental conditions // *46th Lunar Planet. Sci. Conf.* – 2015.
325. Weber I., Böttger U., Pavlov S., Hübers H.W., Hiesinger H., Jessberger, E.K. Laser alteration on iron sulfides under various environmental conditions // *J. Raman Spectrosc.* – 2017. – 48. – P. 1509-1517. – DOI: 10.1002/jrs.5083.
326. Wellington S.L., Vinegar H.J. X-ray computerized tomography // *Journal of Petroleum Technology*. – 1987. – 39. – P. 885-898.
327. Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R.T., Stöffler D. Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2006. – V. 41. – №. 3. – P. 433-454.
328. Zamyatin D.A. Application of Raman Spectroscopy for Studying Shocked Zircon from Terrestrial and Lunar Impactites: A Systematic Review // *Minerals*. – 2022. – 12. – 969. – DOI: 10.3390/min12080969.
329. Zamiatina D.A., Zamyatin D.A., Mikhalevskii G.B., Chebikin N.S. Silica Polymorphs Formation in the Jänisjärvi Impact Structure: Tridymite, Cristobalite, Quartz,



Trace Stishovite and Coesite // Minerals. – 2023. – 13. – 686. – DOI: 10.3390/min13050686.

330. Zinovyev V.G., Egorov A.I., Shulyak G.I., Sushkov P.A., Tyukavina T.M., Mitropolsky I.A., Sakharov S.L., Okunev I.S., Loginov Y.E. Neutron activation analysis of the tagamite and suevite from the Kara astrobleme // J Radioanal Nucl Chem. – 2016. – 307. – P. 1315-1324. – DOI: 10.1007/s10967-015-4480-z.

331. Zubov A.A., Shumilova T.G., Zhuravlev A.V., Isaenko S.I. (2021). X-ray computed microtomography of diamondiferous impact suevitic breccia and clast-poor melt rock from the Kara astrobleme (Pay-Khoy, Russia) // American Mineralogist. – 106. – P. 1860-1870. – DOI: 10.2138/am-2021-7578.

332. 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.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

