

УДК 553+550.4

ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЗЮВИТОВ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ (ПАЙ-ХОЙ, РОССИЯ)¹

© 2020 г. Н. И. Максименко^а, *, Т. Г. Шумилова^а, Н. С. Ковальчук^а

^аИнститут геологии им. академика Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

*e-mail: nadiamaximenko@mail.ru

Поступила в редакцию 10.03.2019 г.

После доработки 22.12.2019 г.

Принята к публикации 29.12.2019 г.

Впервые представлена подробная минералого-петрографическая характеристика обломочной компоненты трех разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) при изучении обломочных импактитов. Рассмотрены особенности морфологии, внутреннего строения, элементного и фазового состава импактных стекол зювитов. Полученные данные подтверждают справедливость предложенного типового разделения исследованных пород. Во всех разновидностях зювитов установлено присутствие важнейших минералов-индикаторов импактного процесса с признаками всех основных стадий ударного метаморфизма и постимпактной гидротермальной минерализации. Результаты исследований будут способствовать выявлению новых и переходных типов зювитов с целью полной характеристики карских импактитов, а также могут быть использованы при построении генетической модели формирования данного уникального объекта и других астроблем.

Ключевые слова: Карская астроблема, зювиты, импактный метаморфизм, импактные стекла

DOI: 10.31857/S0869590320050039

ВВЕДЕНИЕ

Термин “зювит” изначально был предложен Е. Зауером в 1920 г. для обозначения туфовидных пород кратера Рис в Германии (Структуры ..., 1983; Фельдман, 1990; Вишневецкий, 2007). Введение термина “импактит” Х.Б. Штенцелем в 30-х годах прошлого века было связано с изучением стекол, образующихся из импактного расплава.

Первые системные геологические исследования импактитов были произведены в 70-е годы прошлого века. В это же время были предприняты попытки классификации зювитов. Зювиты кратера Рис по условиям образования были разделены на выброшенные (fallout) и возвращенные (fallback) (Pohl et al., 1977). Зювиты Попигайского кратера по содержанию фрагментов стекла в свое время были подразделены на витро- и кристалловитрокластические. Позднее зювиты земных астроблем предлагалось подразделить на генетические группы, что оказалось неприемлемым в силу слабой изученности данных пород (Фельдман, 1990). С.А. Вишневецкий предлагал называть зювитами породы, образующиеся из взрывного облака (Вишневецкий, 2007).

При этом петербургская школа, возглавляемая В.Л. Масайтисом, осталась на позициях петрографического подхода, в соответствии с которым зювиты были подразделены на витро-, эпивитро- и витроэпикластические в зависимости от количественных соотношений обломков импактных стекол, пород и минералов, а по гранулометрическому составу кластов – на мелко-, средне-, крупно- и грубообломочные, лапиллиевые, агломератовые и глыбовые (Структуры ..., 1983; Импактные ..., 1990; Классификация ..., 1992; Масайтис и др., 1998).

В настоящее время термин “импактит” в иностранной литературе и некоторыми отечественными исследователями используется для обозначения всех пород, затронутых воздействием сверхзвукового удара, возникшего при столкновении космических тел с поверхностью Земли (Фельдман, 1990; Stöffler, Grieve, 2007). В русскоязычной литературе под импактитами понимаются разновидности импактных пород, состоящие более чем на 10% из продуктов охлаждения и кристаллизации импактных расплавов, а также включений ударно-метаморфизованных обломков пород и минералов (Структуры ..., 1983; Геологический ..., 2010). Русская систематика предполагает разделение импактитов на коптогиалиниты (импактные пемзы,

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi: 10.31857/S0869590320050039 для авторизованных пользователей.

шлаки), тагамиты и зювиты (Классификация ..., 1992; Петрографический ..., 2008).

Под “зювитом” сегодня понимается литифицированная брекчия, сложенная обломками импактных стекол, пород и минералов, сцементированных тем же тонкораздробленным материалом (Структуры ..., 1983; Масайтис и др., 1998; Геологический ..., 2010; Stöffler et al., 2018). В настоящей работе мы придерживаемся данного значения термина “зювит”.

Карская астроблема на сегодняшний день представляет собой слабоосвещенную в публикациях импактную структуру, располагающуюся в Арктической зоне европейской части России. Она является весьма привлекательным и перспективным для изучения объектом, активно исследуемым в настоящее время. Согласно вышеуказанной номенклатуре разновидностей зювитов, петербургской школой зювиты Карской астроблемы были подразделены на лапиллиево-агломератовые, глыбовые и глыбово-агломератовые разновидности по размеру обломков, а также на витролитокластические, витрокластические, литовитрокластические и грановитрокластические различия по преобладающему типу обломочного материала (Импактные ..., 1990; Фельдман, 1990).

Несмотря на ряд вышеупомянутых работ, петрографического описания и типовой вещественной классификации карских зювитов ранее так и не было произведено. В связи с этим актуальным и наиболее важным на данный момент является дальнейшее углубленное и всестороннее исследование зювитов Карской астроблемы, представляющих основную объем импактитов данного объекта. В 2015 г. зювиты Карской астроблемы по геоморфологическим, структурно-текстурным признакам, минералогическому и петрохимическому составу были разделены на три типа, сформированные, предположительно, по различному преобладающему первичному субстрату (Шумилова и др., 2016, 2018).

Цель настоящей работы – комплексное исследование кластогенной компоненты разновидностей зювитов Карской астроблемы в связи с необходимостью установления на микроуровне минералого-петрологических различий между выделенными ранее типами зювитов, а также их петрохимического и геохимического своеобразия для подтверждения справедливости типового разделения данных пород (Шумилова и др., 2016, 2019).

Геологическая позиция объекта исследований

Карский метеоритный кратер расположен на северо-восточном крыле Пайхойского антиклинория (Югорский полуостров), в бассейне нижнего течения р. Кара, в 200 км севернее г. Воркуты

(рис. 1). Карская импактная структура образует слабовыраженную в современном рельефе впадину диаметром около 65 км и является одной из крупнейших известных в России астроблем, наряду с Попигаической (100 км в диаметре) и Пучеж-Катунской (80 км) (Импактные ..., 1990; Масайтис и др., 1998).

С начала XIX века необычное геологическое строение Карской кольцевой структуры, своеобразие и оригинальность слагающих ее пород привлекало внимание многих исследователей. Выходы брекчий по р. Каре изначально предлагалось отнести к тиллитам, позднее к вулканическим брекчиям и агломератам или туфобрекчиям (Устрицкий, 1953; Масайтис и др., 1980). Предположение о метеоритно-взрывном происхождении Карской депрессии впервые было высказано в 1970 г. П.С. Вороновым. Эта гипотеза была поддержана и подтверждена В.Л. Масайтисом, обнаружившим признаки ударного метаморфизма в породах Карской структуры. Геологическое строение объекта было изучено при геологическом картировании и геофизических исследованиях данной территории в ходе производственных работ М.А. Масловым и Г.Я. Пономаревым и коллективом сотрудников ВСЕГЕИ (Импактные ..., 1990; Масайтис и др., 1980). Впоследствии в результате научных исследований были изучены глубинное строение, высокобарная минерализация, уточнен возраст импактного события (Езерский, 1986; Импактные ..., 1990; Юшкин, Лысюк, 2001; Удоратин и др., 2010; Лютоев, Лысюк, 2015; Tieloff et al., 1998).

Традиционно на Пай-Хое выделяют два синхронно образовавшихся импактных кратера – Карский и Усть-Карский. Самостоятельность Усть-Карской импактной структуры была представлена в 70-х годах XX в. в результате исследования состава и условий залегания импактитов и брекчий Карской и Усть-Карской астроблем (Импактные ..., 1990; Масайтис и др., 1998; Юшкин, Лысюк, 2001; Лютоев, Лысюк, 2015), однако рядом исследователей предполагается, что данные структуры относятся к одному импактному кратеру с существенно большими исходными размерами (Тимонин, 2006). На сегодняшний день недостаточно доказательств ни в пользу одной, ни другой гипотезы.

Известно, что Карская астроблема образовалась около 70 млн лет назад (Tieloff et al., 1998) при столкновении крупного космического тела с Землей. В результате высокоскоростного удара выделилось огромное количество энергии, породившей сверхзвуковую ударную волну, которая спровоцировала сложную и скоротечную последовательность специфических процессов изменения пород мишени – импактный метаморфизм (Langenhorst, 2002). Ударное сжатие пород способствовало возникновению сверхвысоких (шоковых)

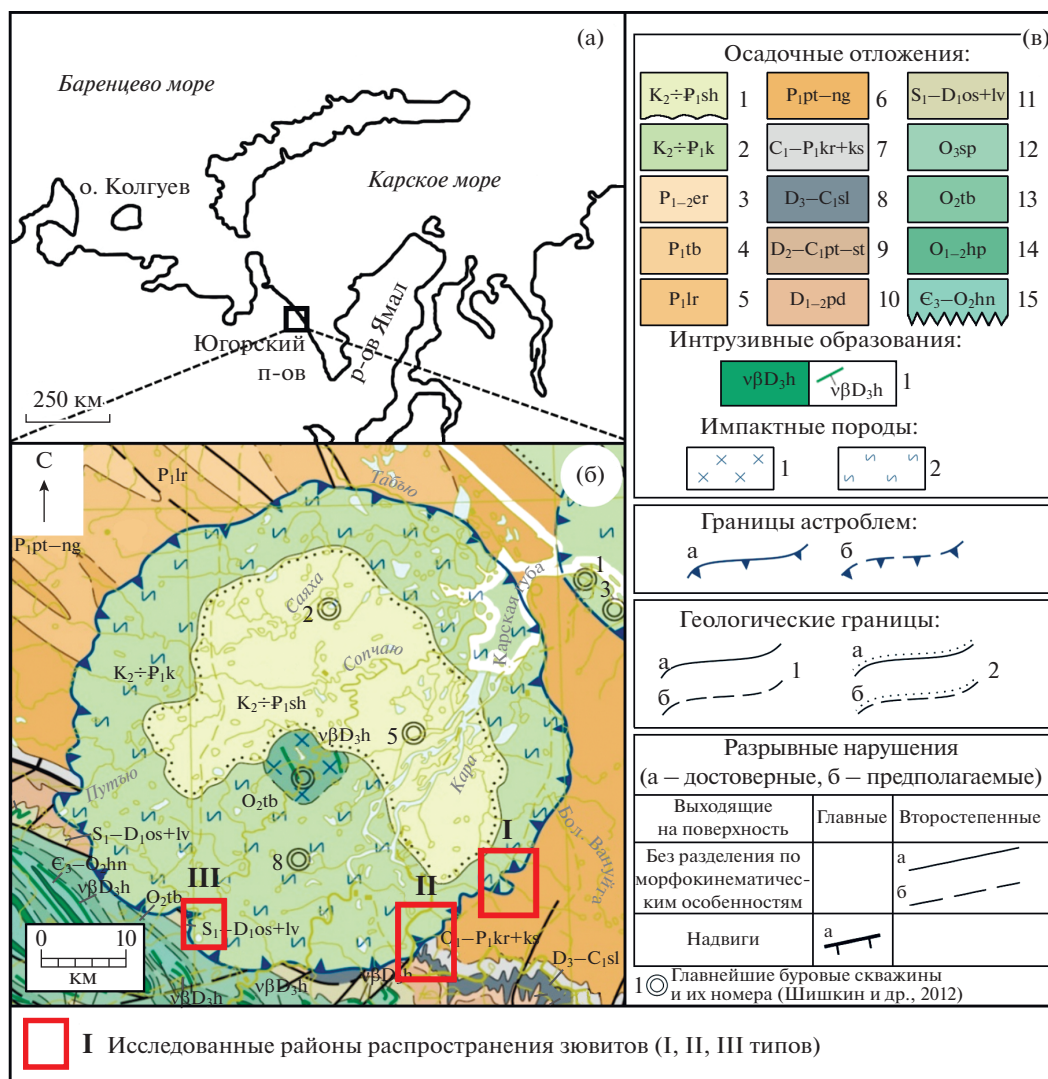


Рис. 1. Расположение (а) и геологическое строение (б) области Карской астроблемы по материалам Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1000000 (Шишкин и др., 2012). (в): *осадочные отложения*: 1 – сааяхинская толща: глины опоковидные, песчаные, алевролиты, переотложенные коптокlastиты; 2 – карский коптогенный комплекс: аллогенные брекчи, тагамиты, зювиты, коптокlastиты; 3 – ерзягинская свита: циклическое переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов, углей; 4 – табыюская свита: полимиктовые песчаники, алевролиты, аргиллиты, углистые аргиллиты, угли; 5 – лиурьягинская свита: полимиктовые песчаники и алевролиты с мергелистыми и песчано-кальцитовыми конкрециями; 6 – пэтаркинская свита и нгебетаяхинская толща нерасчлененные: флишоидное переслаивание известковистых и слабоуглеродистых аргиллитов с прослоями кремнистых мергелей, известковистых песчаников, алевролитов, алевролитистых аргиллитов; 7 – карская и карасиловская свиты объединенные: сланцы углеродисто-глинисто-кремнистые, фтаниты, силициты, прослой известняков, кремнистые и детритовые известняки с линзами кремней; 8 – силоваяхинская свита: переслаивание фтанитов, черных сланцев, силицитов, углеродисто-кремнистых известняков, фосфоритовых конкреций; 9 – путьюская, громашорская и силоваяхинская свиты нерасчлененные: сланцы карбонатно-кремнисто-глинистые, углеродисто-кремнисто-глинистые, силициты, яшмоиды, фтаниты, кремнистые известняки; 10 – падейская свита: песчаники кварцевые, сланцы кремнисто-глинистые, силициты, линзы мanganокarbonатов и баритов; 11 – оюская и ливановская свиты объединенные: ритмичное переслаивание сланцев, углеродисто-глинисто-кремнистых и их карбонатных разностей с углеродисто-кремнистыми известняками, известняки с тентакулитами, прослой сланцев (локально встречаются потоки базальтов); 12 – сопчинская свита: переслаивание известняков, кремнистых, детритовых, глинистых и сланцев глинисто-кремнистых, кремнисто-глинистых; 13 – тальбейтывисская свита: ритмичное переслаивание известковистых песчаников, алевролитов, песчанистых известняков, кремнисто-глинистых сланцев (локально базальты, туфолафы); 14 – харапэшорская свита: известняки алевролитистые, глинистые, петельчатые, алевролиты; 15 – хенгурская свита: сланцы глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые и их углеродистые разности, редкие прослой известняков, локально развиты туфолавы, песчаники и алевролиты, гравелиты, конгломераты, прослой алевросланцев и углеродисто-глинистых сланцев. *Интрузивные образования*: 1 – Хойтальбейский комплекс габбро-долеритовый гипабиссальный. Габбро-долериты, долериты. *Импактные породы*: 1 – автохтонные породы (коптокlastиты); 2 – аллохтонные породы нерасчлененные (зювиты, глыбовые брекчи). *Границы астроблем*: а – установленные, б – предполагаемые. *Геологические границы* (а – установленные, б – предполагаемые): 1 – согласно залегания и интрузивные контакты, 2 – несогласно залегания стратиграфических подразделений.

