

*На правах рукописи*



МАКСИМЕНКО Надежда Игоревна

**ЗЮВИТЫ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ:  
ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ И ФАЦИИ**

Специальность 1.6.3 – Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Сыктывкар – 2023

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

**Научный руководитель:**

**Шумилова Татьяна Григорьевна**, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией минералогии алмаза Института геологии им. академика Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

**Официальные оппоненты:**

**Афанасьев Валентин Петрович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).

**Глазовская Людмила Ивановна**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (МГУ).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «16» декабря 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.062.02. при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте по адресу: <http://earth.crust.irk.ru/images/upload/newsfull245/3986.pdf>.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату геолого-минералогических наук Данилову Борису Станиславовичу по вышеуказанному адресу или e-mail: [boris@crust.irk.ru](mailto:boris@crust.irk.ru).

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.062.02  
кандидат геолого-минералогических наук



Б.С. Данилов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Карская астроблема является одним из крупнейших в России метеоритным кратером. Наличие углистого вещества в породах мишени стало причиной образования импактных апоугольных алмазов, впервые описанных В.А. Езерским (Езерский, 1982; 1986). Алмазы апоугольного генезиса обнаружены в импактитах двух астроблем – Карской и Усть-Карской. В последнее время отмечается повышенный интерес к импактитам Карского кратера в связи с высоким содержанием в них импактных апоугольных алмазов и параморфоз по органике (Shumilova et al., 2020a), наибольшая концентрация которых установлена в зювитах.

Импактиты Карской астроблемы активно исследовались в 70–90-е годы прошлого века, когда на территории данной импактной структуры проводились обширные производственные изыскания и всесторонние детальные работы российских ученых (Масайтис и др., 1980; Машак, 1990а,б; и др.). Были описаны особенности коренных выходов, гранулометрическая специфика, литологический и вещественный состав обломочных импактитов (Машак и др., 1983; Селивановская и др., 1990; и др.). Зювиты классифицировались по размеру обломков и по соотношению расплавленного и обломочного материала, предполагалась возможность выделения среди зювитов разных фаций (Фельдман, 1990; и др.). Зювиты Карской астроблемы по структурно-текстурным признакам, минералогическому и петрохимическому составу были разделены на 3 типа, образовавшиеся, предположительно, по разным протопородам (Шумилова и др., 2016).

До настоящего времени особенности петрографии, петрохимического и геохимического состава зювитов не рассматривались детально. Фациальные особенности зювитов и характер взаимоотношений фаций импактитов в структуре коптогенного комплекса Карской астроблемы остаются слабо изученными. До настоящего времени не было предложено комплекса признаков фациального разделения зювитов как пород метеоритных кратеров в целом. В связи с этим, в настоящее время актуальным является детальное исследование геологических, петрографических и вещественных особенностей трех типов зювитов с помощью современных методов исследования для установления критериев петрологической типизации и анализа фациальных признаков обломочных импактитов Карского кратера. Понимание фациальных особенностей зювитов и закономерностей расположения фаций импактитов в разрезе метеоритного кратера имеет значение для решения фундаментальных вопросов импактитогенеза и совершенствования принципиальной модели образования крупных метеоритных кратеров, что важно при картировании крупных астроблем и прогнозировании связанных с ними полезных ископаемых.

**Цель работы:** определение критериев петрологической типизации и анализ фациальных признаков на основе комплексной характеристики зювитов Карской астроблемы.

**Задачи:**

- комплексное изучение геологических, петрографических, петро- и геохимических особенностей типов зювитов Карской астроблемы;
- сравнительный анализ состава зювитов и пород мишени Карской астроблемы;
- анализ структурно-вещественной специфики матрикса зювитов Карской астроблемы;

- определение комплекса признаков фациального расчленения обломочных импактитов;
- выявление фациальных признаков зювитов Карской астроблемы;
- определение положения и характера взаимоотношений фаций зювитов в структуре Карского кратера.

#### **Фактический материал и методы исследований**

Каменный материал был отобран автором на территории Карской астроблемы и ее окружения (рис. 1) и частично предоставлен научным руководителем, д.г.-м.н. Шумиловой Т.Г. В ходе полевых работ было отобрано около 200 образцов зювитов Карского кратера. Из штучных образцов были изготовлены шлифованные пластины, двусторонне-полированные шлифы и порошковые препараты.

Изучение макроскопических особенностей зювитов проводилось в полевых условиях. Исследование петрографической, петро- и геохимической специфики зювитов проведено с использованием комплекса современных методов, включая оптическую микроскопию (более 100 двусторонне-полированных шлифов), сканирующую электронную микроскопию с локальным и площадным микрозондовым анализом и поэлементным картированием (около 300 анализов), силикатный анализ на 14 компонентов (40 анализов), масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (30 анализов) и спектроскопию комбинационного рассеяния света (около 90 анализов).

#### **Основные защищаемые положения.**

1. Критерием петрологической типизации зювитов Карской астроблемы является состав преобладающих литокластов: I тип характеризуется преобладанием кластов алевролитов и алевропесчаников, II тип – высоким содержанием обломков известняков (до 30 об. %), III тип – преобладанием фрагментов углеродистых сланцев и углей.

2. Зювиты донной фации в Карской астроблеме характеризуются комплексом признаков – столбчатой отдельностью, субпараллельно ориентированными витрокластами неправильной формы, спекшимися с матриксом; зювиты аэродинамической фации – чешуйчатой и черепитчатой отдельностью, четкими очертаниями, угловатой и аэродинамической формой витрокластов.

3. Определяющим признаком температурного режима становления зювитов Карской астроблемы является характер локального спекания и плавления кварцевой и полевошпатовой компонент матрикса: аэродинамическая фация характеризуется начальной и промежуточной стадиями спекания с температурой до 1200°C; донная фация отличается заключительной стадией спекания и локальным плавлением при температуре до 1700°C.

**Научная новизна.** Разработан комплекс признаков фациального разделения зювитов. Получена наиболее полная характеристика обломочных импактитов Карской импактной структуры на макро- и микроуровне, включая детальное описание петрографической и вещественной специфики обломочных и расплавных компонентов и матрикса зювитов. Впервые обосновано фациальное деление зювитов Карского метеоритного кратера, среди зювитов Карской астроблемы охарактеризованы породы аэродинамической фации и фации донных потоков. Установлен характер взаимоотношений фаций импактитов в коптогенном комплексе Карской астроблемы. Выявлены общие признаки температурного режима становления зювитов Карской астроблемы.



**Рисунок 1.** Места отбора образцов зювитов и пород мишени на геологической карте Карской астроблемы по (Электронный справочник, 2023).

**Практическая значимость.** Предложенный комплекс признаков фациального расчленения зювитов может быть использован для петрографической диагностики фаций обломочных импактитов при изучении строения кратеров по скважинному материалу, что имеет значение для прогнозирования и поисков полезных ископаемых в крупных астроблемах. Критерий петрологической типизации зювитов Карской астроблемы может быть использован для систематизации обломочных импактитов других ударных структур. Выявленные признаки фаций зювитов Карского кратера могут быть использованы для уточнения характера их алмазоносности. Установленный характер взаимоотношений фаций импактитов в Карской астроблеме может быть использован для уточнения строения коптогенного комплекса. Полученные результаты имеют значение для решения фундаментальных вопросов импактитогенеза и совершенствования принципиальной модели образования крупных метеоритных кратеров.

**Личный вклад автора.** В основу диссертационной работы положены результаты исследований, проведенных автором в период с 2017 по 2022 годы на базе лаборатории минералогии алмаза ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Автором лично изучены коренные выходы, произведено опробование зювитов Карской астроблемы и пород мишени в 2017, 2019 и 2021 гг.. Непосредственно диссертантом выполнены оптические исследования с описанием шлифов зювитов и интерпретация петрографических наблюдений, проведена обработка и интерпретация данных сканирующей электронной микроскопии и микронзондового анализа, силикатного анализа, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена достаточной представительностью выборок каменного материала, применением современных методов исследования с использованием аттестованных методик, сертифицированного оборудования и сертифицированных стандартов. Аналитические исследования проведены

в ЦКП УрО РАН «Геонаука» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), ЦКП «Физико-химические исследования горных пород и минералов» (ИГ КарНЦ РАН). Полученные автором научные результаты и выводы выполненной работы апробировались на международных и всероссийских научных конференциях, были представлены научному сообществу в виде публикаций в высокорейтинговых журналах.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертационного исследования опубликовано 30 работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статьи в прочих научных журналах, 22 работы в материалах научных конференций. Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления» (Сыктывкар, 2017); VII Российской молодежной научно-практической Школе «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2017); XXV годичной сессии «Февральские чтения СГУ им. Питирима Сорокина» (Сыктывкар, 2018); Международном минералогическом семинаре «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения)» (Сыктывкар, 2018, 2020, 2022); Всероссийской молодежной научной конференции «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Уральского сегмента» (Сыктывкар, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022); XVII Геологическом съезде Республики Коми «Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России» (Сыктывкар, 2019); Международной научно-методической конференции «Мультикультурный мир: проблемы взаимопонимания» (Сыктывкар, 2019); Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 2019, 2020); Всероссийской молодежной геологической конференции памяти В.А. Глебовицкого (Санкт-Петербург, 2020); IX Всероссийской молодежной научной конференции «Человек и окружающая среда» (Сыктывкар, 2021); XIII Всероссийском петрографическом совещании с участием зарубежных ученых «Петрология и геодинамика геологических процессов» (Иркутск, 2021); IV Всероссийской (XIX) молодежной научной школе-конференции «Молодежь и наука на севере» (Сыктывкар, 2022); World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium – WMESS (Czech Republic, 2019, 2020, 2021).

Работа выполнена в рамках бюджетных тем НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, проекта РФФИ (аспиранты) № 20-35-90011 «Многообразие и геологическая позиция разновидностей алмазоносных зювитов гигантской Карской астроблемы (Пай-Хой)», проекта РФФИ № 17-05-00516 «Минералогия апоугольных импактных алмазов и сопутствующих углеродных фаз» и проекта РНФ № 17-17-01080 «Импактные стекла в астроблемах: фундаментальные и прикладные аспекты».

**Структура и объем работы.** Диссертация имеет общий объем 184 страницы, включает терминологический словарь, введение, 4 главы, заключение и приложение. Работа содержит 91 рисунок и 10 таблиц. Список литературы включает 185 опубликованных работ и интернет-ресурсы (3 наименования).