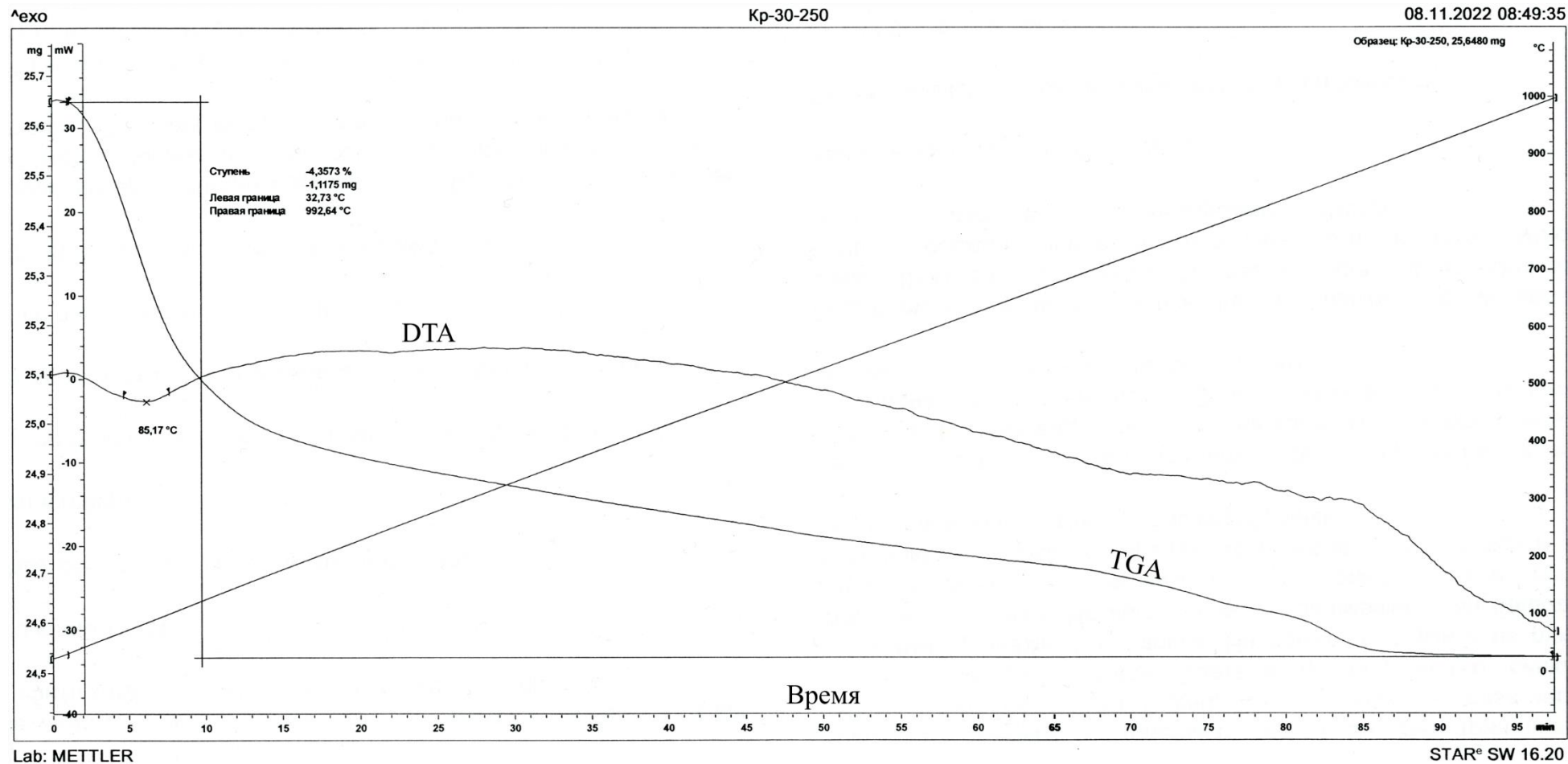
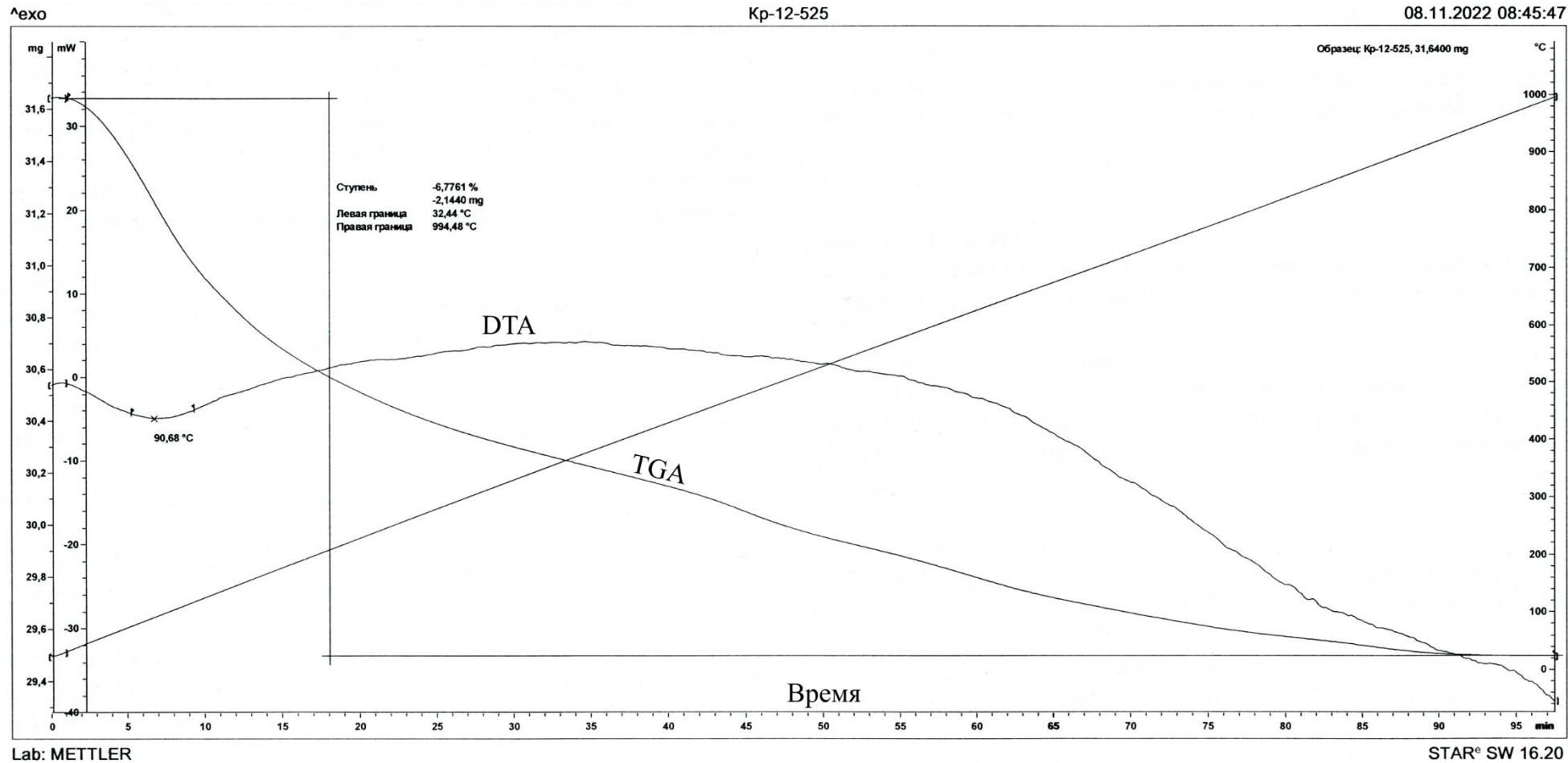