давлений и образованию расплавных импактитов при давлении до 60–80 ГПа и температурах, достигающих 2300–2500°C (Шумилова и др., 2018). В результате последовавшей декомпрессии и различной транспортировки метаморфизованного материала — обломков пород мишени, минеральных частиц и масс импактного расплава, сформировались импактиты: зювиты (образованные в результате баллистических выбросов и оседания кластической компоненты из взрывного облака) и тагамиты (сформированные при пластическом течении и застывании импактного расплава), выполняющие борта Карского кратера (Масайтис и др., 1980; Импактные ..., 1990; Langenhorst, 1994; Stöffler, 2007).

В структурном плане Карская депрессия находится в северо-восточной части Новоземельско-Уральского складчато-надвигового пояса, который обрамляется на северо-востоке Западно-Сибирской плитой (Варандей-Адзвинской структурной зоной), а на юго-западе — Предуральским краевым прогибом (Коротайхинской впадиной). В Центрально-Новоземельском мегантиклинории выделяют несколько последовательно сменяющихся зон (с запада на восток): Вайгачско-Южноновоземельский антиклинорий, Пайхойский антиклинорий (Пайхойское поднятие), Карский синклинорий (Карская впадина), где и располагается Карская структура (Шишкин и др., 2012).

Карский синклинорий размером 65 × 180 км является крылом Пайхойского антиклинория. Границы Карской депрессии тектонические: на северо-востоке она ограничена Байдарацкой сутурой, с юга и запада — Северо-Пайхойским надвигом, на востоке — Карским (осовейским) надвигом.

В строении Карской астроблемы выделяется два структурных этажа (рис. 1): нижний — верхнепротерозойский (в пределах кратера вскрытый скважинами на глубину 500 м), и верхний — палеозойский мощностью более 5 км. Верхний структурный этаж подразделяется на два структурных яруса: нижний (сложенный сланцами, песчаниками, известняками и др. породами ордовика–карбона) и верхний (сложенный нижнепермскими песчаниками, алевролитами, сланцами и др. отложениями), обогащенные углистым веществом (Масайтис и др., 1980; Импактные ..., 1990; Юдович и др., 1998; Шишкин и др., 2016). В области центрального поднятия астроблемы отмечаются немногочисленные выходы позднедевонских интрузий долеритов и габбро-долеритов.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изученные образцы импактитов, представленных зювитами Карской астроблемы, были отобраны в период экспедиционных работ 2015–2017 гг. в южной и юго-восточной областях импактной структу-

ры в бассейнах рек Анарога (Нганорахяха), Кара, Сопчаю (рис. 1). Были проведены аналитические исследования коллекции из 43 образцов зювитов и пород мишени. Изучение каменного материала проводилось в ЦКП “Геонаука” (ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар).

Микроскопическое изучение разновидностей зювитов методом оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете было выполнено на комбинированном поляризационном микроскопе ПОЛАМ Р-312 (АО “ЛОМО”, Россия) в двусторонне-полированных шлифах с детальным анализом собственно кластогенной компоненты. Процентное содержание кластогенных компонентов (размером менее 0.5 см) и основной массы (менее 0.01 см) в зювитах оценивалось методом линейного подсчета по площади двусторонне-полированных шлифов на интеграционном столике ИСА-2 с суммарной длиной линии подсчета для одного шлифа 6–7 см (Импактные ..., 1990). При микроскопическом изучении зювитов также исследовались признаки ударного метаморфизма и продукты постимпактного гидротермального воздействия.

Изучение валового состава разновидностей зювитов и пород мишени проведено с помощью силикатного анализа на 14 компонентов в лаборатории химии минерального сырья ИГ Коми НЦ УрО РАН, аналитик О.В. Кокшарова. Вещественная характеристика кластогенной компоненты разновидностей зювитов была изучена методом сканирующей электронной микроскопии в совокупности с микронзондовым анализом на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments X-Max в стандартных аншлифах с углеродным напылением, аналитики Е.М. Тропников и С.С. Шевчук. Исследования производились в режиме обратно-отраженных (BSE) и вторичных электронов (SE). Определение элементного состава импактных стекол и литокластов зювитов производилось методом площадных микронзондовых анализов при ускоряющем напряжении 20 кВ. Площадные анализы производились по нескольким обломкам, при этом в каждом фрагменте проводилось по одному анализу по максимальной площади класта. Площади сканированных участков составляли от 10 мкм до 0.8 мм в зависимости от размера фрагментов.

Фазовый минеральный состав витрокластов и отдельных лито- и кристаллокластов разновидностей зювитов изучен методом спектроскопии комбинационного рассеяния света в двусторонне-полированных шлифах. Анализ спектров комбинационного рассеяния производился на рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon) с применением Ar-лазера и длиной волны возбуждающего излучения 514.5 нм, аналитик

С.И. Исаенко. Регистрация спектров происходила в условиях комнатной температуры в спектральном диапазоне 100–4000 см⁻¹. Для выяснения фазовой принадлежности использовались эталонные спектры из базы данных RRUFF (<http://rruff.info>).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как было указано выше, по геоморфологическим, структурно-текстурным особенностям, минералогическому и петрохимическому составу зювиты Карской астроблемы подразделяются на три типа (Шумилова и др., 2016, 2018).

Зювиты I типа расположены на правом борту р. Анарога, в 300 м выше устья руч. Лавовый (рис. 1), формируют крутые массивные скальные выходы, обладают тесной пространственно-генетической связью с тагамитами. Эти породы отличаются коричневато-зеленовато-серым цветом, высокой плотностью и раковистым изломом, содержат значительное количество разнообразных по морфологии импактных стекол. Предполагается, что зювиты I типа образовались по субстрату мишени со значительной долей полимиктовых песчаников, алевролитов и в существенно меньшей степени силикатных магматических пород, имеющих преимущественно алюмосиликатный матрикс.

Зювиты II типа образуют протяженные массивные пластообразные тела с зубообразными субвертикальными скальными обрывами на правом борту р. Кара, в 100 м ниже устья руч. Тогорей-Яха (рис. 1), тесно связаны с породами мишени (известковистыми алевролитами и известняками). Данная разновидность представляет собой пеструю, серую до темно-серого цвета породу с высокой плотностью, хрупкостью, пористостью и трещиноватостью. Протолитом для формирования зювитов II типа, обладающих существенно карбонатным матриксом, предположительно, являлись существенно карбонатные породы.

Зювиты III типа образуют протяженные плащеобразные тела по правому борту р. Сопчаю (рис. 1), характеризуются относительно пологими склонами, имеют темно-серую до черной окраску в естественных выходах. Эта разновидность отличается существенной хрупкостью, трещиноватостью, пористостью и высокой степенью выветрелости. Порода узнается по широкому разнообразию литотипов и неравномерному гранулометрическому распределению кластов. Зювиты III типа, предположительно, образовались по существенно углеродистым породам, углям и отличаются повышенным содержанием углеродистого вещества.

Все описываемые разновидности зювитов характеризуются брекчиевыми текстурами, литовитро- и витролитокластическими структурами, представляют собой преимущественно крупно- и грубообломочные породы с преобладающим раз-

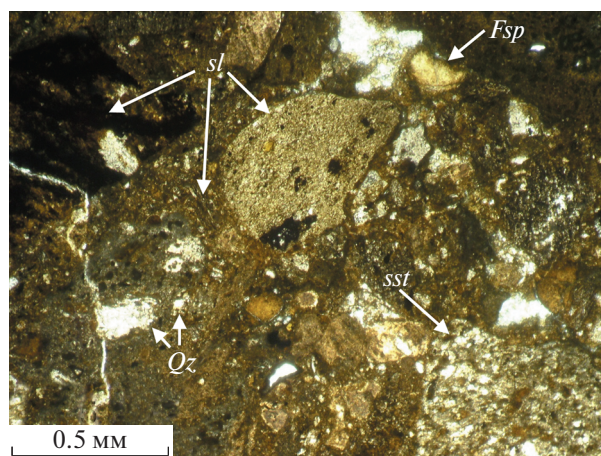


Рис. 2. Интенсивно измененные класты сланцев (*sl*), полимиктовых песчаников (*ssst*), полевых шпатов (*Fsp*), кварца (*Qz*) и других пород и минералов в зювите I типа (без анализатора).

мером кластов от 0.5–1 мм до 1–1.5 см (Структуры ..., 1983). В настоящей работе исследовалась петрологическая специфика кластической компоненты зювитов размером от 0.01 до 1–2 мм.

Минералого-петрографическая характеристика разновидностей зювитов

Зювиты представляют собой импактные брекчии, сложенные эпикластами, витрокластами и матриксом в разном количественном соотношении. Эпикласты характеризуются обломками пород (литокласты — обломки осадочных и кристаллических пород) и минералов (гранокласты — кластические зерна минералов; кристаллокласты — кристаллы минералов). Витрокласты представлены фрагментами импактных стекол (Масайтис и др., 1998).

Зювиты I типа

Литокласты занимают от 16 до 24% от объема зювитов I типа (табл. 1) и представлены интенсивно измененными обломками глинистых алевролитов и аргиллитов; песчаников; серицит-кварцевых, кварц-серицитовых и в меньшей степени углистых хлоритовых сланцев и алевросланцев; редкими кластами известняков и силицитов (рис. 2). Обломки характеризуются удлинёнными, реже изометричными, округлыми или слегка угловатыми, клиновидными, субтригональными формами. Размеры литокластов варьируют от 100 мкм до 1.5 см.

Витрокласты занимают от 25 до 29% от объема породы (табл. 1) и представлены алюмосиликатными и силикатными, расплавленными, в редких случаях диаплектовыми, стеклами, в различной степени измененными. Характерной особенностью импактных стекол зювитов I типа является

Таблица 1. Усредненный литологический состав зювитов по данным оптической микроскопии (об. %)

Тип зювитов	Местонахождение	Кластогенные компоненты (0.5 см–0.01 мм)					Матрикс (<0.01 мм)
		литокласты		витрокласты	грано- и кристалло-класты		
		тип	всего				
I	р. Анарога	Песчаники	5.0	19.8	27.0	5.9	47.3
		Сланцы	3.3				
		Алевролиты	7.7				
		Аргиллиты	3.6				
		Известняки	0.3				
II	р. Кара	Песчаники	3.2	25.3	8.5	12.8	53.4
		Сланцы	7.7				
		Алевролиты	3.1				
		Аргиллиты	0.7				
		Известняки	5.4				
		Силициты	3.3				
		Угли	1.9				
III	р. Сопчаю	Песчаники	0.9	21.2	8.2	9.6	61.1
		Сланцы	8.4				
		Алевролиты	2.8				
		Аргиллиты	4.1				
		Известняки	0.7				
		Силициты	0.1				
		Угли	4.1				

высокая пористость, флюидальная текстура, наблюдаемые размеры в шлифах от 100 до 500–600 и более мкм (рис. 3). При микроскопическом изучении расплавы стекла характеризуются светло- и темно-коричневым цветом, причудливыми, неправильными лентообразными изометричными и удлиненными формами с нечеткими границами. В стеклах зачастую наблюдаются характерные для полевых шпатов при выветривании изменения цвета и облика (потемнение и помутнение), свидетельствующее о замещении пелитом. Неизмененные, прозрачные витрокласты обнаруживаются в подчиненном количестве, часто зональны, что обусловлено изменением окраски от прозрачной (прикраевой) до коричневой (внутренней области). Контуры зон, как правило, совпадают с границами окружающих обломков.

Витрокласты характеризуются пористой, реже массивной и флюидальной текстурой, подчеркнутой цепочками изометричных и удлиненных пор со средним диаметром до 10 мкм. Поры составляют до 20% объема стекол, нередко имеют

тонкие каймы от светло-желтого до темно-коричневого цвета с волокнистым строением и волнистым погасанием. При изучении под оптическим микроскопом во фрагментах стекол зювитов I типа проявляется кристаллическая структура, предположительно двухфазная, обусловленная присутствием разноразмерных сферолитов халцедона радиально-лучистого строения и тонкокристаллических обособлений полевых шпатов. На границе стекол с матриксом присутствует рыжевато-коричневая нераскристаллизованная кайма, обогащенная гидрооксидами железа, по всей видимости, представляющая собой зону закалки.