**Благодарности.** Автор выражает большую благодарность научному руководителю д.г.-м.н. Т. Г. Шумиловой за организацию полевых работ, оказанное внимание, поддержку и неоценимую помощь на всех этапах выполнения исследований. Автор искренне признателен директору ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН к.г.-м.н. И. Н. Бурцеву за создание

благоприятных условий для проведения исследований, акад. А. М. Асхабову за обсуждение и ценные рекомендации.

Особую благодарность автор выражает к.г.-м.н. Н. С. Ковальчук за предоставленные аналитические данные по породам мишени; к.г.-м.н. И. И. Голубевой, к.г.-м.н. К. В. Куликовой, к.г.-м.н. А. А. Соболевой за ценные консультации по петрологии и геохимии; к.х.н. М.С. Королевой за научные консультации по материаловедению в области керамики; д.г.-м.н. Н. Ю. Никуловой за помощь в обсуждении результатов аналитических исследований; к.г.-м.н. А. В. Журавлеву, д.г.-м.н. А. И. Антошкиной и к.г.-м.н. В. А. Салдину за научные консультации по осадочным породам мишени. Автор глубоко признателен к.г.-м.н. Л. В. Сазоновой, к.г.-м.н. Л. И. Глазовской и д.г.-м.н. Н. В. Грановской за ценные замечания и рекомендации при предварительном обсуждении результатов исследований. Автор выражает большую благодарность д.г.-м.н. Л. Н. Андреичевой, д.г.-м.н. В. Л. Андреичеву, д.г.-м.н. Д. А. Бушневу, д.г.-м.н. С. К. Кузнецову, к.г.-м.н. В. П. Лютоеву, к.г.-м.н. Т. П. Майоровой, д.г.-м.н. А. М. Пыстину, к.г.-м.н. Н. Н. Рябинкиной, к.г.-м.н. Н. Н. Тимониной, к.г.-м.н. Н. С. Уляшевой, к.г.-м.н. И. Х. Шумилову и другим сотрудникам Института за обсуждение диссертации.

Автор от всей души благодарит сотрудников лаборатории минералогии алмаза ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за помощь в полевых работах, обсуждение результатов исследований и всестороннюю поддержку.

Автор выражает благодарность Е. М. Тропникову, к.г.-м.н. С. И. Исаенко, В. А. Лобанову, О. В. Кокшаровой, С. В. Бурдюх, А. С. Парамонову за помощь в проведении аналитических работ; А. Е. Шмырову, В. М. Михайлову, Е. В. Сусол, М. В. Эховой и В. Л. Утициной за пробоподготовку.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Глава 1. «Астроблемы. Особенности геологического строения и полезные ископаемые астроблем»** подразделяется на 2 подглавы. В первой на основе анализа литературных данных изложены современные представления о геологическом строении и механизмах формирования метеоритных кратеров, приведены данные о полезных ископаемых, связанных с астроблемами. Во второй подглаве рассмотрена история изучения Карской импактной структуры, геологическое строение астроблемы и ее мишени.

**Глава 2. «Методика исследования»** посвящена научно-методической базе исследований. Макроскопические особенности зювитов анализировались в полевых условиях, петрографические характеристики исследовались с использованием оптической и электронной сканирующей микроскопии. Изучение вещественного состава обломочных импактитов проводилось методами силикатного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Петрохимический состав литокластов, витрокластов и матрикса зювитов изучался с помощью площадных микрозондовых анализов. Фазовый состав импактных стекол анализировался методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. Вещественный состав пород мишени исследовался с помощью силикатного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

**В главе 3. «Характеристика типов зювитов Карской астроблемы»** представлены результаты детального комплексного изучения трех типов зювитов Карской астроблемы.

Глава подразделяется на 3 подглавы. В первой описаны макроскопические особенности типов зювитов. Во второй подглаве рассмотрены петрографические характеристики типов зювитов. В третьей подглаве представлена петрохимическая специфика типов зювитов, их литокластов, витрокластов и матрикса, проведен сравнительный анализ трех типов зювитов и их предполагаемых протопород.

В главе 4. «Фациальное расчленение зювитов Карской астроблемы» на основе результатов анализа комплексного изучения трех типов зювитов и анализа литературных данных среди обломочных импактитов Карского кратера охарактеризовано 2 фации – фация аэродинамических выбросов и фация донных потоков. Проанализировано положение фаций зювитов в структуре астроблемы. Разработана принципиальная схема расположения фаций импактитов в разрезе Карского коптогенного комплекса.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

1. Критерием петрологической типизации зювитов Карской астроблемы является состав преобладающих литокластов: I тип характеризуется преобладанием кластов алевролитов и алевропесчаников, II тип – высоким содержанием обломков известняков (до 30 об. %), III тип – преобладанием фрагментов углеродистых сланцев и углей.

Защищаемое положение сформулировано в 3 главе и опирается на результаты полевого, петрографического, электронно-микроскопического и петрохимического изучения трех типов зювитов Карского кратера.

### Макро- и микроскопическая характеристика зювитов

Зювиты I типа изучены в юго-восточном и восточном секторах Карской астроблемы (рис. 1). В бассейне р. Анарога обнажение зювитов имеет большую мощность (до 20 м), небольшую протяженность (~100 м) и субвертикальные склоны (Максименко, 2019а). Зювиты характеризуются относительно низким содержанием литокластов (~20 об.%) (рис. 2). Литокласты в шлифах имеют размеры от 100 мкм до 1.5 см. Среди них преобладают глинистые алевролиты; песчаники и алевропесчаники; в меньшей степени аргиллиты; серицит-кварцевые, кварц-серицитовые, реже углеродистые, хлоритовые сланцы и алевросланцы; редко известняки и силициты (рис. 3, 4) (Максименко и др., 2020).

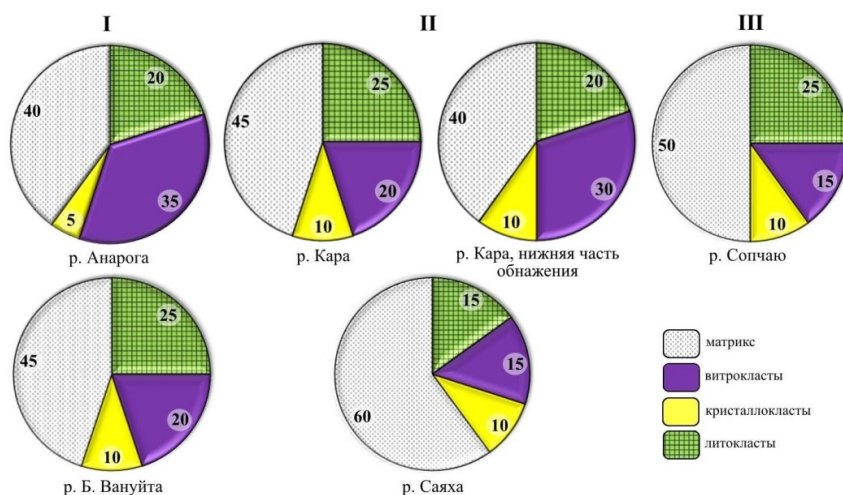
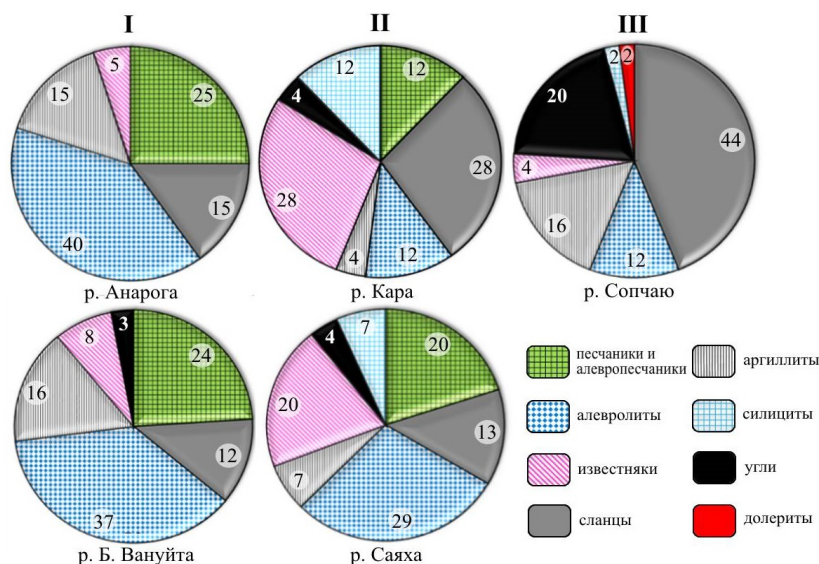


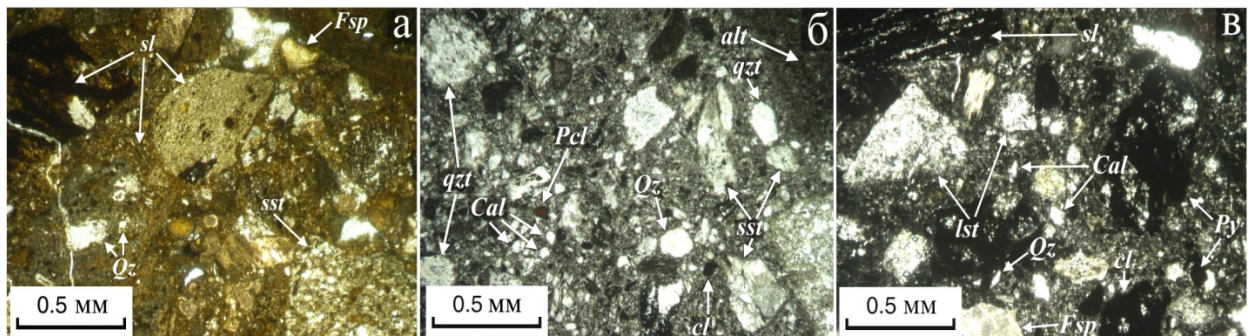
Рисунок 2. Содержание составных компонентов в типах зювитов Карской астроблемы (усредненные значения, об. %): I – I тип, II – II тип, III – III тип.





**Рисунок 3.** Количественное соотношение различных типов литокластов в типах зювитов Карской астроблемы (усредненные значения, нормированные на 100 %): I – I тип, II – II тип, III – III тип.

В долине р. Б. Вануйта зювиты I типа образуют непротяженные (до 160 м) маломощные (до 6 м) коренные выходы (Максименко и др., 2022; 2023). Для пород характерно высокое содержание литокластов (~25 об.%) (рис. 2), преобладание кластов глинистых и известковистых алевролитов, алевропесчаников и песчаников, в меньшей степени аргиллитов, сланцев и известняков, единично углей (рис. 3) (Максименко и др., 2022; 2023). Средний размер литокластов в шлифах составляет ~0.8 мм.



