

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА / GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY. GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69>

КРИТЕРИИ ФАЦИАЛЬНОГО ДЕЛЕНИЯ ЗЮВИТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЗЮВИТОВ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ)

Научная статья

Максименко Н.И.^{1,*}, Шумилова Т.Г.²

¹ ORCID : 0000-0001-8130-453X;

² ORCID : 0000-0002-1772-3606;

¹ Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация

² Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nadiamaximenko[at]mail.ru)

Аннотация

Проведено комплексное исследование, выяснены макроскопические, структурно-текстурные и петрографические особенности трех типов зювитов Карской астроблемы. На основе анализа данных о генетических особенностях импактитов и данных материаловедения в области порошковой металлургии предложен комплекс основных критериев фациального расчленения зювитов. По выявленным особенностям зювитов с применением предложенного комплекса критериев фациального деления для Карской астроблемы выделено две фации зювитов – фация донных центробежных потоков и фация аэродинамических выбросов. Предложена принципиальная схема расположения выделенных фаций в разрезе коптогенного комплекса Карской астроблемы. Данный комплекс критериев фациального разделения зювитов может быть использован при исследовании зювитов других астроблем, что имеет значение для прогнозирования и поисков полезных ископаемых в других астроблемах в целом.

Ключевые слова: зювит, импактит, импактная фация, классификация, Карская астроблема.

CRITERIA FOR THE FACIES DIVISION OF SUVITES (ON THE EXAMPLE OF SUVITES OF THE KARA ASTROBLEME)

Research article

Maksimenko N.I.^{1,*}, Shumilova T.G.²

¹ ORCID : 0000-0001-8130-453X;

² ORCID : 0000-0002-1772-3606;

¹ The Institute of Geology, Federal Research Centre “Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”, Syktyvkar, Russian Federation

² Institute of Geology of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation

* Corresponding author (nadiamaximenko[at]mail.ru)

Abstract

A complex study of the macroscopic, structural-textural and petrographic features of the three types of suevites of the Kara astrobleme has been carried out. The general criteria for facies definition of suevites has been proposed based on the analysis of the genetic features of impactites and materials science data in the field of powder metallurgy. According to the revealed features of the Kara suevites on the basis of the proposed criteria two facies of the suevites for the Kara astrobleme have been determined – the facies of bottom radial flows and the facies of aerodynamic ejections. The position of the facies in the cross-section of the coptogenic complex of the Kara astrobleme has been proposed. This set of criteria for facies separation of suevites can be used in the studies of suevites of other astroblemes, which is important for geological survey and prospecting of mineral resources at other astroblemes as a whole.

Keywords: suevite, impact rock facies, Kara Astrobleme, impactite, impactogenesis.

Введение

В результате импактитогенеза – процесса изменения вещества при высокоскоростных столкновениях твердых космических тел [1, С. 7], возникают импактиты, отличающиеся обстановками образования, которые могут рассматриваться как различные фации импактитов.

Сегодня существует несколько схем подразделения импактитов на фации [2, С. 85], [3, С. 70], [4], [5]. Тем не менее фациальная специфика импактитов остается мало исследованной, в этой области остаются нерешенными многие вопросы. В частности, имеющиеся современные схемы фациального расчленения импактных пород базируются на разных принципах и не сопоставимы друг с другом напрямую.

Ранее В.И. Фельдманом отмечалось, что генезис зювитов может быть связан с разными обстановками формирования, что позволяет подразделить эти породы на разные фации [3, С.112]. В то же время, не было предложено конкретных критериев, которые могли бы быть использованы для выявления фациальной принадлежности зювитов.

Карская астроблема – это гигантский древний метеоритный кратер, располагающийся в 200 км к северу от г. Воркута, близ побережья Карского моря. Карская структура характеризуется хорошей обнаженностью, позволяющей

детально исследовать особенности импактных пород и характер взаимоотношений импактитов в коренных выходах [6], что особенно ценно при анализе фациальной принадлежности зювитов.

Зювиты Карской астроблемы детально исследовались с начала 70-х годов, когда на территории астроблемы производились обширные работы производственников и сотрудников ВСЕГЕИ. Были изучены геологические и петрографические особенности, выделены разновидности карских зювитов по размеру обломочной компоненты, соотношению фрагментов импактных стекол, литокластов и матрикса [7].