При исследовании под оптическим микроскопом установлено, что импактные стекла содержат от 5–10 до 15% сильно преобразованных обломков пород, минералов и их реликтов, представленных кварцем (нередко с планарными трещинками), полевыми шпатами, глинистыми аргиллитами, рудными минералами (пиритом, титанитом), сланцами и реликтами других минералов и литокластов. Включения в стеклах нередко ориентированы вдоль

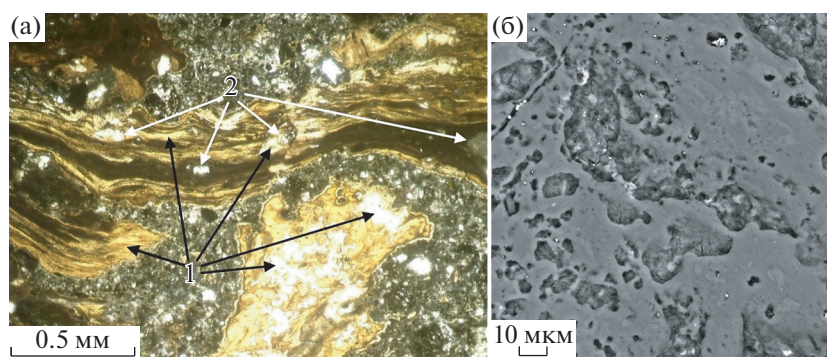


Рис. 3. Микроскопическое (а) (без анализатора) и электронно-микроскопическое (б) (упруго-отраженные электроны) изображение частично раскристаллизованного (1) флюидального пористого (б) импактного стекла с оплавленными включениями лито- и гранокластов (2) в зювите I типа.

направления течения расплава, подчеркивая флюидальную текстуру, изредка формируют очковую текстуру витрокластов.

В ходе анализа спектров комбинационного рассеяния витрокластов зювитов I типа установлено, что раскристаллизованные стекла представлены полевым шпатом (ортоклазом), о чем свидетельствует характерное положение пиков — 477 и 513 см^{-1} , хорошо соотносимое с положением полос в стандартном спектре ортоклаза. При анализе спектров комбинационного рассеяния также выяснено, что мелкие (около 10 – 30 $\mu\text{м}$) линзо- и миндалевидные включения, нередко присутствующие в стеклах, представлены анатазом, о чем свидетельствует характерное положение пика в области 146 см^{-1} и широкие полосы — 396 , 517 , 638 см^{-1} .

Грано- и кристаллокласты (рис. 2) занимают около 6% от объема породы (табл. 1) и представлены изометричными, округлыми, угловатыми кластами полевого шпата, реже кварца, включениями пирита, в редких случаях лейстами слюды (хлорита, серицита, мусковита, биотита) размером от ~ 50 до 250 $\mu\text{м}$.

В ходе микроскопического изучения зювитов I типа в них обнаружены некоторые особенности, которые могут свидетельствовать об *ударном воздействии*. Так, в кластах сланцев отмечается плейчатая текстура, ударный кливаж и различная степень брекчированности. В зернах полевого шпата в составе кластов песчаника наблюдается отсутствие двойников и крупные деформационные трещины. В сильноизмененных фрагментах алевролитов отмечаются реликты первичной структуры и существенное помутнение зерен. Обломки песчаников частично дислоцированы, имеют зональное строение, обусловленное наличием преобразованных краевых аморфных зон и неизмененного центра с первичной зернистостью. Класты силицитов нередко обладают крупными деформационными трещинами в прикраевой части. Среди витрокластов в некоторых случаях встречаются фрагменты

с зоной закалки и изредка диаплектовые стекла по кварцу с характерной оптической изотропизацией, отсутствием пор и флюидальности. В кварцевых включениях в составе стекол наблюдаются планарные трещинки. Зерна полевого шпата в основной массе зювита нередко интенсивно катаклизированы, имеют деформационные и планарные трещины и секториально-пятнистое погасание, а класты кварца в некоторых случаях характеризуются хаотично расположенными трещинами.

Зювиты II типа

Породы характеризуются в разной степени измененными *литокластами*, занимающими 23–28% от объема породы (табл. 1). Среди них преобладают обломки кварц-серицитовых, серицит-кварцевых, хлоритовых, углистых, реже мусковитовых сланцев. Отмечаются класты разномасштабных глинистых и реже мраморизованных известняков, песчаников, фрагменты алевролитов, силицитов и углей (рис. 4). Обломки пород имеют размеры от ~ 100 $\mu\text{м}$ до 1 – 2 см, округлую, удлиненную и изометричную, угловатую, клиновидную, неправильную форму.

Витрокласты составляют от 4 до 13% от объема породы (табл. 1) и представлены преимущественно тонко девитрифицированными разностями размером от 700 $\mu\text{м}$ до ~ 4 мм (Максименко, Зубов, 2017; Максименко и др., 2018). В ходе микроскопического изучения установлено, что витрокласты характеризуются, главным образом, изометричной формой, среди них встречаются лепешки, лапилли, ленты и другие образования с причудливыми, неровными, извилистыми очертаниями (рис. 5). Стекла обладают желтовато- или зеленовато-коричневатой-серой окраской различной интенсивности, иногда прозрачной. Цвет стекол также зависит от степени преобразования: слабоизмененные — частично прозрачны, сильноизмененные — непрозрачны с однородной окраской.

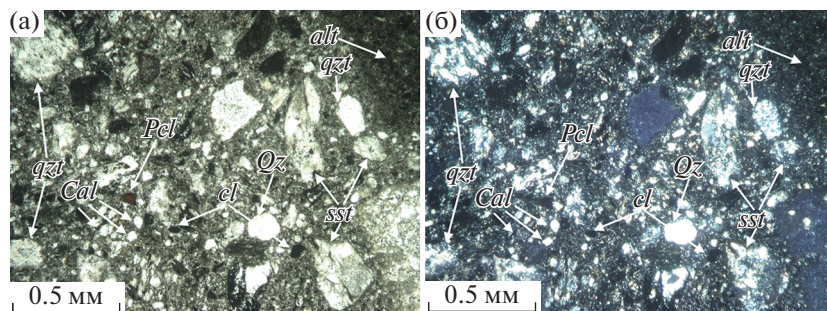


Рис. 4. Класты песчаников (*sst*), алевролитов (*alt*), кварцитов (*qzt*), углей (*cl*), кальцита (*Cal*), полевых шпатов (*Fsp*), кварца (*Qz*), пирохлора (*Pel*) и других пород и минералов в зювите II типа (а – без анализатора, б – николи скрещены).

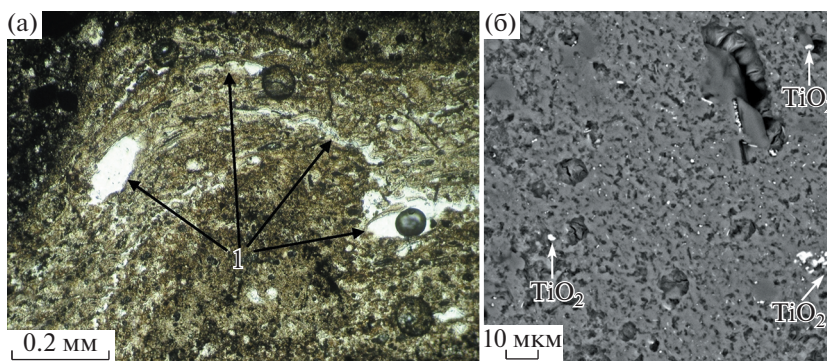


Рис. 5. Микроскопическое (а) (без анализатора) и электронно-микроскопическое (б) (упруго-отраженные электроны) изображение тонкораскристаллизованного импактного стекла с флюидальной пористой текстурой, подчеркнутой многочисленными порами (1) в зювите II типа.

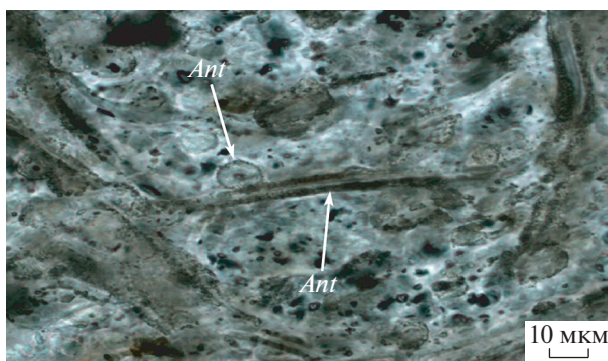


Рис. 6. Включения анатаза (*Ant*) в импактном стекле зювита II типа. Изображение в проходящем свете, без анализатора.

Текстуры стекол пористые, реже массивные и флюидальные. Поры овальные, реже округлые, извилистые, каплевидные. Размер пор, как правило, не превышает 100–200 мкм, а их объем составляет до 30–40%. Стенки пор в скрещенных николях обнаруживают светлую окраску и волнистое погасание. Нередко поры расположены субпараллельно друг другу, обуславливая флюидальную текстуру стекол.

Флюидальность часто подчеркнута тончайшими “червеобразными”, округлыми, субпараллельно расположенными включениями, формирующими некую паутиноподобную сеть (рис. 6). Реже в стеклах отмечается комковатая, очковая текстура (преимущественно у интенсивно преобразованных фрагментов), обусловленная реликтами и теневыми структурами захваченных и переплавленных кластов.

Иногда обломки стекол имеют зональное строение: отчетливо выделяется светлая внешняя кайма и темная внутренняя часть. Зачастую в центральных областях стекло раскристаллизовано, а в краевых зонах (мощностью до 600–700 мкм) большей частью изотропно. Граница стекол с матриксом достаточно четкая и ровная, нередко подчеркнута тончайшей (до 1 мкм) темно-серой каймой, расположенной со стороны основной массы и выполенной, вероятно, сконцентрированным углеродистым веществом. Витрокласты зювитов II типа содержат включения силикоизмененных, сложно идентифицируемых литокластов с рваными оплавленными краями и размерами до 600 мкм. Во флюидальных стеклах отмечаются мелкие включения кварца, кальцита и слюды. Интенсивно измененные стекла повсеместно содержат мел-

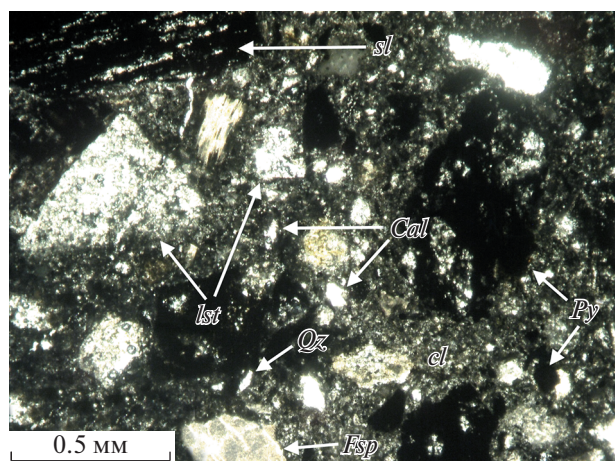


Рис. 7. Класты известняков (*lst*), сланцев (*sl*), углей (*cl*), кальцита (*Cal*), полевых шпатов (*Fsp*), кварца (*Qz*), пирита (*Py*) и других пород и минералов в зювите III типа (без анализатора).

кие угловатые черные включения, предположительно, углеродистого вещества.

При изучении импактных стекол методом спектроскопии комбинационного рассеяния установлено, что “червеобразные” включения, повсеместно присутствующие в стеклах, представлены анатазом с характерным интенсивным пиком в области 142 см^{-1} и широкими полосами – $397, 517, 640\text{ см}^{-1}$, типичными для стандартного спектра анатаза. По всей видимости, это обуславливает относительно высокое содержание TiO_2 в витрокластах зювитов II типа, установленное в ходе площадных микронзондовых исследований.

Грано- и кристаллокласты составляют 10–16% от объема породы (табл. 1), характеризуются размерами от $<10\text{ мкм}$ до $\sim 1\text{ мм}$, представлены кристаллами и зернами кальцита, полевого шпата, реже кварца, редкими кристаллами пироклора,

единичными чешуйками слюд (мусковита, серицита, хлорита).

При исследовании зювитов II типа под микроскопом в них отмечены некоторые *признаки ударного метаморфизма*. Так, класты интенсивно преобразованных сланцев зачастую характеризуются лентами, полосами смятия и отсутствием интерференционной окраски. Обломки мраморизованных известняков и кварцитов в некоторых случаях имеют краевые зоны изменения различной мощности. Фрагменты импактных стекол иногда характеризуются зональным строением, возможно, вследствие закалки. В кластах полевых шпатов и кварца, присутствующих в матриксе породы, часто наблюдаются мозаичное строение и секториально-волнистое погасание.

Зювиты III типа

Отличительной чертой зювитов III типа является наилучшая сохранность и многообразие типов **литокластов**, занимающих около 21.2% от объема породы (табл. 1). Среди кластов преобладают фрагменты углистых, кварц-серицитовых, серицит-кварцевых и единичных хлоритовых сланцев; углей; известковистых и в меньшей степени глинистых алевролитов; крупные фрагменты известняков и мраморизованных известняков; песчаников полимиктовых; силицитов (яшмоидов, микрокварцита, реже радиоляритов) (рис. 7), в исключительно редких случаях – кварцевых долеритов (рис. 8). Литокласты характеризуются изометричными, удлинёнными, округлыми, уплощенными, реже угловатыми, тонколистоватыми и клиновидными формами размером от $\sim 10\text{ мкм}$ до 1.5 см .