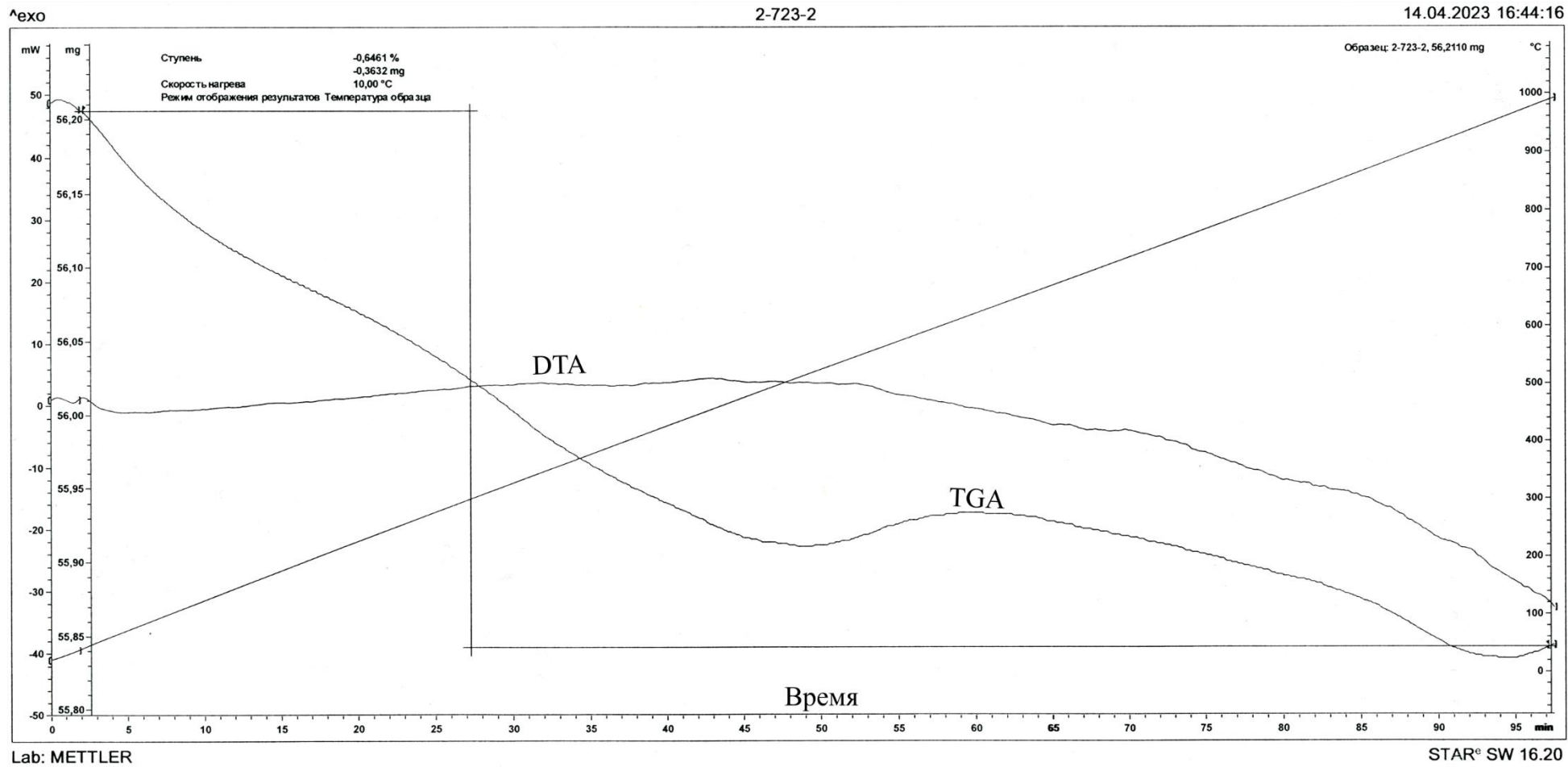