**Рисунок 4.** Петрографический состав типов зювитов Карской астроблемы (фото шлифов без поляризатора): а – зювит I типа (р. Анарога), б – зювит II типа (р. Кара), в – зювит III типа (р. Сопчаю). *Литокласты:* alt – алевролиты, cl – угли, lst – известняки, sl – сланцы, sst – песчаники, qzt – кварциты. *Кристаллокласты:* Cal – кальцит, Fsp – полевые шпаты, Qz – кварц, Pcl – пирохлор, Py – пирит (Максименко и др., 2020).

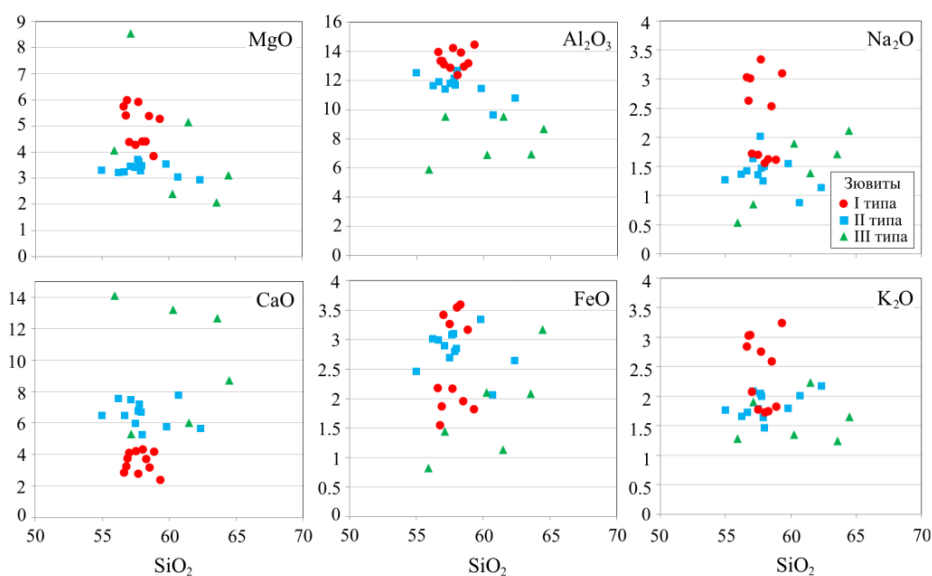
**Зювиты II типа** исследованы в южном и западном секторах Карского кратера (рис. 1). В бассейне р. Кара зювиты формируют мощный (20–30 м) и протяженный (>1 км) коренной выход с субвертикальными склонами и зубообразными формами выветривания (Максименко, 2019а; Shumilova et al., 2019). Литокласты в породах занимают около 25 об.% (рис. 2), в шлифах имеют размеры до 2 см. Среди них преобладают кварц-серицитовые, серицит-кварцевые, хлоритовые, углеродистые и мусковитовые сланцы; глинистые, кремнистые и мраморизованные известняки; известковистые песчаники, алевропесчаники и алевролиты, реже силициты, аргиллиты и угли (рис. 3, 4) (Максименко и др., 2020).

В долине р. Саяха зювиты образуют мощный (~15 м) непротяженный (~120 м) выход с крутыми углами склонов (Максименко, 2020). Породы отличаются низким содержанием литокластов (~15 об.%) (рис. 2) с преобладанием известковистых алевролитов, алевропесчаников, песчаников и известняков (рис. 3) (Максименко, 2020).

**Зювиты III типа** изучены в юго-западном секторе Карской астроблемы (бассейн р. Сопчаю) (рис. 1), где слагают протяженные (>500 м) маломощные (до 10 м) скальные выходы с пологими склонами и мощной осыпью (Максименко, 2019a; Shumilova et. al., 2019). Породы отличаются относительно высоким содержанием литокластов (~25 об.%) (рис. 2), преобладанием обломков углеродистых, кварц-серицитовых, серицит-кварцевых, хлоритовых сланцев и углей, реже известковистых и глинистых алевролитов, известняков, в редких случаях силицитов и кварцевых долеритов (рис. 3, 4). Размер литокластов в шлифах достигает 1.5 см (Максименко и др., 2020).

### Вещественная характеристика зювитов

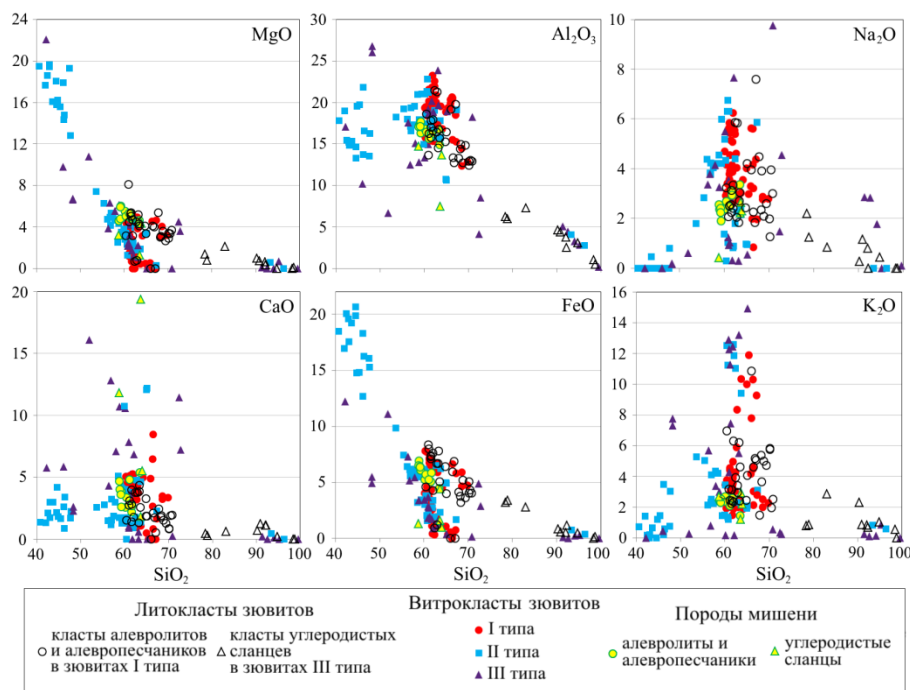
Петрохимически типы зювитов Карской астроблемы относятся к среднекислым разностям (рис. 5). **Зювиты I типа** характеризуются повышенными концентрациями  $Al_2O_3$ , FeO,  $TiO_2$ , MgO и оксидов щелочей, что может свидетельствовать о существенно алюмосиликатном составе их протопород – предположительно, полимиктовых песчаников и алевролитов. **Зювиты II типа** отличаются повышенным содержанием CaO и  $CO_2$ , что может указывать на преимущественно карбонатный состав их протолита – предположительно, глинистых известняков. **Зювиты III типа** характеризуются широкими вариациями состава, относительно низким содержанием оксидов щелочей.



**Рисунок 5.** Вариационные диаграммы петрогенных компонентов типов зювитов Карской астроблемы (силикатные анализы, мас.%).

Состав кластов импактных стекол, алевролитов и алевропесчаников в **зювитах I типа** в целом близок составу соответствующих пород мишени по содержанию  $Al_2O_3$ , FeO, MgO,  $Na_2O$  и CaO (рис. 6), что может свидетельствовать об образовании исследованных витрокластов в основном по данному типу пород мишени. Импактные стекла **зювитов II типа** в сравнении с глинистыми известняками мишени, характеризуются более высокой концентрацией большинства породообразующих компонентов, за исключением CaO. С учетом результатов экспериментальных исследований импактного процесса с участием глинистых известняков (Уляшев, Исаенко, 2018) предполагается, что формирование витрокластов зювитов II типа связано, преимущественно, с глинистой составляющей известняков мишени. Выявленная близость состава высококремнеземистых импактных

стекло зювитов II типа и фрагментов углеродисто-кремнистых сланцев зювитов III типа (рис. 6) может указывать на образование таких стекол преимущественно по этим породам мишени. Класты высококремнеземистых импактных стекол и углеродисто-кремнистых сланцев в **зювитах III типа** характеризуются схожим составом по содержанию  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  (рис. 6), что может указывать на формирование этих витрокластов по данным породам мишени (Максименко и др., 2020).



**Рисунок 6.** Вариационные диаграммы петрогенных компонентов лито- и витрокластов зювитов Карской астроблемы и пород мишени (площадные микрозондовые анализы и данные силикатных анализов, нормированные без учета ппп, мас.%).

Выявленные особенности подтверждают генетическую связь каждого типа зювитов с его предполагаемым преобладающим протолитом, и указывают на то, что различия вещественного состава типов обусловлены, главным образом, исходной спецификой состава материнских пород. Полученные данные подтверждают справедливость типового разделения обломочных импактитов Карской астроблемы. Установлено, что определяющим критерием петрологической типизации зювитов Карского кратера является состав литокластов. В зювитах I типа среди литокластов преобладают алевролиты и алевропесчаники. Зювиты II типа имеют пестрый состав литокластов с высоким содержанием фрагментов известняков (до 30 об. %). Зювиты III типа отличаются преобладанием фрагментов углеродистых сланцев и углей (Максименко и др., 2020).