Содержание в различной степени раскристаллизованных (рис. 8) **витрокластов** в зювитах III типа составляет около 8% от объема породы (табл. 1). Величина таких обломков колеблется от $\sim 60\text{ мкм}$ до $4\text{--}5\text{ мм}$. При исследовании витрокла-

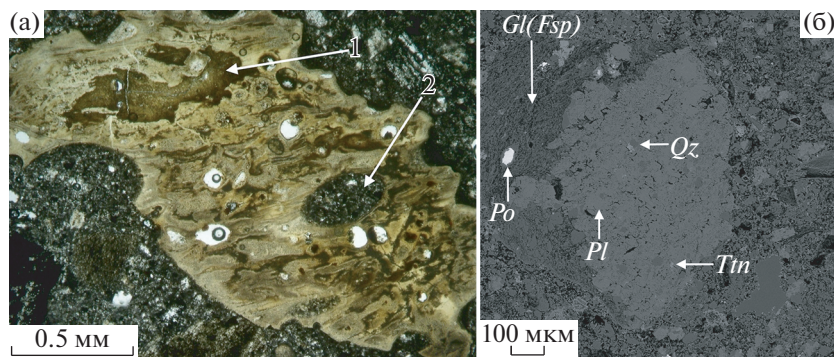


Рис. 8. (а) Флюидальная текстура частично раскристаллизованного (1) импактного стекла с каплевидным включением матрикса (2) в шлифе (без анализатора). (б) Контакт импактного стекла алюмосиликатного состава (*Gl (Fsp)*) с обломком кварцевого долерита в зювите III типа (электронно-микроскопическое изображение в упруго-отраженных электронах). *Pl* – плагиоклаз, *Po* – пирротин, *Tm* – титанит, *Qz* – кварц.

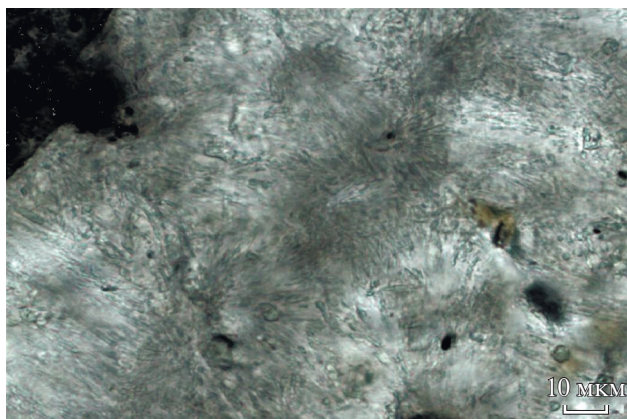


Рис. 9. Сноповидные кристаллы ортоклаза в импактном стекле зювита III типа. Изображение в проходящем свете, без анализатора.

стов под оптическим микроскопом установлено, что они характеризуются разнообразными формами. В породе отмечаются изометричные, удлиненные, угловатые и слабоокруглые, паутино- и лентообразные, таблитчатые, клиновидные фрагменты с причудливой конфигурацией, преимущественно с неровными, волнистыми, “изъеденными” очертаниями. Единично отмечаются витрокласты специфической формы с неправильными буроватыми обособлениями размером до 900 мкм с четкими границами. Иногда в витрокластах просматриваются протяженные (до 20 мкм) отчетливые тонкие (~10 мкм) темно-коричневые микропрослойки согласно направлению течения расплава.

Текстуры стекол флюидалные, массивные, пористые, реже пятнистые и глобулярные, обусловленные наличием круглых пор и фрагментов матрикса. Количество пор в импактных стеклах в некоторых случаях достигает 60–70%. Поры изометричные округлые или слегка удлиненные, реже линзовидные с неровными краями и неправильными формами, достигают ~80 мкм в поперечнике. Иногда стенки крупных пор опоясаны тонким (около 0.01 мм) темно-серым до черного цвета материалом, который в скрещенных николях подразделяется на две зоны: внешнюю изотропную и внутреннюю светло-желтоватую область. Изредка в порах присутствуют игольчатые микрориски вторичных цеолитов.

Слабоизмененные стекла характеризуются прозрачностью, световато-желтоватым и коричневатобуроватым цветом (у разностей с повышенным содержанием железа), тогда как в преобразованных фрагментах внутренняя структура плохо различима вследствие помутнения; цвет преимущественно светло-голубовато-серый. Иногда в витрокластах наблюдается зональное строение: прикраевая раскристаллизованная светло-желтовато-серая область мощностью 30–70 мкм посте-

пенно переходит в сероватую центральную область (около 60 мкм).

Неоднородность витрокластов зювитов III типа обусловлена раскристаллизованными “слоями”, разнообразными порами и включениями (занимающими от 10 до 25%) размером до 10–20 мкм, реже до 60–200 мкм. Включения представлены мелкими буровато-красными зернами пироклора, кристаллами пирита и пирротина (рис. 8) с характерными рыжеватыми ореолами гидроксидов железа, а также мельчайшими частицами углеродистого вещества. Изредка в стеклах встречаются крупные фрагменты (~120 мкм, редко до 200 мкм) округлой, овальной и слабоокруглой формы, сложенные материалом матрикса (рис. 8). Зачастую включения в стеклах располагаются однонаправленно, подчеркивая флюидалную текстуру.

В ходе анализа спектров комбинационного рассеяния измененных раскристаллизованных стекол клиновидной формы было установлено, что они имеют полевошпатовый, преимущественно ортоклазовый состав, о чем свидетельствуют рамановские пики в области 478 и 509 см⁻¹, характерные для эталонного спектра ортоклаза. Любопытно, что ортоклаз представлен в виде тончайших кристаллов, формирующих сноповидные образования (рис. 9), при этом фрагменты подобных стекол обладают ярко выраженной зоной закалки.

Грано- и кристаллокласты занимают около 10% от объема породы (табл. 1) и отличаются различными размерами (от ~5 до ~1 мм), представлены кластами кальцита, полевых шпатов, кварца, чешуйками слюд (мусковита, серицита, редко хлорита), единичными зернами пироклора.

Об **ударном метаморфизме** может свидетельствовать пятнистое погасание, системы параллельных трещин в кварце и трещиноватость полевого шпата в обломках песчаников, крупные деформационные трещины во фрагментах силицитов. Класты яшмоидов в некоторых случаях имеют зональное строение, обусловленное наличием центральной темно-серой зоны, прикраевой светлой области и серой краевой прокаленной зоны. Во фрагментах импактных стекол также наблюдаются зоны закалки. В редких случаях среди витрокластов отмечаются оптически изотропные диаплектовые стекла по кварцу и полевому шпату с системами параллельных трещинок. Также в некоторых кластах полевого шпата в матриксе наблюдаются секториально-волнистое погасание, планарные элементы (рис. 10) и трещиноватость. В кристаллах кальцита в основной массе пород иногда обнаруживается кайма изменения, выполненная стекловатой массой.

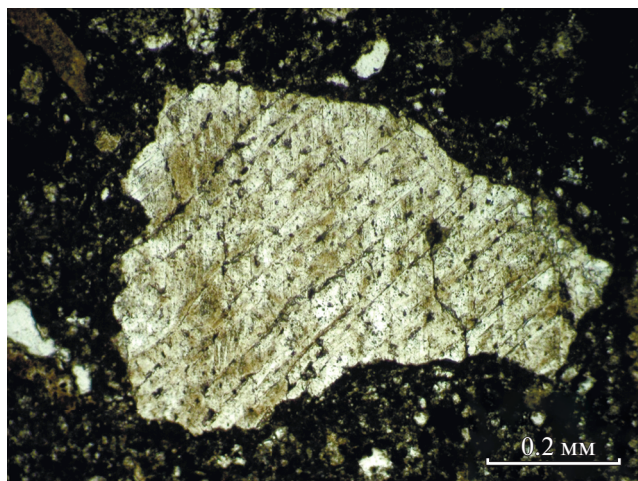


Рис. 10. Фрагмент полевого шпата с двумя системами планарных элементов в зювите III типа (без анализатора).

Петрохимические особенности разновидностей зювитов

В целом все типы зювитов относятся к среднекислым разностям (см. ESM_1.pdf в Supplementary)². При этом наблюдаются существенные различия разновидностей по характеру основности. Так, точки составов зювитов I типа располагаются на границе умеренно- и нормально-щелочных пород, зювиты II типа локализируются в области нормально- и низкощелочных пород, а зювиты III типа располагаются в основном в поле низкощелочных пород.

Большая разница наблюдается в количестве CaO, наибольшее содержание которого (~14 мас. %) характерно для третьей разновидности зювитов, а наименьшее (около 2 мас. %) – для первой (Максименко, 2018). Существенные различия отмечаются и в содержании глинозема, максимальное содержание которого установлено для зювитов I типа (около 14 мас. %), а минимальное – для зювитов III типа (около 6 мас. %). Примечательно, что для зювитов II типа характерно повышенное содержание Al₂O₃ (9.65–12.16 мас. %). Необходимо отметить, что зювиты I типа отличаются значительными содержаниями (мас. %): Fe₂O₃ до 6.75, H₂O до 4.49, MgO ~ 6 и TiO₂ 0.8, значения которых в 1.5–2 раза больше по сравнению с другими разновидностями. Минимальные содержания (мас. %): Fe₂O₃ ~ 3, H₂O ~ 0.4, MgO ~ 2 и TiO₂ около

0.3 установлены для зювитов III типа. Зювиты I типа существенно обеднены компонентами (мас. %): CO₂ 0.2–1.2, MnO около 0.07 и FeO ~ 2, в то же время наибольшие содержания CO₂ (до ~10) и MnO (0.24) приходятся на зювиты III типа, а максимальное содержание FeO (~3.3) – на зювиты II типа. Вместе с тем для зювитов II типа характерны повышенные значения CO₂ (до 5.5 мас. %) и MnO (до 0.17 мас. %), а для зювитов III типа – FeO (~3 мас. %).

Следует отметить, что наиболее широкие вариации величин П.п.п. (потери при прокаливании) отмечены у зювитов III типа (от ~4.7 до более 14%), минимальные значения П.п.п. характерны для зювитов I типа (от ~4.7 до 7.45%). У зювитов II типа отмечены высокие величины П.п.п. (от 8.1 до 10.1%). Содержание P₂O₅ в целом не обнаруживает существенных отличий среди трех разновидностей зювита. Обращает на себя внимание, что наибольшие вариации химического состава характерны для зювитов III типа. Существенные расхождения химического состава отмечаются также у зювитов I типа, в то время как зювитам II типа свойственен относительно однородный химический состав.

Среди образцов зювитов III типа отмечаются некоторые различия. Значительные расхождения установлены в содержании SiO₂, которое варьирует в пределах 56–64.5 мас. %, и CaO – от 5.3 до 14.1 мас. %. Существенные различия зафиксированы для величин П.п.п. (4.7–14.6%), а также содержаний (мас. %): CO₂ 2–9.7, MgO 2.07–8.55, Al₂O₃ 5.9–9.5, Fe₂O₃ 3–4.7, H₂O 0.43–3.86, FeO 0.82–3.17, Na₂O и K₂O 0.5–2.2. Незначительная разница также наблюдается в отношении компонентов (мас. %): TiO₂ 0.3–0.49, P₂O₅ 0.14–0.24 и MnO 0.078–0.24.

Среди исследованных образцов зювитов I типа также обнаружены некоторые расхождения химического состава. Относительно количества SiO₂ здесь выявлены незначительные отличия (от 56.6 до 59.3 мас. %). Существенные вариации содержаний установлены для компонентов Al₂O₃, CaO и H₂O (в пределах первых процентов). Небольшие расхождения в содержаниях (в пределах десятых долей процента) характерны для компонентов MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂, FeO, CO₂, P₂O₅ и MnO.

Содержания суммы щелочей (K₂O + Na₂O), кремнезема зювитов и импактных стекол нанесены на TAS-диаграмму (рис. 11) с целью сравнительного анализа основных химических параметров разновидностей обломочных импактитов, их стеклов и вулканических пород, а также для более целостной характеристики и наглядной демонстрации петрохимических различий трех типов зювитов. Поля распространения разновидностей зювитов на диаграмме TAS по содержанию крем-

² Результаты исследований зювитов Карской астроблемы приведены в таблицах Supplementary к русской и английской онлайн-версиям статьи на сайтах <https://elibrary.ru/> и <http://link.springer.com/> соответственно: ESM_1.pdf – Валовый состав трех типов зювитов; ESM_2.pdf – Состав импактных стекол зювитов; ESM_3.pdf – Состав литокластов зювитов; ESM_4.pdf – Валовый состав пород мишени.