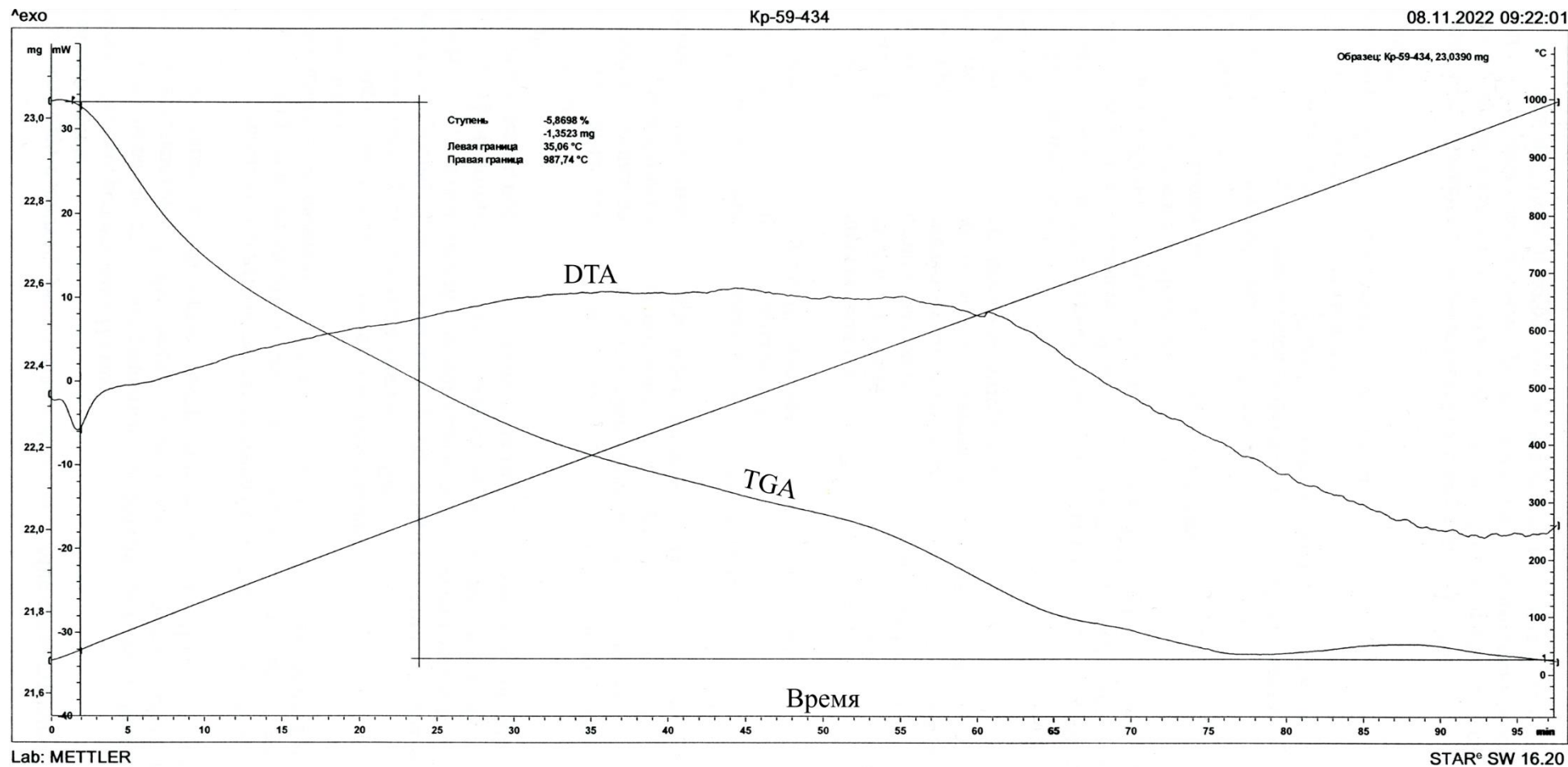
Рисунок 1. Термограмма порошковой пробы расплавного импактита массивного тела на р. Анарога (образец М/30-250).