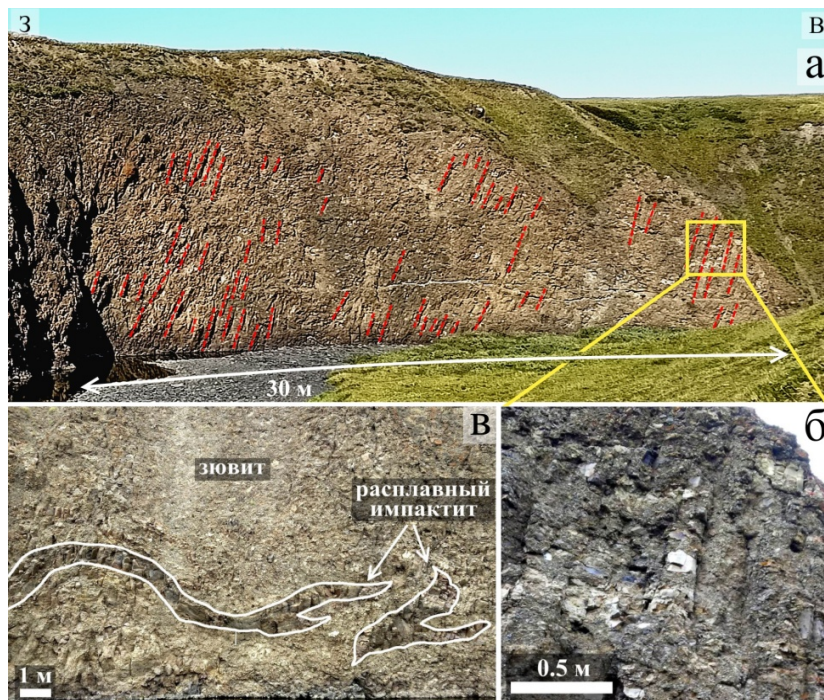
**2. Зювиты донной фации в Карской астроблеме характеризуются комплексом признаков – столбчатой отдельностью, субпараллельно ориентированными витрокластами неправильной формы, спекшимися с матриксом; зювиты аэродинамической фации – чешуйчатой и черепитчатой отдельностью, четкими очертаниями, угловатой и аэродинамической формой витрокластов.**

Защищаемое положение обосновано в 4 главе, базируется в том числе на данных комплексного исследования трех типов зювитов, описанных в главе 3, и литературных данных по импактитам, представленных в главе 1 (раздел «Механизмы образования импактитов»).

Как было показано в предыдущем разделе, три типа зювитов характеризуются петрографическими и петрохимическими различиями, обусловленными преимущественно

составом их преобладающего протолита. В то же время, при исследовании выявлено, что зювиты имеют отличия, которые не могут быть объяснены только различием состава их протопород, и могут быть связаны с разными фаціальными обстановками формирования.

Зювиты в долине р. Анарога находятся в тесных, сложных взаимоотношениях с расплавленными импактитами (Shumilova et. al., 2019), которые вдаются рукавообразным клином в зювиты (рис. 7в), что свидетельствует о динамическом взаимодействии и перемешивании расплавленного и обломочного материала во время движения. В северо-восточной части обнажения зювиты имеют неясно выраженную столбчатую отдельность (рис. 7а,б), что характерно для расплавленных импактитов донной фации (Фельдман, Глазовская, 2018).

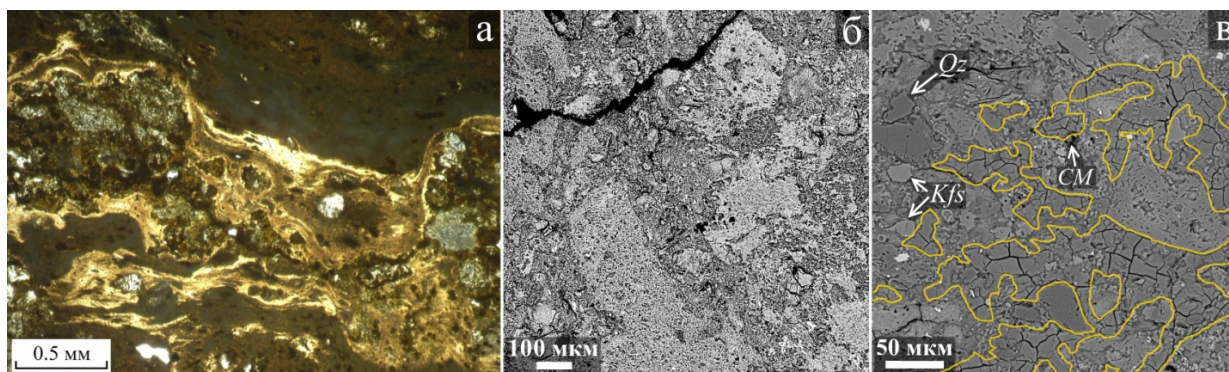


**Рисунок 7.** Выход зювитов на правом берегу р. Анарога: а, б – столбчатая отдельность зювитов (выделена штрихом), в – тесные взаимоотношения зювитов и расплавленных импактитов.

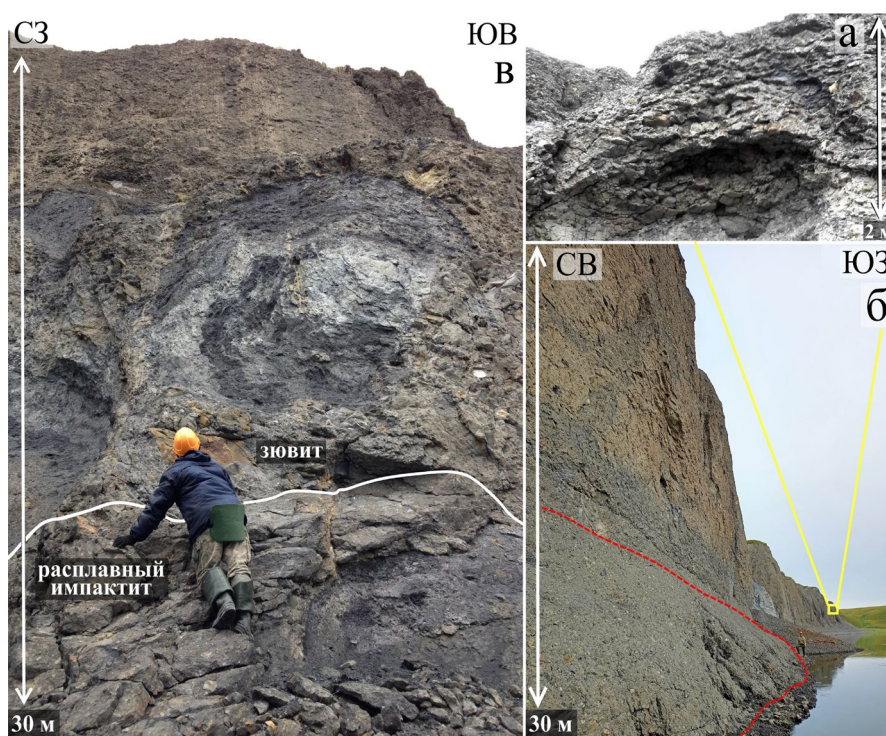
Зювиты на р. Анарога представляют собой массивные, плотные, низкопористые породы (поры составляют <1 об.% (Zubov et. al., 2021)) с высоким содержанием импактных стекол (~35 об.%) (рис. 2), что является характерной особенностью донных отложений (Вишневский, 1992). Витрокласты имеют неправильную форму, преимущественно флюидальную текстуру, субпараллельную ориентировку (рис. 8а), неровные, пламенивидные очертания (рис. 8а,б) и нечеткие, спекшиеся с матриксом границы (рис. 8б) (Максименко и др., 2020), что указывает на их горячее, пластичное состояние и перемещение вместе с кластическим материалом. Матрикс представляет собой смесь, состоящую из минеральных частиц (ортоклаза, кварца, мусковита, хлорита, кальцита, пирита, титанита, титаномагнетита, рутила и частиц углеродистого вещества), и аутоморфных включений застывшего импактного расплава (Максименко, 2018; Максименко, Исаенко, 2019), что обуславливает брекчиевую и аутоморфную текстуру основной массы (рис. 8в). Матрица характеризуется плотным строением, низкой пористостью (первые проценты), некрупными порами (<10 мкм). Выявленные признаки указывают на то, что зювиты на р. Анарога были образованы в условиях донной фации.

Зювиты, исследованные в бассейне р. Кара, в обнажении характеризуются черепитчатой отдельностью (рис. 9а), в нижней части имеют положительно выдающийся в

рельефе подушкообразный выступ (рис. 9б). В северо-западной, нижней части обнажения зювиты залегают на расплавленных импактитах, с которыми имеют нечеткие контакты (рис. 9в). На макроуровне зювиты представляют собой массивные, хрупкие и достаточно пористые породы (поры составляют ~7 об.% (Zubov et. al., 2021)).



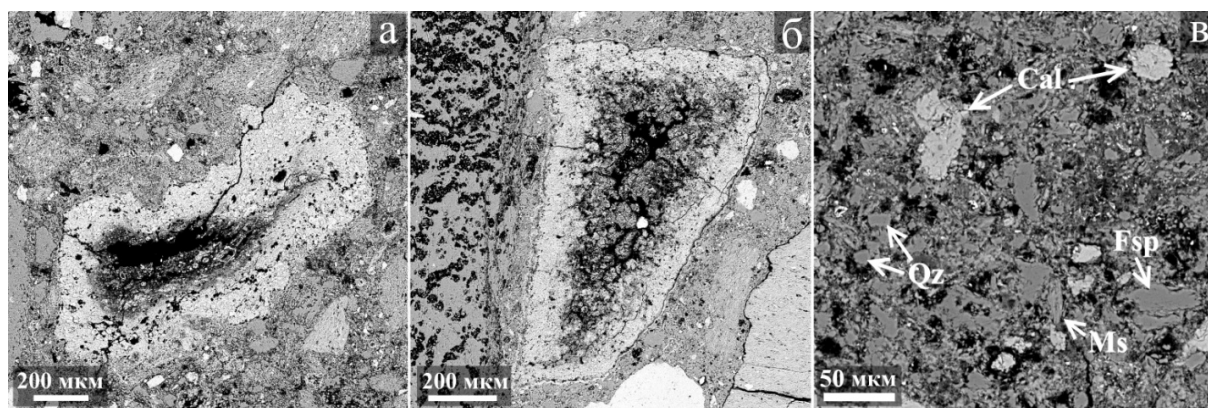
**Рисунок 8.** Признаки донной фации (зювит на р. Анарога): а – субпараллельно ориентированные импактные стекла неправильной формы с флюидальной текстурой и причудливыми очертаниями (фото шлифа без поляризатора), б – импактные стекла неправильной кляксообразной формы с нечеткими очертаниями, в – матрикс с включениями застывшего импактного расплава (выделены контуром) и аутоморфной текстурой (СЭМ-изображения, BSE).



**Рисунок 9.** Обнажение зювитов на правом берегу р. Кара: а – черепитчатая отдельность зювитов, б – подушкообразный выступ в нижней части выхода зювитов (выделен штрихом), в – контакт зювитов и расплавленных импактитов.