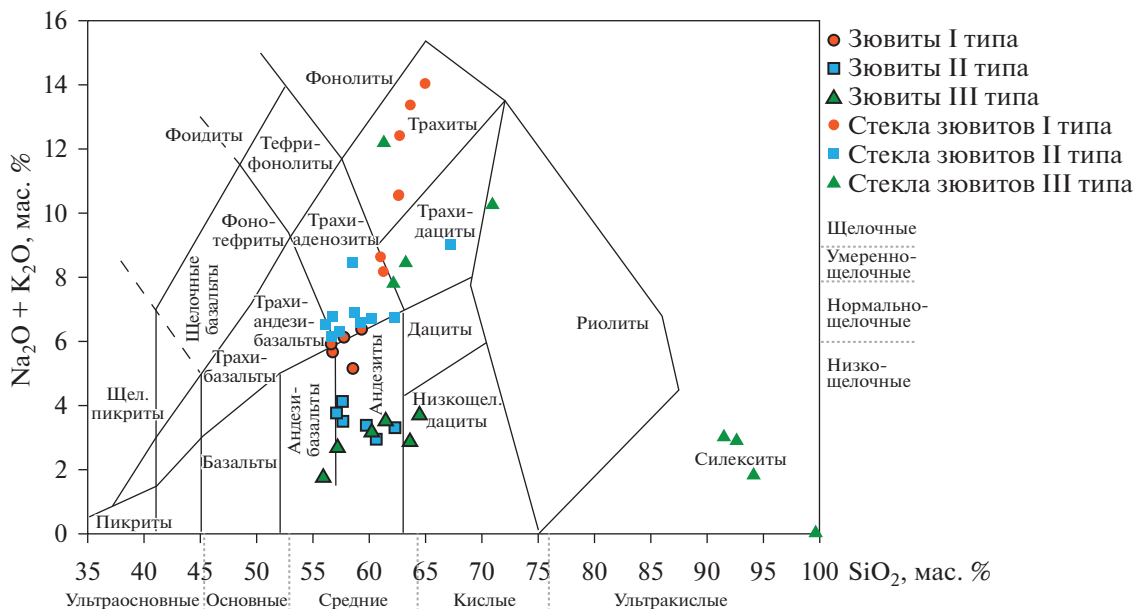


Рис. 11. Распределение разновидностей зювитов и их стекол на TAS-диаграмме по (Middlemost, 1994).

незема значительно перекрываются, средние величины которого для всех типов лежат в пределах 56–65 мас. % и соответствуют среднекислосму составу. Наибольшее содержание кремнезема (около 65 мас. %) и его максимальные вариации (56–65 мас. %) установлены для зювитов III типа, аналогично полю, соответствующему низкощелочным дацитам и андезитам. Наименьшее значение SiO₂ характерно для зювитов I типа (~57 мас. %), которые локализируются в пограничной зоне полей андезитового и трахи-андезитового составов. Зювиты II типа имеют содержание SiO₂ в интервале 57–62 мас. % и располагаются в области андезитов.

Следует отметить, что относительно суммарного содержания щелочей поле распространения зювитов II типа (2.9–4.1 мас. %) частично накладывается на поле зювитов III типа (1.8–3.8 мас. %). Тем не менее положение точек по сумме щелочей в зювитах характеризуется достаточно сильным разбросом, что позволяет уверенно разделить разновидности по щелочности. Так, зювиты II типа по содержанию щелочей располагаются преимущественно в области пород нормальной щелочности, затрагивая область низкощелочных пород. Поле распространения зювитов III типа отличается широким охватом, затрагивая зоны нормально-щелочных и низкощелочных пород, при этом точки составов локализируются главным образом в области низкой щелочности. Зювиты I типа тяготеют к границе нормально- и умеренно-щелочных пород. Необходимо отметить, что содержание суммы щелочей в зювитах I типа (~6 мас. %) практически вдвое превышает таковые в других разновидностях, в то время как минимальное значение сум-

мы щелочей (K₂O + Na₂O) отмечаются у зювитов III типа (~1.8 мас. %).

Необходимо добавить, что точки зювитов I типа и импактных стекол данной разновидности характеризуются существенным расхождением составов на диаграмме TAS (рис. 11). При этом любопытно, что зювиты II типа и их витрокласты перекрываются по содержанию SiO₂, а точки составов зювитов III типа перекрываются с таковыми силикатных стекол по уровню щелочности и с алюмосиликатными стеклами по кремнекислоте. В целом следует отметить, что поле всех разновидностей зювитов образует более компактную область на диаграмме по сравнению с составами импактных стекол, в них содержащихся.

Петрохимические особенности кластогенной компоненты трех типов зювитов и предполагаемого преобладающего протолита для каждой разновидности были исследованы с помощью площадных микросондовых исследований и силикатного анализа (см. ESM_2, 3, 4.pdf в Supplementary). Содержания основных химических элементов были нанесены на вариационные диаграммы петрогенных компонентов (рис. 12).

Зювиты I типа

В целом песчаники и алевролиты мишени – предполагаемый преобладающий протолит для зювитов I типа, характеризуются меньшим содержанием SiO₂ (~58 мас. %), в отличие от **кластлов песчаников** и **алевролитов** в зювитах I типа, где его содержание достигает 68.8 мас. % (см. ESM_3, 4.pdf в Supplementary). Содержание компонентов

MgO, Al₂O₃, CaO, FeO, Na₂O в кластогенных песчаниках и алевролитах зювитов I типа не зависит от концентрации SiO₂, отмечается положительная корреляция компонента SiO₂ с K₂O (повышается от 3.4 до 10.9 мас. %) (рис. 12). В кластах алевролитов зювитов I типа отмечается высокое содержание компонента Al₂O₃ (до ~22 мас. %), который характеризуется отрицательной корреляцией с SiO₂ (уменьшается от 21.6 до 19.3 мас. %). Негативные корреляции с кремнеземом в кластах алевролитов установлены также для компонентов FeO (от 1.2 до 0 мас. %) и MgO (от 0.8 до 0 мас. %).

В результате площадных микрозондовых исследований *витрокластов* зювитов I типа установлено, что импактные стекла характеризуются некоторыми вариациями состава (см. ESM_2.pdf в Supplementary). В них отмечается повышенное содержание глинозема (в среднем ~20.6 мас. %), достаточно высокое содержание кремнезема (60.6–67.9 мас. %), повышенная концентрация щелочей (главным образом, калия – 10.13 мас. %). При этом импактные стекла содержат некоторое количество титана (до 0.85 мас. %).

В ходе анализа диаграмм концентраций основных химических элементов (рис. 12) установлено, что составы импактных стекол зювитов I типа при увеличении доли SiO₂ образуют отрицательную корреляцию по компонентам MgO, Al₂O₃, CaO, FeO и положительную – по K₂O. Так, концентрации понижаются (мас. %): MgO от 1.54 до 0.43, Al₂O₃ от 21.77 до 18.97, CaO – от 4.69 до 0.48, FeO – от 2.25 до 0.98, а содержание K₂O увеличивается от 2.76 до 10.13. Содержание Na₂O в стеклах не зависит от концентрации SiO₂.

При сравнительном анализе петрохимии витрокластов зювитов I типа с предполагаемым протолитом – песчаниками и алевролитами подложки (см. ESM_2, 4.pdf в Supplementary) выявлено, что импактные стекла характеризуются более высокими содержаниями Al₂O₃, SiO₂, K₂O и Na₂O и существенно меньшими FeO, MgO и CaO (рис. 12). Следует отметить, что состав исследованных импактных стекол хорошо соотносится с составом кластов алевролитов в зювитах I типа по основным породообразующим компонентам SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO (рис. 12). При анализе петрохимических особенностей импактных стекол зювитов I типа на TAS-диаграмме выявлено достаточно широкое расхождение значений. Состав стекол меняется от кислого до среднекислого и попадает в поля развития трахитов, трахиандезитов и трахидацитов (рис. 11). Импактные стекла зювитов I типа отвечают зоне щелочных и в меньшей степени умеренно-щелочных пород.

Зювиты II типа

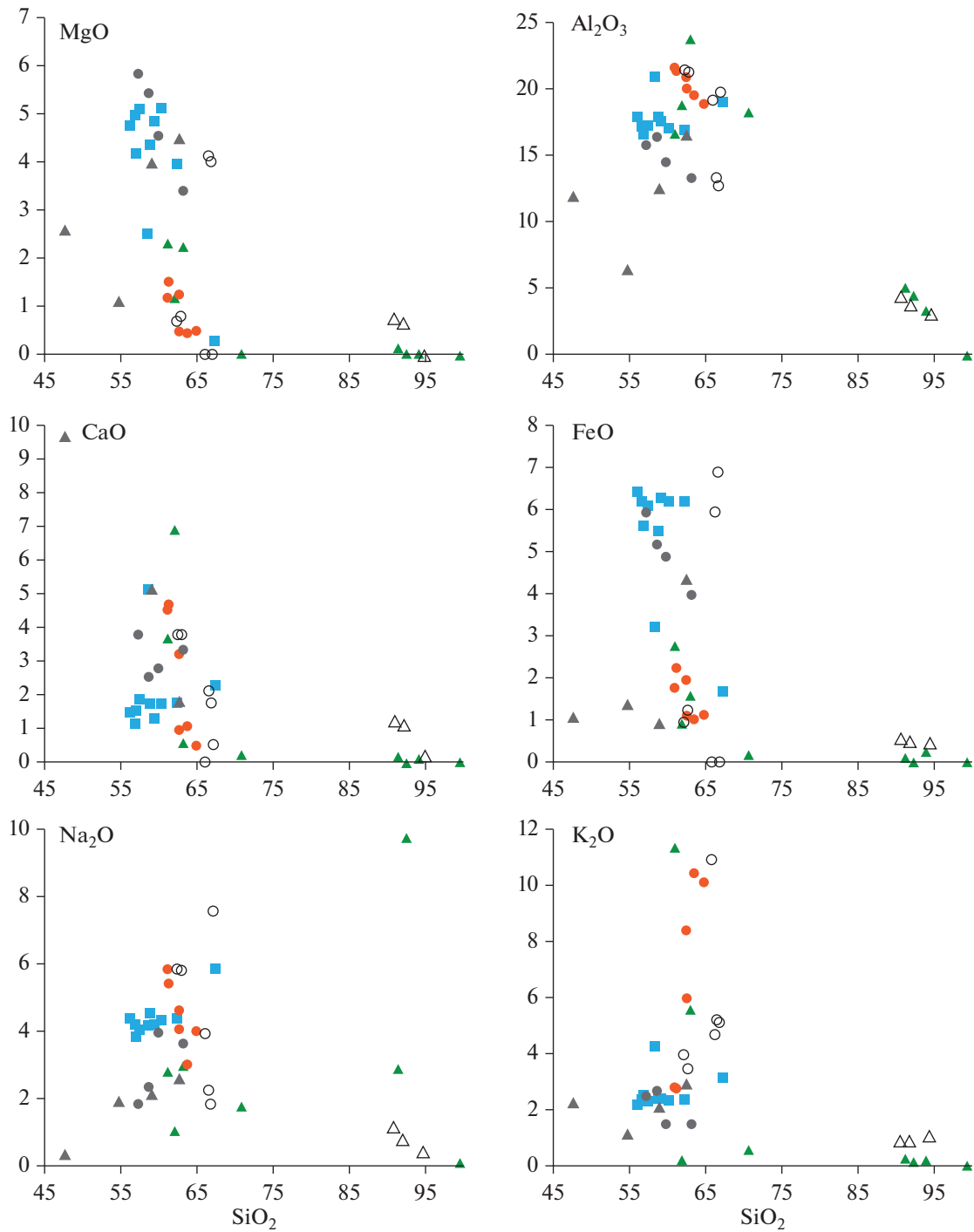
Установлено, что исследованные *класты известняков* в зювитах II типа характеризуются преимущественно кальцитовым составом с незначительными примесями FeO и MnO (см. ESM_3.pdf в Supplementary). Содержание CaO в таких кластах составляет около 50 мас. %, концентрации FeO и MnO – до 1 мас. %. В единичных случаях отмечаются примеси (мас. %): SiO₂ ~ 0.7, Al₂O₃ 0.25 и K₂O 0.3.

Выяснено, что проанализированные известняки мишени содержат существенную долю глинистого вещества (см. ESM_4.pdf в Supplementary). Помимо основного компонента CaO, содержание которого варьирует от 34 до ~53 мас. %, в исходных карбонатных породах выявлено повышенное содержание SiO₂ до ~34 мас. %, а также некоторое количество Al₂O₃ 0.4–2.1 мас. % и MgO от 0.2 до ~ 0.8 мас. %. В качестве примеси присутствуют щелочи до 0.1 мас. %, MnO до 0.1 мас. % и MnO ~ 0.06 мас. %.

Выявленные расхождения петрохимического состава кластов известняков в зювитах II типа и исходных известняков, вероятно, обусловлены литологической неоднородностью пород мишени астроблемы, в том числе присутствием различных типов известняков в области развития зювитов II типа (Шишкин и др., 2012).

При изучении *витрокластов* зювитов II типа методом площадных микрозондовых исследований выяснено, что импактные стекла обладают концентрациями SiO₂ от 56.01 до 64.69 мас. % и Al₂O₃ в пределах 16.91–20.06 мас. %. Такие витрокласты существенно обогащены железом (до 6.66 мас. %) и обладают относительно высокими содержаниями щелочей (главным образом, натрия, концентрация которого варьирует 3.98–5.63 мас. %, см. ESM_2.pdf в Supplementary). Кроме того, отмечается значительное количество MgO (до 5.19 мас. %) и в меньшей степени CaO (в среднем ~2 мас. %). При этом в таких стеклах отмечается существенная доля TiO₂ (до 0.92 мас. %). В сравнении с исходными глинистыми известняками такие стекла характеризуются существенно большим содержанием большинства породообразующих компонентов и значительно меньшим содержанием оксида кальция (см. ESM_2, 4.pdf в Supplementary).