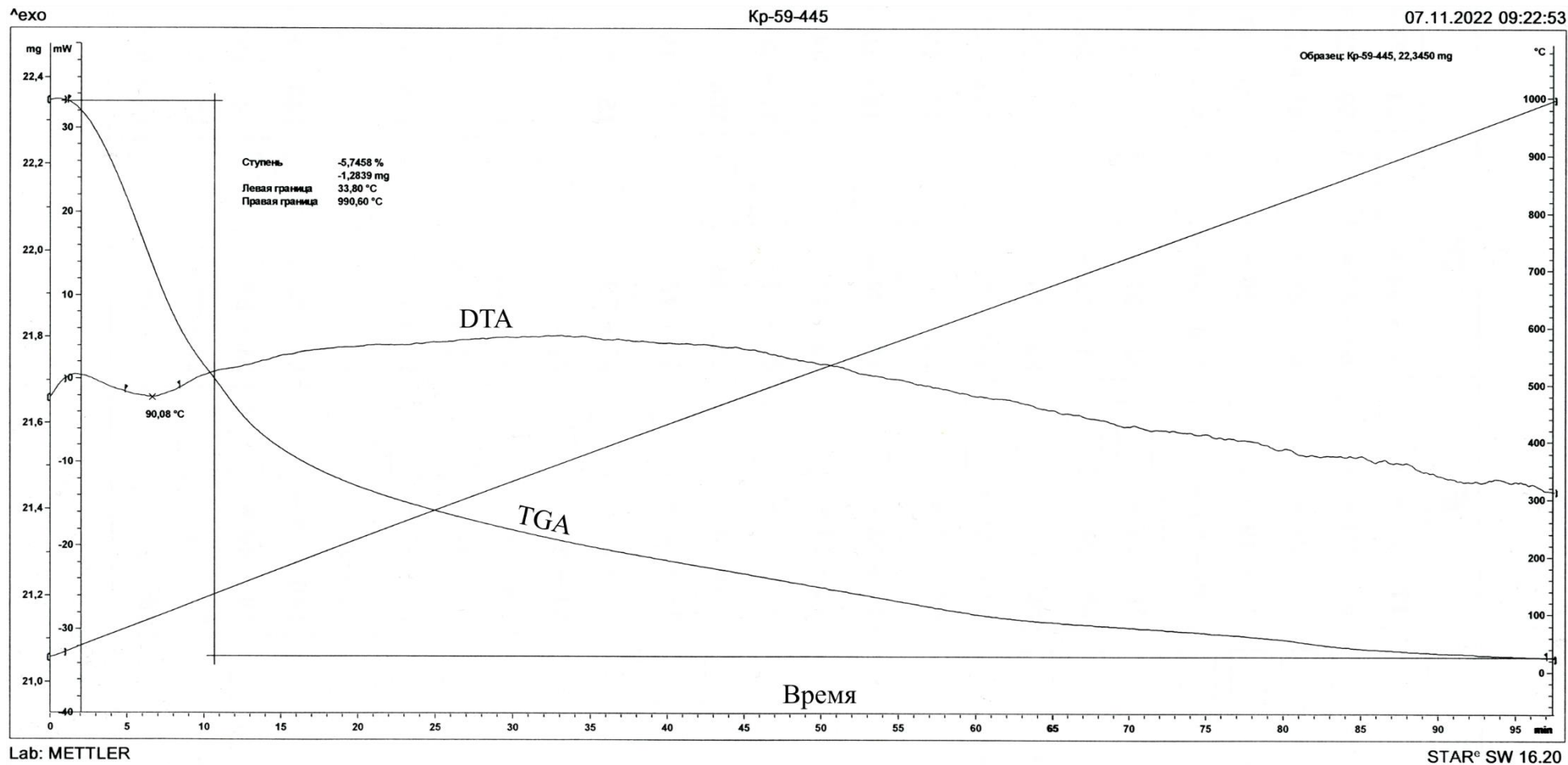
**Рисунок 2.** Термограмма порошковой пробы жильного расплавленного импактита серого цвета на р. Кара (образец Ж/12-525).