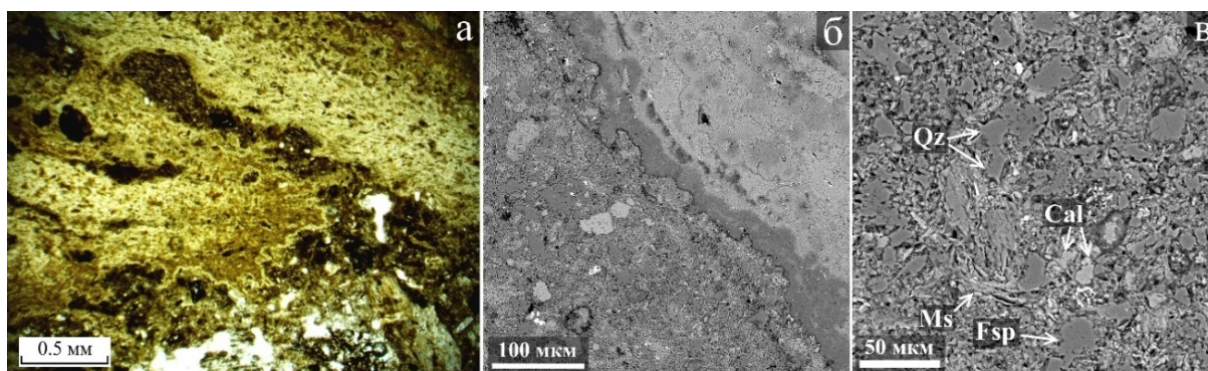
Зювиты на р. Кара неоднородны по содержанию и специфике импактных стекол и матрикса. В породах содержится около 20 % витрокластов (рис. 2), в шлифах они имеют размеры 0.7–4 мм, характеризуются желтовато- или зеленовато-коричневато-серым цветом. Форма витрокластов аэродинамическая и угловатая (рис. 10а,б), что указывает на застывание импактного расплава в условиях воздушной транспортировки и дробления. Текстура фрагментов импактных стекол преимущественно массивная и пористая, реже флюидальная, границы с матриксом четкие (рис. 10а,б), что свидетельствует об их

попадании в зювит охлажденными, в застывшем или полупластичном состоянии. Матрикс занимает 40–45 об.% пород (рис. 2), представлен пористой глинисто-слюдяной массой (поры занимают до 15 об.%), выполненной кластами кварца, альбита и кальцита, в меньшей степени слюдами, частицами углеродистого вещества, гранатом, единично анатазом и магнетитом, имеет брекчиевую текстуру (рис. 10в) (Максименко, Исаенко, 2019).



**Рисунок 10.** Признаки аэродинамической фации (зювит на р. Кара): а – пористое импактное стекло лепешкообразной формы с четкими очертаниями, б – импактное стекло угловатой формы с четкими очертаниями, в – матрикс с брекчиевой текстурой (СЭМ-изображения, BSE).

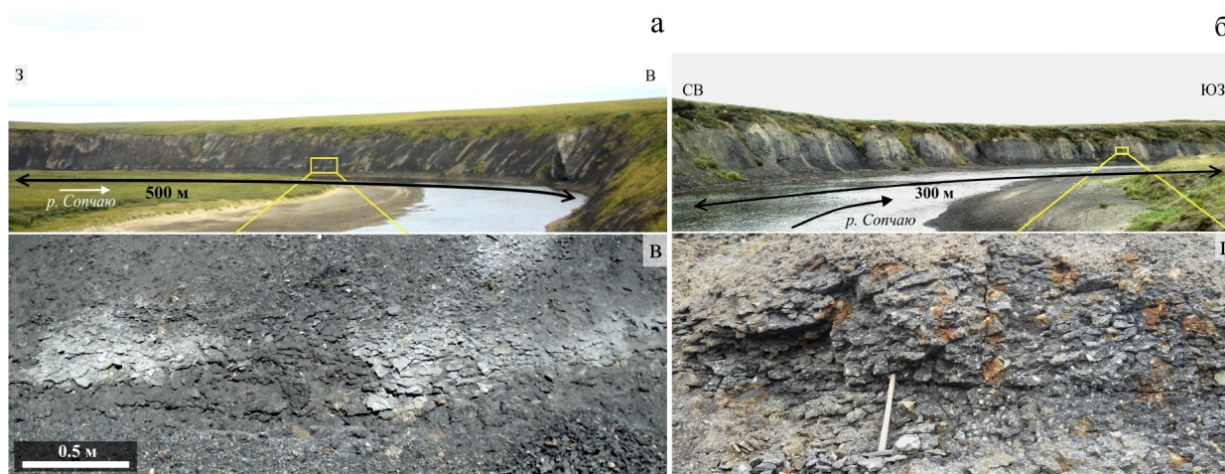
В зювитах из подушкообразного выступа в нижней части обнажения на р. Кара содержание витрокластов существенно выше (~30 об.%) (рис. 2) они отличаются преимущественно флюидалной текстурой, удлинённой неправильной формой, нечеткими, неровными очертаниями со сложными взаимными переходами в матрикс, иногда расположены субпараллельно (рис. 11а,б). Данные признаки указывают на их горячее состояние и транспортировку совместно с обломочными компонентами движущимся потоком. Матрикс зювитов из нижней части обнажения на р. Кара отличается плотным строением и низкой пористостью (~5 об.%), имеет брекчиевую текстуру (рис. 11в).



**Рисунок 11.** Признаки донной фации (зювит на р. Кара, нижняя часть обнажения): а – субпараллельно ориентированные импактные стекла неправильной формы с пламенивидными очертаниями (фото шлифа без поляризатора); б – импактное стекло с причудливыми очертаниями, в – матрикс с брекчиевой текстурой (СЭМ-изображения, BSE).

Вышеуказанные признаки позволяют прийти к заключению, что зювиты на р. Кара были сформированы при выбросе, осаждении и захоронении материала из взрывного облака и относятся к фации аэродинамических выбросов. В то же время, специфика зювитов из нижней части обнажения на р. Кара указывает на их формирование в условиях донной фации.

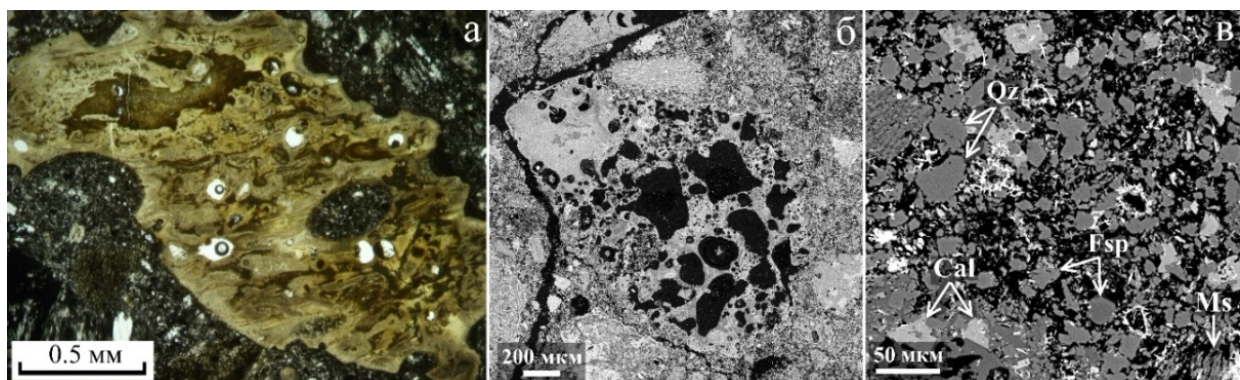
Зювиты в обнажениях на р. Сопчаю с поверхности разбиты сетью трещин, характеризуются черепитчатой или чешуйчатой отдельностью (рис. 12), участками изменены до сыпучего состояния. Породы отличаются хрупкостью и относительно высокой пористостью (~14 об.% (Zubov et. al., 2021)), низким содержанием витрокластов (~15 об.%) (рис. 2). Слабосцементированный характер литификации и низкое содержание витрокластических компонентов являются характерными особенностями отложений взрывного облака (Вишневский, 1992).



**Рисунок 12.** Обнажения зювитов на левом берегу р. Сопчаю; чешуйчатая (в) и черепитчатая (г) отдельность зювитов.

Импактные стекла характеризуются аэродинамической и угловатой формой с четкими очертаниями (рис. 13а,б) (Максименко и др., 2020), что указывает на их формирование в условиях воздушного переноса, относительно быстрого отвердевания и дробления. Текстура стекол преимущественно пористая, иногда пузыристая (рис. 13а,б), реже массивная, флюидальная, что свидетельствует об образовании витрокластических компонентов в благоприятных обстановках газоотделения, соответствующих условиям формирования верхних горизонтов коптогенного комплекса (Фельдман, 1990; Базилевский и др., 1983). Матрикс существенно пористый (поры составляют ~15 об.%), характеризуется брекчиевой текстурой, выполнен кварцем, кальцитом, ортоклазом, реже углеродистыми частицами, слюдами, хлоритом (рис. 13в) (Максименко, Исаенко, 2019). Выявленные особенности позволяют заключить, что зювиты на р. Сопчаю были сформированы в условиях аэродинамической фации.

На основе полученных данных и анализа литературы по импактитам определен комплекс признаков фациального расчленения зювитов (табл. 1), включающий характер контактов с расплавленными импактитами, отдельность, форму витрокластов, текстуру матрикса и другие признаки (Максименко, 2022; Максименко, Шумилова, 2022).



**Рисунок 13.** Признаки аэродинамической фации (зювит на р. Сопчаю): а – пористое импактное стекло S-образной формы с четкими очертаниями (фото шлифа без поляризатора), б – импактное стекло лепешкообразной формы с пемзовидной текстурой и четкими очертания, в – матрикс с брекчиевой текстурой (СЭМ-изображения, BSE).