Анализ вариационных диаграмм петрогенных элементов (рис. 12) показывает, что концентрации основных компонентов MgO, Al₂O₃, FeO, Na₂O и K₂O в составе импактных стекол зювитов II типа в целом не зависят от содержания SiO₂. Следует отметить, что в стеклах второй разновидности зювитов наблюдается некоторая положительная корреляция SiO₂ и CaO, при этом содержание кальция повышается от 1.18 до 4.86 мас. % по мере увеличения доли кремнезема. В ходе исследования пет-



Витрокласты зювитов		
I	II	III
●	■	▲

Литокласты зювитов	
I	III
песчаники, алевролиты	алевролиты углистые
○	△

Породы мишени	
песчаники, алевролиты	алевролиты углистые
●	▲

Рис. 12. Вариационные диаграммы петрогенных компонентов лито- и витрокластов зювитов (I типа, II типа, III типа) и пород мишени Карской астроблемы по данным силикатных и площадных микронзондовых анализов (мас. %).

рохимии импактных стекол зювитов II типа установлено, что точки таких витрокластов попадают в поле среднекислого состава, характеризуются хорошей локализацией и располагаются в основном поле трахиандезитов умеренной щелочности, тяготея к границе нормально щелочных пород (рис. 11).

Зювиты III типа

Класты углистых алевролитов в зювитах III типа отличаются повышенным содержанием кремнезема (~87 мас. %) и достаточно низким содержанием глинозема (~3.5 мас. %), см. ESM_3.pdf в Supplementary. При этом такие класты характеризуются отрицательными корреляциями большинства петрогенных компонентов с SiO_2 (рис. 12). По мере увеличения доли кремнезема уменьшаются содержания (мас. %): Al_2O_3 от 4 до 2.9, Na_2O от 1.1 до 0.4, CaO от 1.1 до 0.1, MgO от 0.7 до 0, FeO от 0.5 до 0.4. Любопытно, что концентрация K_2O во фрагментах углистых пород не зависит от содержания кремнезема. В отличие от последних, в неизменных углистых алевролитах мишени содержание SiO_2 составляет около 54 мас. %, а содержание Al_2O_3 достигает 15 мас. % (см. ESM_4.pdf в Supplementary). Выявленное расхождение составов литокластов и аналогичного протолита по содержаниям SiO_2 и Al_2O_3 вполне допустимо, учитывая исходную литологическую неоднородность пород мишени астроблемы (Юдович и др., 1998).

Изучение **витрокластов** зювитов III типа методом площадных микронзондовых исследований позволило подтвердить и уточнить данные оптических исследований и спектроскопии КР. Выяснено, что импактные стекла зювитов III типа характеризуются широкими вариациями состава. В целом в таких стеклах отмечаются пониженное содержание щелочей (преимущественно калия ~2–3 мас. %) и незначительная примесь кальция, магния и титана (в среднем 1.42, 0.71 и 0.32 мас. % соответственно), см. ESM_2.pdf в Supplementary. При этом по содержанию SiO_2 витрокласты третьей зювитовой разновидности четко подразделяются на две группы – силикатные с содержанием кремнезема до ~99 мас. % и алюмосиликатные – до 57 мас. % (рис. 12).

Установлено, что силикатные стекла зювитов III типа имеют отрицательную корреляцию SiO_2 с компонентами, содержания которых уменьшаются (мас. %): MgO 2.25–0, FeO 2.76–0.18, K_2O 11.3–0.19, и положительную с Na_2O , содержание которого увеличивается от 1.04 до 9.75 мас. % (рис. 12). Силикатные стекла обладают очевидной корреляцией SiO_2 и Al_2O_3 с проанализированными литокластами зювитов III типа (рис. 12). При сравнительном анализе с существенно кремнистыми углистыми алевролитами выяснено, что

такие стекла характеризуются существенно большей концентрацией Na_2O и несколько меньшим содержанием компонентов MgO , CaO , FeO и K_2O .

Алюмосиликатные стекла зювитов III типа характеризуются отсутствием значимых положительных корреляций SiO_2 с петрогенными компонентами, при этом имеют отрицательные корреляции с Al_2O_3 и Na_2O , содержание которых уменьшается от 0.17 и 0.11 до 18.29 и 9.79 мас. % соответственно при увеличении доли кремнезема. Установлено, что состав алюмосиликатных стекол хорошо согласуется с составом неизменных углисто-глинистых алевролитов мишени по содержанию основных петрогенных компонентов, главным образом SiO_2 , в меньшей степени CaO , FeO , K_2O (рис. 12). В то же время в сравнении с исходными породами такие стекла обладают относительно высокой концентрацией Al_2O_3 и относительно низкой концентрацией MgO .

Точки составов импактных стекол зювитов III типа на диаграмме TAS характеризуются весьма существенным разбросом (рис. 11) и демонстрируют очевидное расхождение значений как по содержанию кремнезема, так и по концентрации суммы щелочей, обуславливая и подтверждая предложенное ранее разделение таких стекол на две группы. Алюмосиликатные стекла имеют преимущественно кислый состав, располагаются в полях развития трахидацитов умеренной щелочности, а также щелочных трахитов и риолитов. Силикатные стекла характеризуются ультракислым составом и выпадают за пределы основной части диаграммы, локализуясь в области распространения силекситов пониженной щелочности, что, по всей видимости, связано с образованием данной группы стекол по силицитам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате комплексного анализа минералогического петрографических и геохимических особенностей разновидностей зювитов с применением современных методов исследования можно с уверенностью проследить заметные различия между выделенными типами на всех уровнях проведенных исследований. Установлены количественные соотношения основных компонентов (рис. 13) и петрографических типов литокластов (рис. 14) разновидностей зювитов. Выявлен валовый состав выделенных разновидностей и предполагаемого преобладающего протолита для каждого типа зювитов, химический состав превалирующих типов литокластов, а также элементный и фазовый состав импактных стекол для каждой зювитовой разновидности. Во всех типах зювитов зафиксированы признаки ударного метаморфизма и постимпактного гидротермального воздействия.

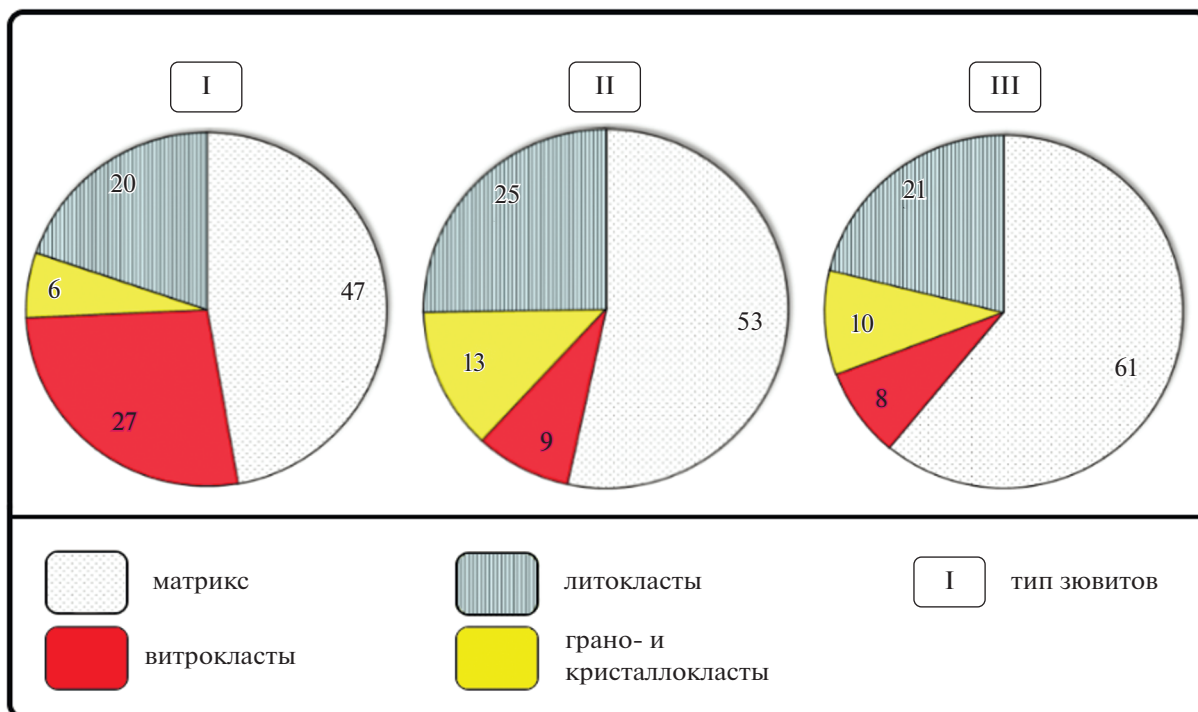


Рис. 13. Соотношения количества (об. %) основных составных компонентов разновидностей зювитов Карской астроблемы.

Зювиты I типа, в отличие от других типов, характеризуются наибольшим количеством (в среднем ~27%) (рис. 13) фрагментов пористых флюидальных закаленных стекол, нередко содержащих пиритовые включения. Данный тип зювитов отличается весьма плохой сохранностью обломков. Количество грано- и кристаллокластов (полевого шпата, кварца, реже слюды), а также содержание матрикса в данном типе является минимальным и в среднем составляет ~6 и ~47% соответственно. В породе отмечается также наименьшее содержание литокластов (в среднем ~20%), в числе которых наблюдается максимальное среди всех типов зювитов количество фрагментов алевролитов (~8%) и песчаников (~5%) (рис. 14).

Зювиты II типа характеризуются относительно низким содержанием фрагментов тонкораскристаллизованных массивных пористых импактных стекол, количество которых составляет ~9% (рис. 13). В отличие от других, зювиты II типа характеризуются наибольшим количеством кластов пород (до ~25%). Среди них отмечается значительное количество сланцев (~8%), максимальное содержание известняков (~5%) и относительно высокое содержание силицитов (~3%). Зювиты II типа отличаются самым высоким содержанием (~13%) грано- и кристаллокластов кальцита, полевого шпата, реже слюд и пирохлора (рис. 14).

Зювиты III типа содержат максимальное среди других типов количество обломков углей (до 4%), а

также сланцев (~8%), существенно обогащенных углеродистым веществом, и аргиллитов (~4%) (рис. 13). В сравнении с другими типами, в породе отмечается наименьшее количество (~8%) нередко закаленных разнообразных по морфологии витрокластов с включениями пирита и пирротина. Зювиты III типа характеризуются самым высоким содержанием матрикса (~61%), а также существенным количеством (до ~10%) включений кальцита, полевого шпата, кварца, редко слюд и пирохлора (рис. 14). Отличительной особенностью данной разновидности зювитов является разнообразие литологических типов пород, а также широкие вариации гранулометрического состава обломочной части, как правило, хорошей сохранности.

Установлено, что разновидности зювитов характеризуются существенным расхождением химического состава, по содержанию кремнекислоты относятся к среднекислым разностям.

Для зювитов I типа характерны повышенные содержания глинозема, железа, TiO₂, MgO и суммы щелочей, указывающие на алюмосиликатный состав протолита для данной разновидности (предположительно, полимиктовые песчаники и алевролиты). О формировании зювитов II типа по существу карбонатным породам (предположительно, глинистым известнякам) можно судить по комплексу признаков – наличию большого количества кластов известняков (рис. 14), значительному содержанию карбонатного вещества в матриксе зювита (Максименко, 2019) и повышенно-

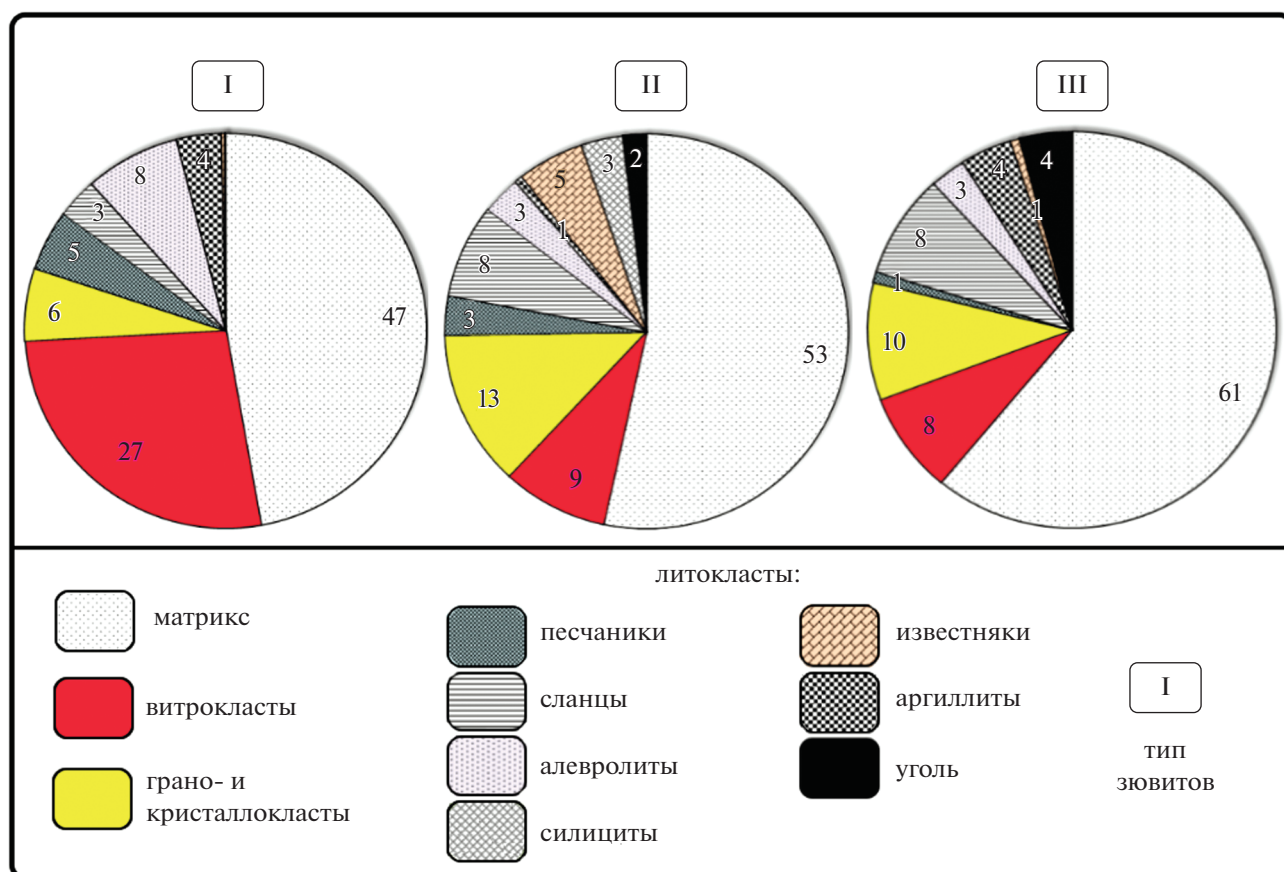


Рис. 14. Количественное соотношение (об. %) основной массы, фрагментов импактных стекол, зерен и кристаллов минералов, типов пород литоидных обломков в разновидностях зювитов Карской астроблемы.