**Рисунок 3.** Термограмма порошковой пробы жильного расплавленного импактита коричневого цвета на р. Кара (образец Ж/2-723\_2).



**Рисунок 4.** Термограмма порошковой пробы преимущественно стекловатой бомбы на р. Анарога (образец Б/59-434).



**Рисунок 5.** Термограмма порошковой пробы преимущественно микрокристаллической (полевошпатовой) бомбы на р. Анарога (образец Б/59-445).

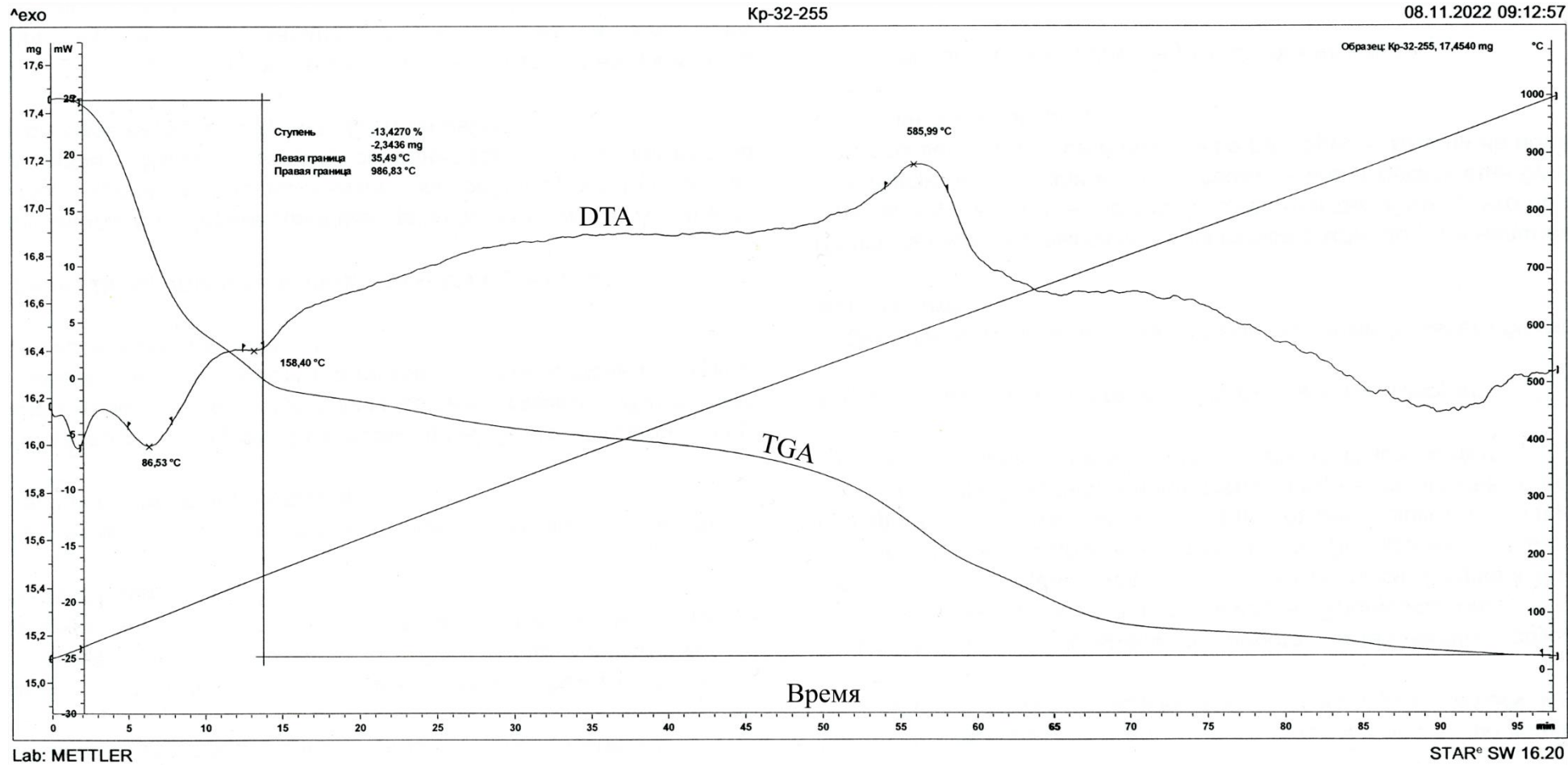
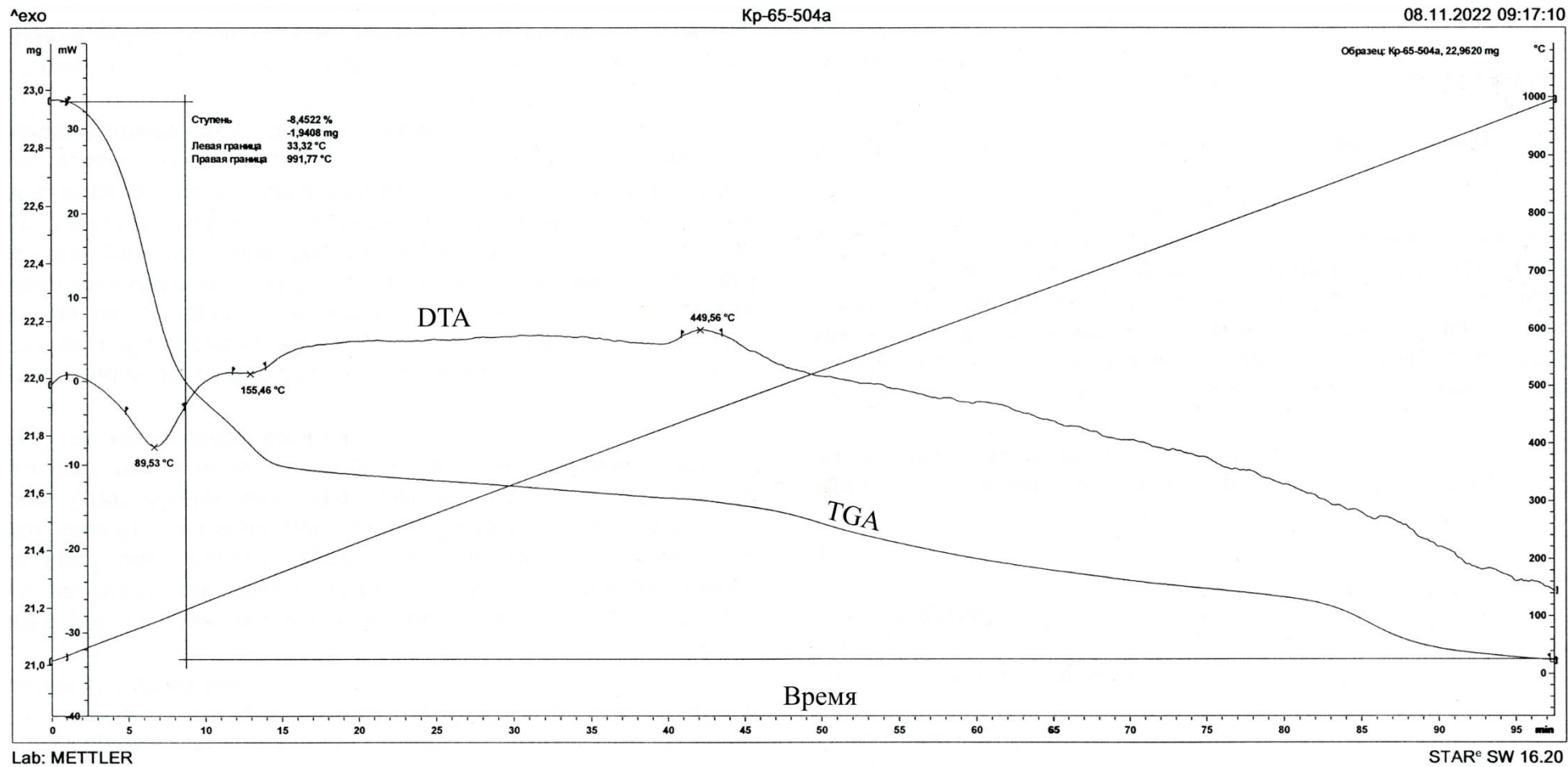


Рисунок 6. Термограмма порошковой пробы преимущественно смектитовой бомбы на р. Кердорсашор (образец Б/32-255).



**Рисунок 7.** Термограмма порошковой пробы преимущественно пемзовидной бомбы на р. Кердорсагор (образец Б/65-504а).