**Таблица 1.** Комплекс признаков фациального расчленения зювитов по (Максименко, Шуилова, 2022).

Признаки	Зювиты аэродинамической фации	Зювиты донной фации
<i>Макроскопические признаки</i>		
Характер контактов с расплавленными импактитами (тагамитами)	Отсутствует	Тесные взаимоотношения с расплавленными импактитами, сложные переходы одних пород в другие <sup>1,2</sup>
Отдельность	Черепитчатая, чешуйчатая	Столбчатая <sup>3-6</sup> или отсутствует
Характер литификации породы в целом	Слабосцементированный <sup>7</sup> , пористость высокая <sup>1</sup>	Плотносцементированный <sup>1,7</sup> , пористость низкая или отсутствует
Содержание импактных стекол	Низкое <sup>1</sup>	Высокое <sup>1</sup>
Ориентировка импактных стекол	Отсутствует	Субпараллельная ориентировка удлиненных импактных стекол <sup>8</sup>
Форма импактных стекол	Угловатая и аэродинамическая <sup>2,9,10</sup>	Неправильная <sup>7</sup> , удлиненная, с расщепленными, «размочаленными», пламенивидными очертаниями <sup>2</sup>
<i>Микроскопические признаки</i>		
Содержание импактных стекол	Низкое <sup>1</sup>	Высокое <sup>1</sup>
Ориентировка импактных стекол	Отсутствует	Субпараллельная ориентировка удлиненных импактных стекол <sup>8</sup>
Форма импактных стекол	Угловатая и аэродинамическая <sup>2,9,10</sup> с четкими границами <sup>3,11</sup>	Неправильная, удлиненная, с расщепленными, «размочаленными», пламенивидными очертаниями <sup>2</sup> , с нечеткими, спекшимися с матриксом границами <sup>2,3,11</sup>
Текстура стекол	Пористая, пемзовидная («вскипевшая») <sup>1,2,9,11</sup> , массивная, пятнистая, флюидальная	Флюидальная, полосчатая, массивная, пористая
Текстура матрикса	Брекчиевая	Аутоморфная <sup>12</sup> , брекчиевая

Примечание: 1 – (Вишневский, 1992), 2 – (Фельдман, 1990), 3 – (Фельдман, Глазовская, 2018); 4 – (Schmieder, Kring, 2020), 5 – (Малеев, 1963), 6 – Ширинян, Асланян, 1956; 7 – Masaitis et.al., 2019; 8 – (Osinski et. al., 2004), 9 – (Структуры ..., 1983), 10 – (Электронный ..., 2022), 11 – (Базилевский и др., 1983), 12 – (Сазонова, 1984).



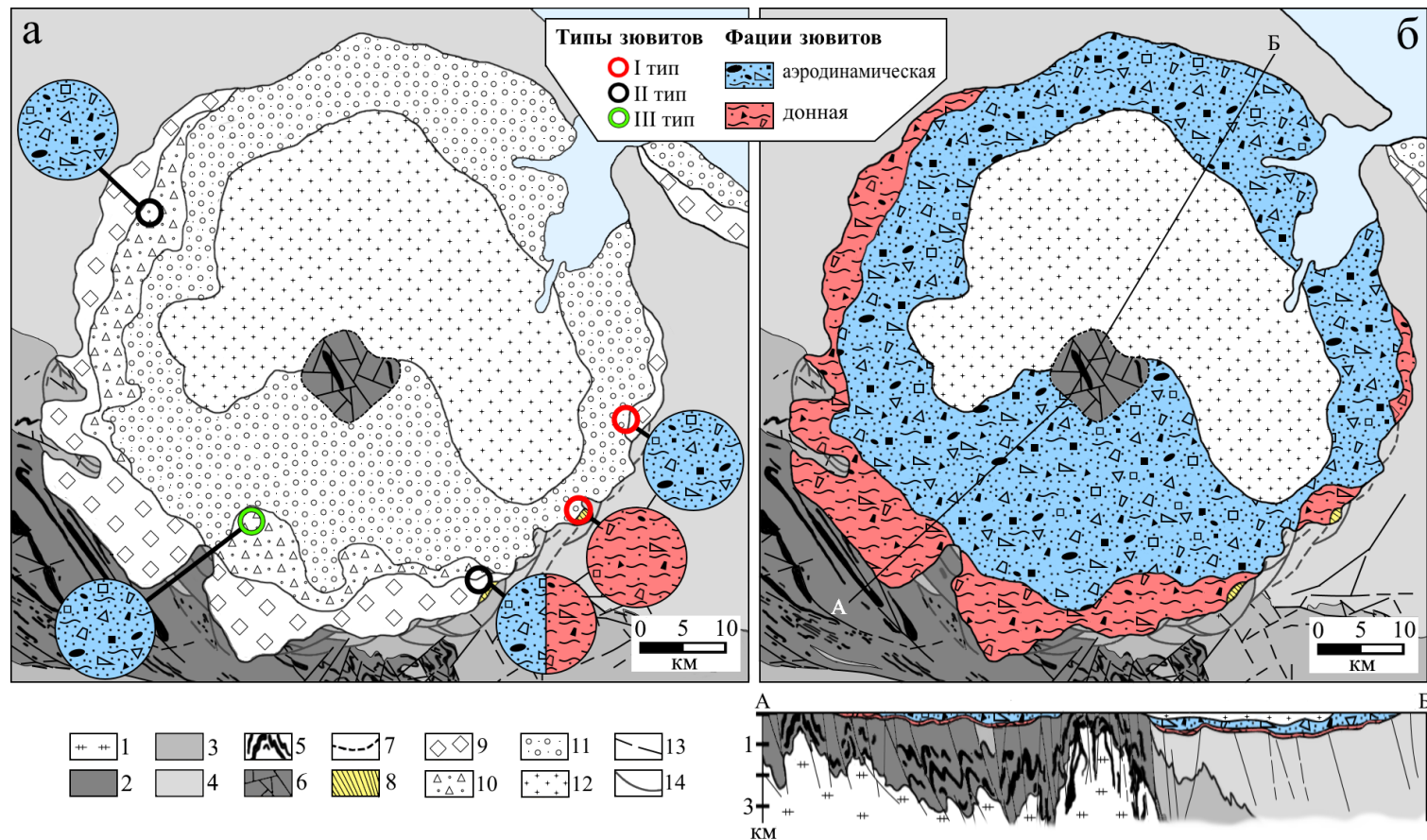
При анализе областей развития исследованных зювитов Карской астроблемы было установлено, что фации зювитов, в целом, совпадают с контурами областей распространения типов импактных пород, отличающихся размером обломочного материала, выделенных ранее при картировании (Мащак и др., 1990а, Селивановская и др., 1990). На основании этого положение выделенных фаций зювитов было экстраполировано на всю территорию астроблемы (рис. 14). Для Карской астроблемы выявлено, что зювиты донной фации приурочены к основанию коптогенного комплекса, залегают в пределах кольцевого желоба в виде относительно маломощных пластообразных отложений, прилегающих к истинному дну кратера, в современном эрозионном срезе имеют выходы на поверхность в западной, южной и, локально, в восточной областях астроблемы (рис. 14). Зювиты аэродинамической фации выполняют основной объем толщи импактитов, залегают в пределах кольцевого желоба, завершают разрез коптогенного комплекса, образуют пластообразные отложения, перекрывающие толщу донных отложений, в современном уровне эрозионного среза характеризуются обширным распространением, образуют прерывистое кольцо выходов по периферии кратера (рис. 14).

На основе полученных данных разработана схема положения фаций импактитов в разрезе коптогенного комплекса Карской структуры (рис. 15). Зювиты донной фации тесно ассоциируют с расплавленными импактитами – со взаимными переходами и включениями одних пород в других. Снизу вверх по разрезу зювиты донной фации постепенно сменяются обломочными импактитами аэродинамической фации, перекрывающимися донными зювиты (рис. 15) (Максименко, Шумилова, 2022).

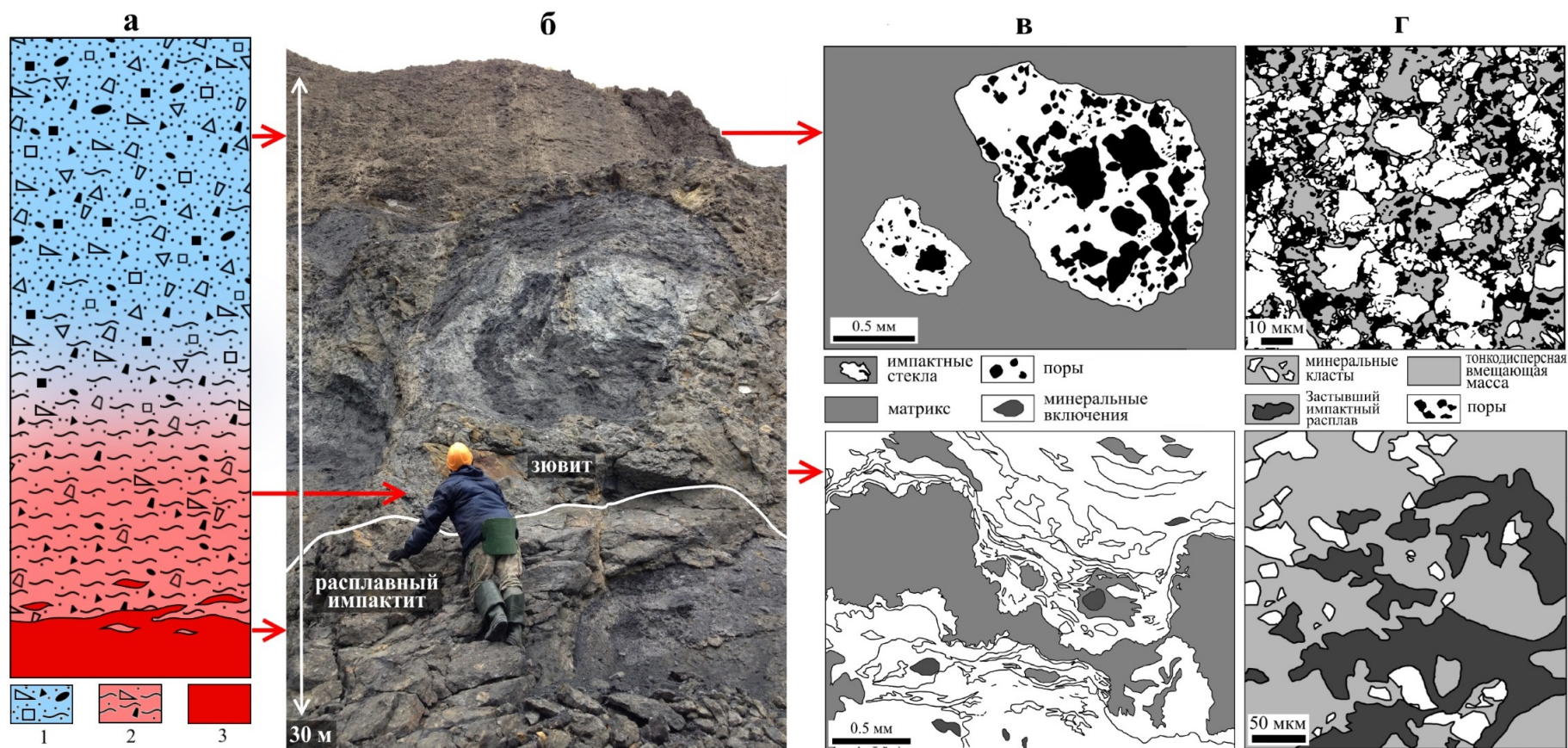
**3. Определяющим признаком температурного режима становления зювитов Карской астроблемы является характер локального спекания и плавления кварцевой и полевошпатовой компонент матрикса: аэродинамическая фация характеризуется начальной и промежуточной стадиями спекания с температурой до 1200°C; донная фация отличается заключительной стадией спекания и локальным плавлением при температуре до 1700°C.**

Защищаемое положение изложено в 4 главе и опирается на материалы, представленные в главе 3.