му содержанию компонентов CaO и CO_2 . Зювиты III типа характеризуются повышенным содержанием кремнезема, достаточно высокими содержаниями глинозема и MgO , относительно высоким содержанием углистого материала, что может свидетельствовать об их формировании по породам с существенной долей углеродистой составляющей (предположительно, углеродистым сланцам, алевролитам и углям). Значительное количество карбонатного материала в данном типе, вероятно, является следствием гидротермального изменения этих пород.

Установлены петрохимические особенности, проведен сравнительный анализ, выявлена корреляция химического состава кластогенной компоненты и предполагаемого преобладающего протолита для каждого типа зювитов.

В кластах песчаников и алевролитов в зювитах I типа, в сравнении с аналогичными исходными породами, в целом выявлено относительно высокие содержания кремнезема и K_2O , а также существенно меньшие концентрации, вплоть до полного отсутствия, компонентов MgO , CaO . В сравнении с исходными песчаниками и алевролитами, в кластах песчаников установлены повышенные концентрации компонентов K_2O , MgO , FeO и пониженные

CaO , Al_2O_3 , а в кластах алевролитов – повышенные содержания K_2O , Al_2O_3 и пониженные – MgO , CaO , FeO .

Выявлено, что карбонатные литокласты в зювитах II типа представляют собой фрагменты известняка с преимущественно кальцитовым составом и незначительным содержанием примесей ($\text{CaO} \sim 50$ мас. %, FeO и MnO до 1 мас. %, SiO_2 , Al_2O_3 и K_2O менее 1 мас. %). Установлено, что карбонатные породы мишени, представленные глинистыми известняками, характеризуются высокими содержаниями (в мас. %): CaO до ~ 53 , SiO_2 до ~ 34 , а также Al_2O_3 до 2.1, MgO до ~ 0.8 и незначительными примесями щелочей до 0.1, MnO около 0.06 и TiO_2 около 0.06.

Установлено, что класты углистых алевролитов в зювитах, характеризуются высоким содержанием SiO_2 до ~ 90 мас. % и низким – $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 3.5$ мас. %, являются существенно кремнистыми. Углистые алевролиты мишени, напротив, имеют относительно низкое содержание SiO_2 54 мас. % и высокое – Al_2O_3 15 мас. %, а также относительно высокие содержания компонентов MgO , CaO , FeO и оксидов щелочей, и, судя по всему, представляют собой существенно глинистые разности.

Выявлено, что импактные стекла трех разновидностей зювитов характеризуются широкими вариациями состава и существенным различием петрохимических особенностей.

Алюмосиликатные стекла зювитов I типа обладают, главным образом, полевошпатовым составом с высоким содержанием кремнезема (в среднем 62.8 мас. %), повышенными содержаниями (в мас. %): $\text{Na}_2\text{O} \sim 4.5$ и $\text{K}_2\text{O} \sim 6.7$, $\text{CaO} \sim 2.5$, некоторым количеством $\text{TiO}_2 \sim 0.7$, обусловленным, предположительно, включениями анатаза. При этом компоненты MgO , Al_2O_3 , CaO , FeO в составе стекол образуют отрицательные корреляции с кремнеземом, а K_2O — положительную. При сравнении с химическим составом исходных песчаников и алевролитов выявлено, что импактные стекла зювитов I типа характеризуются относительно высокими содержаниями Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , и низкими — FeO , MgO . При этом установлена хорошая корреляция витрокластов зювитов I типа с кластами алевролитов по компонентам SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , FeO , что позволяет сделать предположение о формировании исследованных фрагментов стекол в основном по этим породам. Согласно диаграмме TAS, витрокласты характеризуются среднекислым и кислым составом, локализируются преимущественно в поле трахитов нормальной щелочности.

Витрокласты зювитов II типа отличаются относительно низкими содержаниями (мас. %): SiO_2 в среднем 59.74 и $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 17.95$, повышенными — $\text{FeO} \sim 5.4$, $\text{MgO} \sim 4.06$ и $\text{TiO}_2 \sim 0.72$, что хорошо согласуется с присутствием в стеклах крупных обособлений TiO_2 . Составы стекол образуют положительную корреляцию CaO и SiO_2 . В сравнении с глинистыми известняками мишени, такие стекла отличаются относительно высокими содержаниями большинства породообразующих компонентов, за исключением CaO . Учитывая результаты работ по экспериментальному моделированию импактного процесса с участием глинистых известняков (Уляшев, Исаенко, 2018) и результаты сравнительного анализа петрохимии витрокластов и пород подложки, можно предположить, что формирование импактных стекол зювитов II типа, скорее всего, связано с глинистой компонентой известняков мишени. В целом витрокласты зювитов II типа характеризуются среднекислым составом, на диаграмме TAS попадают в поле трахиандезитов умеренной щелочности.

Стекла зювитов III типа по химическому составу подразделяются на две группы — силикатные (с содержанием SiO_2 до 99 мас. %) и алюмосиликатные (от 57 мас. % SiO_2). Во всех импактных стеклах отмечается пониженное содержание оксидов щелочей (мас. %): $\text{Na}_2\text{O} \sim 3.6$ и $\text{K}_2\text{O} \sim 2.2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 11.2$, $\text{MgO} \sim 0.71$, $\text{CaO} \sim 1.42$, $\text{FeO} \sim 0.7$ и $\text{TiO}_2 \sim 0.32$. Немаловажно, что MgO в силикатных стеклах имеет отрицательную корреляцию с кремнеземом, Na_2O — положительную, в то время как в алюмо-

силикатных стеклах Na_2O и Al_2O_3 находятся в отрицательной корреляции с SiO_2 . В сравнении с существенно углистыми породами мишени, силикатные стекла характеризуются относительно высокими содержаниями компонентов MgO , CaO , FeO , K_2O и низкими Al_2O_3 и Na_2O , в то время как алюмосиликатные витрокласты обладают относительно низкой концентрацией MgO и высокой — Al_2O_3 . Очевидная корреляция импактных стекол зювитов III типа и существенно углистых пород по кремнезему может указывать на образование силикатной группы стекол по углисто-кремнистым алевролитам, а алюмосиликатной — по углисто-глинистым алевролитам подложки.

На TAS-диаграмме алюмосиликатные витрокласты попадают, главным образом, в поле развитых среднекислых щелочных и умеренно-щелочных составов, а силикатные — в поле ультракислых силекситов пониженной щелочности, что может быть связано с образованием данной группы стекол по существенно кремнеземистым породам (силицитам).

Выявленная корреляция фрагментов импактных стекол, литокластов разновидностей зювитов и соответствующих типов материнских пород по основным породообразующим компонентам указывает на очевидную взаимосвязь кластогенной составляющей с предполагаемым преобладающим протолитом каждого типа зювитов.

Примечательно, что составы импактных стекол всех разновидностей в сравнении с химическим составом зювитов в целом характеризуются повышенной концентрацией щелочей и основного стеклообразующего компонента SiO_2 . Широкое поле составов зювитов и импактных стекол указывает на существенно разнородный литологический и геохимический состав пород подложки, затронутых импактным процессом.

Обломочная компонента всех разновидностей зювитов содержит важнейшие минералы-индикаторы импактного преобразования с различными признаками шокового воздействия, отвечающими основным стадиям ударного метаморфизма (Grieve, Pesonen, 1996; Stöffler, Grieve, 2007), что хорошо согласуется с исследованиями ударных преобразований кремнезема импактитов Карской астроблемы (Минеральный ..., 2012; Лютоев, Лысюк, 2015). Разновидности зювитов характеризуются разным количественным соотношением расплавленной и ударно-измененной обломочной компонент. Выявленные признаки ударного метаморфизма зювитов, согласно увеличению параметров импактного воздействия, включают признаки от начальных низкотермобарических ступеней до высших стадий импактного метаморфизма (Grieve, Pesonen, 1996; Stöffler, Grieve, 2007; Масайтис и др., 1998).

Весьма слабое импактное воздействие с давлением до 5–10 ГПа и постимпактной температурой до 100°C зафиксировано в многочисленных кварцевых и полевошпатовых кластах (нередко в

составе фрагментов песчаников) с крупными неправильными трещинами, преобладающими в зювитах I и II типа. О *слабых* ударных нагрузках с давлением от 5–10 до 20 ГПа и постударной температурой от 100–170°C свидетельствуют планарные трещины в кластах кварца и полевого шпата, присутствующие во всех типах зювитов. Об *умеренном* воздействии ударного метаморфизма на зювиты при давлении от 20 до 35 ГПа и постимпактной температуре 170–300°C свидетельствует наличие мозаицизма, секториально-волнистого погасания, ударного двойникования, блочного строения и систем планарных деформационных элементов в кварцевых и полевошпатовых обломках, свойственных всем типам зювитов. На *интенсивную* импактную нагрузку (давление 35–45 ГПа, постударная температура 300–900°C) указывают редкие находки диаплектовых стекол по кварцу и полевоому шпату, а также их переходных разновидностей, присущих преимущественно зювиту I типа. Повсеместное присутствие моно- и полиминеральных стекол плавления в разновидностях зювитов, значительное количество которых приходится на I тип, свидетельствует о *весьма интенсивном* ударном воздействии с давлением до 45–60 ГПа и более и постимпактными температурами 900–1200°C и выше, также принимая во внимание результаты исследований структурных и химических параметров органического вещества карских импактитов (Корочанцев, 2004). К признакам импактного преобразования при *особо высоких* нагрузках относятся апоугольные алмазы и псевдоморфозы алмаза по органическим остаткам (Shumilova et al., 2018). Условия образования импактитов Карской астроблемы высоких стадий с образованием алмазов оцениваются диапазоном давлений 60–80 ГПа и температур 2300–2500°C (Шумилова и др., 2018).

Во всех зювитовых разновидностях присутствуют признаки активного участия гидротермальных процессов в постимпактной эволюции обломочных импактитов Карской астроблемы. В целом все типы зювитов характеризуются схожим комплексом основных гидротермальных минералов, что хорошо согласуется с результатами исследований гидротермальной минерализации импактитов Карской астроблемы (Наумов, 1996) и отличаются количественным соотношением новообразованных минералов. В зювитах I типа гидротермальные процессы проявляются наличием многочисленных пиритовых скоплений и ореолов гидроксидов железа, окаймляющих некоторые литокласты; многочисленных волокон и чешуек хлорита в межзерновом пространстве и на границах обломков песчаников с вмещающей массой; частично карбонатизированных кварцевых зерен в составе кластов песчаников. О наличии гидротермальных преобразований в зювитах II типа свидетельствует повсеместная карбонатизация обломков песчаников, кварцитов и других силикатных пород и матрикса зювитов, новообразования кремнезема в поровом пространстве,

пиритовая минерализация в кластах известняков, а также цеолитизация крупных кристаллов кальцита в основной массе породы. В постимпактном преобразовании зювитов III типа также существенную роль сыграли гидротермальные процессы, которым благоприятствовала высокая проницаемость данных пород. Свидетельством такого влияния являются многочисленные кристаллы и тончайшие лейсты цеолитов в поровом пространстве и пиритовые включения с ореолами гидроксидов железа в витрокластах и некоторых литокластах; лейсты мусковита и карбоната в межзерновом пространстве нередко карбонатизированных кластов песчаников, интенсивное окремнение кластов известняков. Следует отметить, что обнаруженные признаки гидротермального преобразования в обломочных импактитах Карской астроблемы, в частности карбонатизация и окремнение литокластов и матрикса зювитов, подтверждают и дополняют информацию, полученную ранее при комплексных исследованиях постимпактных новообразований карбоната и кремнезема Карской астроблемы (Минеральный ..., 2012; Лютоев, Лысюк, 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс исследований разновидностей зювитов Карской астроблемы указывает на то, что их различия вызваны преимущественно первичной спецификой состава пород мишени. Во всех разновидностях выявлены и охарактеризованы признаки импактного воздействия, соответствующие четырем стадиям ударного метаморфизма, и продукты постимпактных гидротермальных процессов.

Зювиты I типа характеризуются наименьшим содержанием матрикса (~47%), грано- и кристаллокластов (~6%) и сильноизмененных литокластов (~20%) с максимальным количеством фрагментов алевролитов (до 8%), наибольшим количеством витрокластов (27%). Петрохимически породы характеризуются повышенными содержаниями глинозема, Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO и оксидов щелочей, что может свидетельствовать об их формировании преимущественно по алюмосиликатным породам. Импактированные класты песчаников и алевролитов зювитов I типа, в сравнении с аналогичными исходными породами, характеризуются меньшими содержаниями MgO , CaO и большими – K_2O , SiO_2 и Al_2O_3 . В обломках песчаников выявлены повышенные содержания FeO , MgO , K_2O и низкие – CaO , Al_2O_3 , в кластах алевролитов – высокие содержания K_2O , Al_2O_3 и пониженные – MgO и FeO .