При анализе фациальных особенностей обломочных импактитов большое значение имеет степень их спекания (Фельдман, 1990). Выявленная специфика матрикса зювитов находит отражение в структуре керамических материалов, при образовании которых вещество проходит разные стадии спекания (Richerson, Lee, 2018 и др.). При спекании важную роль играет температура (Azis et. al., 2018; Olevsky et.al., 2000). Известно, что процесс спекания происходит «вблизи или чуть ниже температуры солидуса» (Вест, 1988). При спекании монокомпонентной системы за температуру спекания принимается значение 0.6–0.8 от температуры плавления материала (Chmielewski et. al., 2014). За температуру начальной стадии спекания можно принять значение нижней границы температуры спекания, равной 0.6 от температуры плавления, а за температуру заключительной стадии – значение верхней границы (0.8 от температуры солидуса). Соответственно, температура промежуточной стадии спекания может приниматься равной 0.7 от температуры плавления.

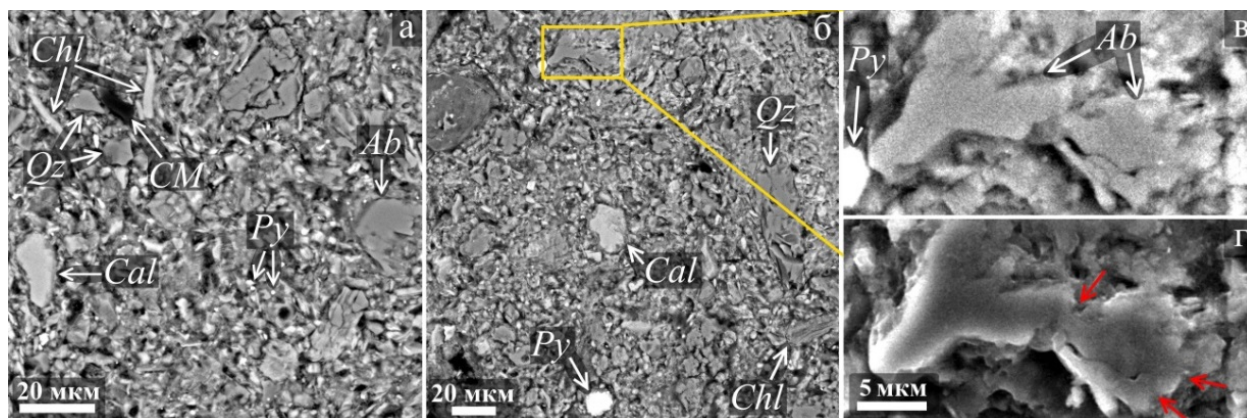


**Рисунок 14.** Расположение исследованных типов и фаций зювитов (а) и схематическое положение фаций зювитов Карского кратера (б) на схеме геологического строения Карской астроблемы по (Зархидзе, 2017; Машак, 1990а; и др.). 1 – верхнепротерозойский сланцевый комплекс, 2 – осадочно-вулканогенные породы нижнего палеозоя; 3 – осадочно-вулканогенные породы среднего палеозоя; 4 – осадочные породы перми; 5 – палеозойские долериты и габбро-долериты; 6 – аутигенные брекчии; 7 – границы центрального поднятия; 8 – расплавные импактиты (тагамиты); 9 – глыбовые брекчии, мегабрекчии и клиппеновые брекчии; 10 – глыбово-агломератовые зювиты; 11 – лапшилиево-агломератовые зювиты; 12 – глины опоковидные, песчаные, алевролиты, коптокластиты; 13 – разрывные нарушения; 14 – радиальные надвиги.



**Рисунок 15.** Принципиальная схема расположения фаций импактитов в разрезе коптогенного комплекса Карской астроблемы (вне масштаба) (а), характер взаимоотношений расплавных импактитов и зювитов в естественном выходе (б) и характерные особенности импактных стекол (в) и матрикса (г) фаций зювитов (схематичные изображения). 1 – зювиты аэродинамической фации; 2 – зювиты фации донных потоков; 3 – расплавные импактиты донной фации.

О температуре образования можно судить по определенным минералам – кварцу, полевым шпатам, магнетиту, циркону, ильмениту и другим (Stöffler et.al., 2013), из которых в матриксе зювитов Карской астроблемы наиболее распространены кварц и альбит. В зювитах аэродинамической фации эти минералы могут присутствовать в виде угловатых кластов без признаков спекания (рис. 16а) (Maksimenko, Shumilova, 2021). Более чувствителен к высоким температурам альбит. Поскольку он не имеет признаков спекания, это позволяет сделать вывод о том, что локальная температура не превышала температуру начальной стадии спекания альбита – 660 °С (0.6 от температуры плавления альбита) (Chmielewski et. al., 2014; Navrotsky et. al., 1982).

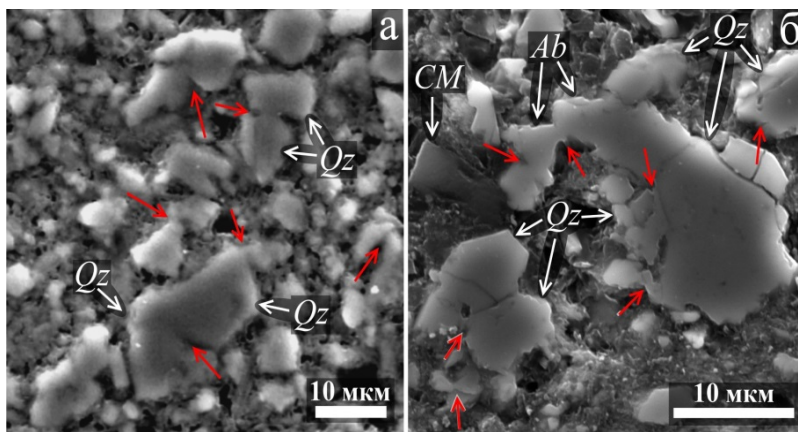


**Рисунок 16.** СЭМ-изображения матрикса зювитов аэродинамической фации: а – зювит р. Саяха, б – зювит р. Б. Вануйта (а, б, в – BSE, г – SE): Ab – альбит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, CM – углеродистое вещество, Py – пирит, Qz – кварц. Стрелками показаны смычки между спекшимися частицами.

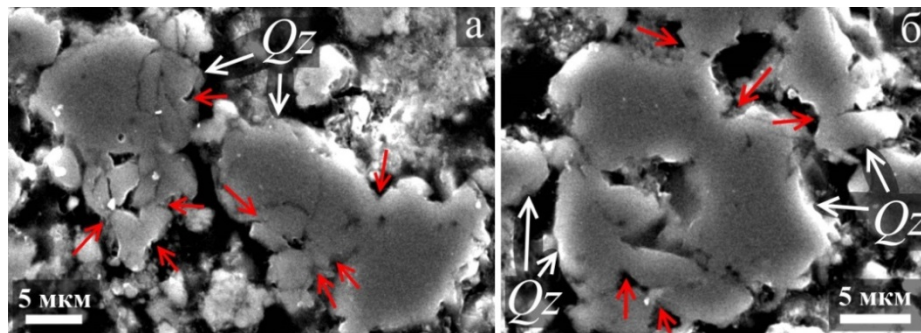
В то же время, отдельные некрупные (5–10 мкм) класты альбита могут иметь между собой перемычки или образовывать спекшиеся минеральные агрегаты с сохраненными очертаниями отдельных частиц (рис. 16в,г) (Максименко и др., в печати), что согласно (Richerson, Lee, 2018 и др.) соответствует промежуточной стадии спекания и указывает на то, что температура локально могла достигать ~770 °С (0.7 от температуры плавления альбита) (Chmielewski et. al., 2014; Navrotsky et. al., 1982).

Класты кварца размером 5–20 мкм так же могут иметь признаки припекания – маломощные (1–2 мкм) контактные перешейки, при этом сохраняют обособленные очертания частиц (рис. 17) (Максименко, 2022), что по (Richerson, Lee, 2018 и др.) отвечает начальной стадии спекания. Из этого следует, что температура локально могла достигать ~1030°С (0.6 от температуры плавления кварца) (Chmielewski et. al., 2014; He et.al., 2021).

В зювитах аэродинамической фации также выявлены спекшиеся кварцевые агрегаты с открытой и закрытой пористостью и с неровными границами между спекшимися частицами (рис. 18) (Максименко, Исаенко, 2019). Эти признаки соответствуют промежуточной стадии спекания, на которой начинается формирование закрытой пористости, но не наблюдается выпрямления границ между частицами (Richerson, Lee, 2018). Следовательно, температура локально могла достигать ~1200°С (0.7 от температуры плавления кварца) (Chmielewski et. al., 2014; He et.al., 2021)

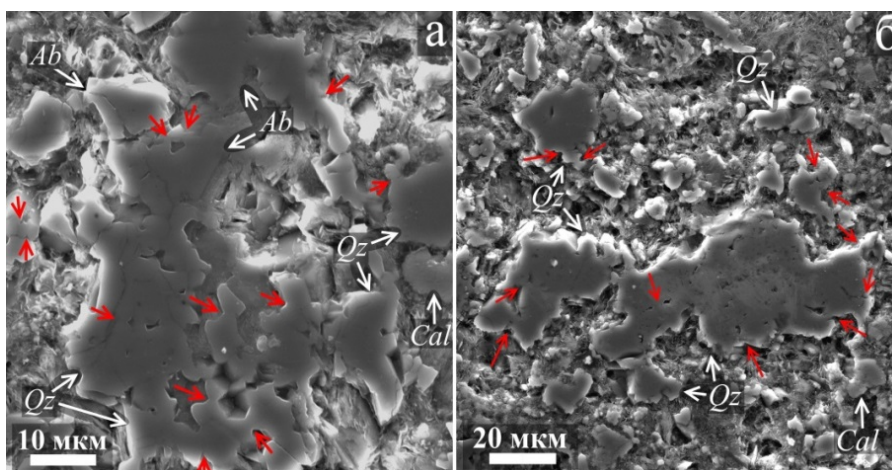


**Рисунок 17.** Припекшиеся класты кварца и альбита в матрице зювита аэродинамической фации (р. Кара) (СЭМ-изображения, SE): CM – углеродистое вещество. Стрелками показаны смычки между спекшимися частицами.