Зювиты II типа отличаются относительно малым количеством (8.5%) импактных стекол, наибольшим содержанием в различной степени преобразованных литокластов (~25%) с максимальным среди других количеством кластов известняков (~5%), а также повышенным содержанием грано- и кри-

сталлокластов (~13%). Породы обладают существенным содержанием CaO и относительно высокими концентрациями глинозема, MgO, Fe₂O₃, K₂O и CO₂, что может указывать на преобладающий глинисто-известковистый состав исходного протолита. Карбонатная компонента кластов известняков в зювитах II типа представлена кальцитом с незначительными примесями (CaO ~ 50 мас. %, FeO и MnO до 1 мас. %). Глинистые известняки подложки обладают высокими содержаниями (мас. %): CaO до ~53, SiO₂ до ~34, Al₂O₃ до 2.1, MgO до ~0.8, а также оксидов щелочей до 0.1, MnO и TiO₂ около 0.05.

Зювиты III типа характеризуются максимальным объемом матрикса (~ 61%), низким содержанием витрокластов (~8%), относительно высоким количеством грано- и кристаллокластов (~10%) и литокластов (~21%) с максимальным, в отличие от других типов, содержанием фрагментов сланцев (~8%). Породам присуще значительное содержание SiO₂, относительно высокие содержания глинозема, MgO и углистого вещества, что указывает на существенно углеродистый состав протолита. Класты углисто-кремнистых алевролитов в зювитах III типа характеризуются высоким содержанием SiO₂ ~ 87 мас. % и низким – Al₂O₃ ~ 3.5 мас. %. Неизменные углисто-глинистые алевролиты отличаются относительно низким содержанием SiO₂ ~ 54 мас. %, высокими (мас. %) – Al₂O₃ 15, MgO, CaO, FeO и оксидов щелочей.

С учетом пестрого неоднородного первичного литологического профиля района Карской астроблемы (Юдович и др., 1998; Шишкин и др., 2012) некоторые расхождения в химическом составе предполагаемого протолита и соответствующего типа литокластов в зювитовых разновидностях видятся вполне допустимыми и закономерными.

В целом импактные стекла зювитов характеризуются широкими вариациями состава, выходящими за пределы областей полевошпатового состава (Шумилова и др., 2019). Алюмосиликатные импактные стекла зювитов I типа имеют преимущественно полевошпатовый состав, высокие содержания Na₂O, K₂O, CaO, отрицательные корреляции SiO₂ с MgO, Al₂O₃, CaO, FeO и положительную – с K₂O при увеличении доли SiO₂. В сравнении с исходными песчаниками и алевролитами у таких стекол отмечаются высокие содержания Al₂O₃, SiO₂, K₂O и низкие – FeO, MgO. Составы витрокластов и обломков алевролитов в зювитах I типа хорошо коррелируются по содержаниям SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO. В импактных стеклах зювитов II типа установлены относительно низкие концентрации SiO₂, Al₂O₃ и высокие – FeO, MgO и TiO₂, положительная корреляционная связь CaO и SiO₂. В сравнении с исходными известняками импактные стекла зювитов II типа характеризуются повышенными содержаниями большинства петрогенных компонентов, за исключением CaO. Установлено, что импактные

стекла зювитов III типа по содержанию SiO₂ делятся на силикатные с отрицательной корреляцией с MgO и положительной – с Na₂O, алюмосиликатные – с положительной корреляцией с Na₂O, Al₂O₃ с SiO₂. В то же время все стекла зювитов III типа отличаются в целом пониженными содержаниями оксидов щелочей, Al₂O₃, MgO, CaO, FeO, TiO₂. По содержанию SiO₂ силикатные стекла хорошо коррелируются с углисто-кремнистыми алевролитами, а алюмосиликатные стекла – с углисто-глинистыми алевролитами.

Выявленная корреляция импактных стекол зювитов с определенными типами пород мишени по основным породообразующим компонентам, судя по всему, указывает на их генетическую взаимосвязь и хорошо согласуется с предположением о различном протолите трех типов зювитов. Предполагается, что импактные стекла зювитов I типа образовались преимущественно по алевролитам. Генезис витрокластов зювитов II типа, скорее всего, связан с глинистой компонентой известняков подложки. Силикатные стекла зювитов III типа сформировались, предположительно, по углисто-кремнистым алевролитам, а алюмосиликатные – по углисто-глинистым алевролитам подложки.

Результаты сравнительного анализа петрохимических особенностей разновидностей зювитов, их витро- и литокластов и пород мишени указывают на их очевидную генетическую взаимосвязь. Исследованные породы по петрохимическим характеристикам значительно отличаются от известных пород вулканического генезиса. На это указывает покрытие существенной области составов на диаграмме TAS точками составов зювитов и их импактных стекол, что хорошо согласуется с литологической неоднородностью протолита и сложными комплексными условиями образования обломочных импактитов.

Во всех типах зювитов зафиксировано присутствие важнейших минералов-индикаторов (кварца, полевого шпата) импактного воздействия с многочисленными признаками, отвечающими основным стадиям ударного метаморфизма – трещиноватость, ударное двойникование, мозаицизм, секториально-волнистое погасание, планарные деформационные элементы в кварце и полевошпате, диаплектовые и расплавные моно- и полиминеральные стекла. Во всех разновидностях зафиксировано бурное развитие постимпактной гидротермальной минерализации, представленной новообразованиями цеолитов, пирита, слюд, карбоната и кремнезема.

Проведенные комплексные исследования выделенных разновидностей зювитов Карской астроблемы, новые данные о минералого-петрографическом и петрохимическом своеобразии исследованных пород позволили подтвердить справедливость произведенной предварительной типизации карских зювитов. Результаты проведенных исследований имеют важное научное и практическое значение

и могут быть использованы для выяснения степени и характера распространения разновидностей зювитов, выявления переходных и новых типов зювитов для полной характеристики импактатов Карской астроблемы с перспективой построения генетической модели формирования и прогноза алмазности данного уникального объекта. Полученные данные также могут быть использованы при изучении других астроблем.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность С.И. Исаенко за изучение фазового состава минеральных компонентов зювитов на рамановском спектрометре, Е.М. Тропникову и С.С. Шевчуку за помощь в проведении микрондовых исследований, О.В. Кокшаровой за выполнение силикатных анализов. Мы благодарны рецензенту статьи Л.В. Сазоновой за полезные комментарии и замечания по тексту.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 17-17-01080. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП “Геонаука” (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), финансируемого из средств НИР ГР № АААА-17-117121270036-7, № АААА-А19-119031390057-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вишневский С.А.* Астроблемы. Новосибирск: Нонпарель, 2007. 288 с.
- Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, переработанное и дополненное. Гл. ред. Петров О.В. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. Т. 1. 432 с.
- Езерский В.А.* Гипербарические полиморфы, возникшие при ударном преобразовании углей // ЗВМО. 1986. Ч. СХV. Вып. 1. С. 26–33.
- Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя // Отв. ред. В.Л. Масайтис. Л.: Наука, 1990. 185 с.
- Классификация и номенклатура метаморфических горных пород: справочное пособие. Новосибирск: Изд-во ОИГТМ СО РАН, 1992. 205 с.
- Корочанцев А.В.* Ударное преобразование битумов: приложение к органическому веществу метеоритов и импактитов. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ РАН, 2004. 179 с.
- Лютюев В.П., Лысюк А.Ю.* Структура и текстура кремнезема импактитов Карской астроблемы // Вест. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 9. С. 24–32.
- Максименко Н.И.* Сравнительный анализ структурно-вещественных особенностей разновидностей зювитов Карской астроблемы // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента. Материалы XXVII научной конференции. Сыктывкар: Геопринт, 2018. С. 121–124.
- Максименко Н.И.* Структурно-вещественные особенности матрикса разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. Материалы X Всероссийской молодежной научной конференции. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2019. № 10. С. 150–151.
- Максименко Н.И., Зубов А.А.* Особенности кластогенных и жилоподобных импактных стекол Карской астроблемы // Новое в познании процессов рудообразования. VII Российская молодежная научно-практическая школа. М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 184–186.
- 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.
- Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С.* Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. 231 с.
- Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И. и др.* Алмазносные импактиты Попигайской астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. 179 с.
- Минеральный мир: структура, разнообразие, конституция минералов, кристаллогенезис и минералообразование, биоминеральные взаимодействия, эволюция минералообразующих процессов // Под ред. Н.П. Юшкина, С.К. Кузнецова. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2012. 354 с.
- Наумов М.В.* Основные закономерности постимпактного гидротермального процесса // Астрономический вестник. 1996. Т. 30. № 1. С. 25–32.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 200 с.
- Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов // Под ред. В.Л. Масайтиса. Л.: Недра, 1983. 159 с.
- Тимонин Н.И.* Импактные кратеры на Пай-Хое, Урал // Уральский геологический журнал. 2006. Т. 53. № 5. С. 3–20.
- Удортин В.В., Конанова Н.В., Попов И.В.* Глубинное строение Карской кольцевой структуры // Изв. Коми НЦ УрО РАН. 2010. Вып. 4. С. 47–52.
- Уляшев В.В., Исаенко С.И.* Моделирование фазовых преобразований в глинистом известняке при импактном воздействии // Вест. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 4. С. 40–44.
- Устрицкий В.И.* Мезозойские отложения, кайнотипные лавы и туфобрекчии Пай-Хоя // Тр. ИГ Арктики. 1953. Т. 72. С. 3–13.
- Фельдман В.И.* Петрология импактитов. М.: Изд-во МГУ, 1990. 299 с.
- Шишкин М.А., Шкарубо С.И., Молчалова Е.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Южно-Карская. Лист R-41 – Амдерма. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 383 с. + 10 вкл.
- Шумилова Т.Г., Исаенко С.И., Ковальчук Н.С. и др.* Разновидности импактитов, апоугольных алмазов и сопутствующих углеродных фаз Карской астроблемы // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2016). Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. С. 270–271.
- Шумилова Т.Г., Исаенко С.И., Макеев Б.А. и др.* Ультравысокотемпературная ликвация импактного расплава // Докл. АН. 2018. Т. 480. № 1. С. 90–93.
- Шумилова Т.Г., Ковальчук Н.С., Макеев Б.А.* Геохимическая специфика алмазносных зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой) // Докл. АН. 2019. Т. 486. № 2. С. 233–236.

- Юдович Я.Э., Беляев А.А., Кетрис М.П. Геохимия и рудогенез черных сланцев Пай-Хоя. СПб.: Наука, 1998. 366 с.
- Юшкин Н.П., Лысюк А.Ю. Сценарий и основные параметры Карского импактного события // Вест. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2001. № 8. С. 14–17.
- Grieve R.A.F., Pesonen L.J. Terrestrial impact craters: their spatial and temporal distribution and impacting bodies // Earth, Moon, and Planets. 1996. V. 72. P. 357–376.
- Langenhorst F. Shock experiments on pre-heated α - and β -quartz: II. X-ray and TEM investigations // Earth Planet. Sci. Lett. 1994. № 128. P. 683–698.
- Langenhorst F. Shock metamorphism of some minerals: Basic introduction and microstructural observations // Bull. Czech Geol. Surv. 2002. V. 77. № 4. P. 265–282.
- Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma-igneous rock system // Earth Sci. Rev. 1994. V. 37. № 3–4. P. 215–224.
- Pohl J., Stöffler D., Gall H., Ernst K. The Ries impact crater // Impact and explosion cratering. New York: Pergamon Press, 1977. P. 343–404.
- Shumilova T.G., Isaenko S.I., Ulyashev V.V. et al. After-coal diamonds: an enigmatic type of impact diamonds // European J. Mineral. 2018. V. 30. № 1. P. 61–76.
- Stöffler D., Grieve R.A.F. Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendation of the International Union of Geological Sciences // Impactites: Chapter 2.11. Eds. D. Fettes, J. Desmons. Cambridge: University Press, UK. 2007. 82–92.
- Stöffler D., Hamann C., Metzler K. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system // Meteorit. Planet. Sci. 2018. № 53. P. 5–49.
- Trieloff M., Deutsch A., Jessberger E.K. The age of the Kara impact structure, Russia // Meteorit. Planet. Sci. 1998. № 33. P. 361–372.

Petrological Characteristics of Suevite Varieties of the Kara Astrobleme (Pay-Khoy, Russia)

N. I. Maximenko¹, T. G. Shumilova¹, and N. S. Kovalchuk¹

¹*Yushkin Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia*

The comprehensive study of clastic impactites using modern research methods has been provided. The detailed mineralogical and petrographic characteristics of three varieties of suevites from the Kara Astrobleme (Pay-Khoy, Russia) have been described in detail with a special attention to the description of the clastic components. The peculiarities of morphology, internal structure, chemical and mineral phase composition of suevite impact glasses have been characterized. The described data have justified the provided earlier classification of the impactites. The presence of the most important mineral indicators of the impact process with signs of all the main stages of impact metamorphism and post-impact hydrothermal mineralization in all suevite varieties has been established. The results of the study will contribute to identification of new and transitional types of suevites for the purpose of complete characterization of the kara impactites, and can be used for a genetic model of this unique object and other astroblemes.

Keywords: Kara astrobleme, suevite, impact metamorphism, impact glass