**Рисунок 18.** Спекшиеся класты кварца в матрице зювита аэродинамической фации (р. Сопчаю) (СЭМ-изображения, SE). Стрелками показаны перемычки между спекшимися минеральными частицами.

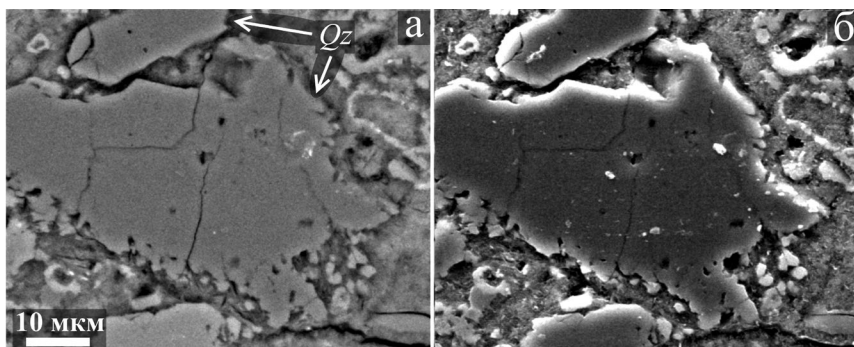
В то же время, матрикс зювитов донной фации характеризуется более высокой степенью спекания. Кварц в матрице установлен в виде спеков – сплошных низкопористых обособленных включений, состоящих из спекшихся минеральных частиц (рис. 19) (Максименко, 2018; Maksimenko, Shumilova, 2022). Поры в спеках не крупные (1–5 мкм) закрытые неправильной, округлой или «полигранной» формы. Границы между частицами в пределах спеков ровные. Данные признаки по (Richerson, Lee, 2018) указывают на заключительную стадию спекания. Из этого следует, что температура локально могла достигать около 1370°C (0.8 от температуры плавления кварца) (Chmielewski et. al., 2014; He et. al., 2021).



**Рисунок 19.** Кварцевые спекы в матрице зювитов донной фации (р. Кара) (СЭМ-изображение, SE). Стрелками показаны смычки между спекшимися частицами

Кроме того, в матрице установлены кварцевые класты размером 10–40 мкм с признаки частичного плавления – со сглаженными и рваными очертаниями и мелкими

округлыми порами (рис. 20) (Максименко, Исаенко, 2019). Такие класты частично сохраняют угловатую форму, что свидетельствует об их плавлении уже после попадания в зювит. Это указывает на то, что температура локально достигала температуры плавления кварца  $\sim 1700^{\circ}\text{C}$  (He at.al., 2021), но кратковременно, о чем можно судить по сохранившимся угловатым очертаниям таких обломков.



**Рисунок 20.** Частично расплавленное включение кварца в матрице зювита донной фации (р. Анарога) (СЭМ-изображение: а – BSE, б – SE).

Таким образом, при образовании обломочных импактитов Карской астроблемы имело место локальное спекание и плавление кварцевой и полевошпатовой компонент в объеме отдельных участков матрикса. Установлено, что температурный режим становления зювитов аэродинамической фации локально достигал  $1200^{\circ}\text{C}$ , зювитов донной фации –  $1700^{\circ}\text{C}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований впервые получена детальная комплексная характеристика обломочных импактитов Карской астроблемы. С применением комплекса современных методов выяснены геологические, петрографические и вещественные особенности трех типов зювитов, их литокластов, витрокластов и матрикса.

В ходе выполнения поставленных задач установлено, что анализируемые типы зювитов характеризуются существенными различиями на всех уровнях проведенных исследований. Они отличаются характером взаимоотношений с расплавленными импактитами (тагамитами) и формами выветривания обнажений, макроскопически имеют различия окраски, пористости, размера обломочного материала и состава литокластов. На микроуровне типы зювитов отличаются соотношением расплавленных и обломочных компонентов и матрикса; преобладанием разных литологических типов пород в составе литокластов; структурно-текстурными и морфологическими особенностями импактных стекол; характером литификации матрикса. Во всех типах зювитов зафиксированы признаки ударного воздействия, соответствующие четырем стадиям импактного метаморфизма.

Витрокласты зювитов I типа имеют выдержанный состав по содержанию  $\text{SiO}_2$  ( $\sim 60$  мас.%), повышенное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\sim 19$  мас.%),  $\text{K}_2\text{O}$  (до 12 мас.%) и  $\text{CaO}$  до (8 мас.%). Импактные стекла зювитов II и III типов отличаются вариациями содержаний  $\text{SiO}_2$  – от 34 до 81 мас.% для зювитов II типа и 30–99 мас.%  $\text{SiO}_2$  для зювитов III типа. Матрикс зювитов I типа содержит  $\sim 60$  мас.%  $\text{SiO}_2$ , имеет повышенное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\sim 12$  мас.%),  $\text{MgO}$  ( $\sim 3$ –15 мас.%) и  $\text{FeO}$  ( $\sim 5$ –20 мас.%), и низкое –  $\text{CaO}$  ( $\sim 3$  мас.%). Матрица зювитов II типа характеризуется повышенным содержанием  $\text{SiO}_2$  ( $\sim 74$  мас.%),  $\text{CaO}$  ( $\sim 0.7$ –16 мас.%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\sim 4$ –15 мас.%) и  $\text{K}_2\text{O}$  (0.5–4 мас.%). Зювиты III типа характеризуются матриксом с относительно высоким содержанием кремнезема ( $\sim 75$  мас.%) и  $\text{CaO}$  ( $\sim 5$ –24

мас.%). Выявлена близость состава каждого типа зювитов с составом его предполагаемого преобладающего протолита – зювитов I типа с алевролитами и алевропесчаниками, зювитов II типа с карбонатными породами, зювитов III типа с углеродистыми сланцами.

Результаты проведенных исследований позволяют подтвердить обоснованность типового разделения зювитов Карской астроблемы по вещественному составу, отличия которого у трех типов зювитов обусловлены, главным образом, исходной спецификой состава материнских пород мишени. Выявлено, что диагностическим критерием петрологической типизации зювитов Карского кратера является состав преобладающих литокластов.

Впервые предложен комплекс признаков фациального расчленения зювитов, который может быть использован для диагностики фаций обломочных импактитов астроблем в целом. Среди зювитов Карской импактной структуры охарактеризованы породы аэродинамической фации и фации донных потоков. Для зювитов донной фации Карского кратера характерна столбчатая отдельность и высокое содержание (до 35 об. %) субпараллельно ориентированных витрокластов неправильной формы, спекшихся с матриксом. Матрица донных зювитов содержит кварцевые класты с признаками заключительной стадии спекания и частичного плавления, указывающими на температуру формирования до 1700°C. Для зювитов аэродинамической фации характерны чешуйчатая и черепитчатая отдельность, низкое содержание (до 20 об. %) витрокластов угловатой и аэродинамической формой с четкими очертаниями, класты кварца и альбита в матриксе с признаками начальной и промежуточной стадий спекания, свидетельствующие о температуре образования до 1200°C.

Определены положение и характер взаимоотношений фаций зювитов в структуре Карской астроблемы. Зювиты донной фации в Карской астроблеме образуют пластообразные отложения, залегают в нижней части коптогенного комплекса. Донные зювиты находятся в тесных взаимоотношениях с расплавленными импактитами, прилегающими ко дну кратера. Зювиты взрывного облака залегают в верхней части Карского коптогенного комплекса в виде пластообразных отложений султана выбросов, с постепенным переходом залегают на зювитах донной фации. Выявленный характер взаимоотношений фаций импактитов может быть использован для уточнения строения коптогенного комплекса Карской астроблемы. Результаты проведенных исследований имеют значение для решения фундаментальных вопросов импактитогенеза и совершенствования принципиальной модели образования крупных метеоритных кратеров, что может быть использовано при картировании крупных астроблем и прогнозировании связанных с ними полезных ископаемых.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях из перечня ВАК и международных баз цитирования

1. Shumilova T., **Maximenko N.**, Zubov A., Kovalchuk N, Ulyashev V., Kis V. Varieties of Impactites and Impact Diamonds of the Kara Meteorite Crater (Pay-Khoy, Russia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.– 2019. – V. 362. – P. 012043.

2. **Максименко Н.И.**, Шумилова Т.Г., Ковальчук Н.С. Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) // Петрология. – 2020. – Т. 28, – № 6. – С. 628–649.

3. 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. – P. 012052.

4. **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. – V. 906. – P. 012088.

5. **Максименко Н.И.**, Шумилова Т.Г. Критерии фациального деления зювитов (на примере зювитов Карской астроблемы) // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №10 (124).

6. **Максименко Н.И.**, Шумилова Т.Г., Уляшев В.В. Комплексная характеристика зювитов р. Б. Вануйта (Карская астроблема) // Литосфера. – 2023. – № 5 (в печати).

#### **Статьи в прочих журналах**

1. **Максименко Н.И.** Структурно-вещественные особенности матрикса разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. – 2019. – № 10. – С. 150–151.

2. **Максименко Н.И.** Структурно-текстурные и петрохимические особенности зювитов на р. Саяха (Карская астроблема, Россия) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. – 2020. – № 11. – С. 169–171.

#### **Материалы всероссийских и международных конференций**

1. **Максименко Н.И.**, Исаенко С.И. Структурно-текстурные особенности и фазовый состав матрикса разновидностей зювитов Карской астроблемы // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2019. – Т. III. – С. 206–207.

2. Shumilova T., **Maximenko N.**, Zubov A., Kovalchuk N., Ulyashev V., Kis V. Varieties of Impactites and Impact Diamonds of the Kara Meteorite Crater (Pay-Khoy, Russia). Abstract book: 6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium – WMESS. – 2019.

3. **Максименко Н.И.** Петрохимическая характеристика разновидностей зювитов и пород мишени Карской астроблемы (Пай-Хой) // Сборник тезисов докладов всероссийской молодежной геологической конференции памяти В.А. Глебовицкого. СПб.: Изд-во ВВМ. – 2020. – С. 56–57.

4. **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. – 2020. – С. 341–342.

5. **Maksimenko N.**, Shumilova T. Petrographic and petrochemical characteristics of suevite matrix, western part of the Kara Astrobleme (Russia) // Abstract book: 7th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS-2021). – 2021.

6. **Максименко Н.И.** Фациальные особенности зювитов Карской астроблемы // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 31-й Всероссийской научной конференции. Сыктывкар. – 2022. – С. 76–79.