С 2015 года сотрудниками Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН проводится системное изучение импактитов Карской астроблемы [8], [10], [11], [12]. Карские зювиты по комплексу признаков были разделены на три типа, предположительно образованные по разному преобладающему типу протолита [9]. Зювиты, впервые обнаруженные на р. Анарога (зювиты I типа), в данной работе получили название зювиты Анарогского типа, они, образовались главным образом по алевролитам и песчаникам мишени. Зювиты, изученные на р. Кара, ниже устья ручья Тогорей-Яха (зювиты II типа), названы зювитами Тогорейского типа, они были сформированы преимущественно по известковистым осадочным породам и известнякам. Выявленные на р. Сопчаю (зювиты III типа) названы зювитами Сопчаюского типа, их образование было связано с существенно углистыми осадочными породами мишени. По мере детализации исследований нами было установлено, что выделенные нами ранее типы зювитов по ряду характеристик имеют существенные различия, которые не могут быть объяснены только спецификой состава их протолита.

Ранее в литературе указывались определенные особенности карских зювитов, которые могут указывать на их генетическое различие, связанное с разными обстановками формирования [7], [13]. Некоторые специфические черты также были отмечены нами при исследовании зювитов западной части кратера [14]. До настоящего времени детального исследования фациальных особенностей зювитов Карской астроблемы не было произведено и по фациальным признакам эти породы не расчленялись.

Сегодня существует необходимость более углубленного анализа генетических особенностей зювитов Карской астроблемы для определения критериев выделения фаций зювитов. Это важно для фациальной диагностики импактитов с целью прогнозирования и поиска полезных ископаемых в других астроблемах в целом, для лучшего понимания и решения фундаментальных вопросов импактитогенеза и уточнения принципиальной модели образования и геологического строения крупных метеоритных кратеров.

Целью данного исследования является исследование макроскопических, структурно-текстурных и петрографических особенностей трех выделенных типов зювитов Карской астроблемы для выяснения специфики их образования и определения комплекса критериев фациального деления зювитов.

Методика исследования

Материалом для исследования являются три типа зювитов, изученные в коренных выходах и опробованные в ходе экспедиционных работ 2015, 2017, 2021 годов на территории южной части Карской астроблемы в бассейнах рр. Анарога, Кара и Сопчаю. Первоначально в полевых условиях оценивались, описывались и документировались общие характеристики зювитов на макроуровне – мощность и протяженность коренных выходов, характер выветривания, наличие и специфика контактов с другими породами; производился пробоотбор штучных образцов.

Лабораторные исследования проводились в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар. Для изучения были подобраны представительные образцы зювитов. Из штучных образцов изготавливались шлифованные пластины и двусторонне-полированные шлифы. В шлифованных пластинах исследовались структурно-текстурные особенности литологических компонентов зювитов на макроуровне – литокластов, фрагментов импактных стекол и матрикса [15].

Шлифы изучались с применением оптической и электронной сканирующей микрокопии с использованием оптического микроскопа Nikon ECLIPSE E400 POL и сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments X-Max. В зювитах анализировались структурно-текстурные особенности, характер взаимоотношений кластогенной и расплавной компонент и матрикса на микроуровне. Исследования на микроуровне производились на сканирующем электронном микроскопе в режиме обратно-отраженных и вторичных электронов (аналитик Е.М. Тропников). С применением электронного микроскопа уточнялись и дополнялись характеристики зювитов, полученные при оптическом изучении пород, детально исследовалась специфика и характер литификации матрикса.

Определение фациальных особенностей проводилось на основе анализа выявленных признаков карских зювитов с учетом имеющихся данных о генетических особенностях импактитов по [1], [3], [16], [17] и данных материаловедения в области порошковой металлургии [18], [19]. В результате проведенного анализа предложен комплекс критериев фациального расчленения зювитов.

Результаты

Зювиты представляют собой полимиктовые импактные брекчии, сложенные фрагментами импактного стекла (витрокластами), фрагментами пород и минералов мишени (лито- и кристаллокластов), которые покоятся в тонкодисперсной матрице того же состава [15]. Среди зювитов были выделены породы, отличающиеся механизмами формирования – отложения аэродинамической фации и породы донной фации [3, С.112], [17], [20].

Исследователями предлагались различные признаки фациального расчленения зювитов. Отличительным признаком отложений донной фации В.И. Фельдман считал спекшийся, нечеткий характер контактов стекол с матриксом [1], [3]. В качестве возможного критерия отличия пород взрывного облака и придонных потоков исследователем предлагалась степень спекания зювитов с высоким содержанием фрагментов стекла [3, С. 113]. Отмечалось, что отложения нижней части возвращенных зювитов «вряд ли вообще испытали выброс» [3, С. 109], для них характерны признаки спекания импактных стекол матрикса и «пропитка матрикса стеклом» [16, С. 158]. По мнению С.А. Вишневого, признаками полимиктовых брекчий донной фации являются неоднородное строение,

плотность, «исключительно сложные вплоть до струйно-вихревых переплетений» взаимоотношения с другими импактитами и тагамитами, бескорневой характер включений одних пород в других, следы «динамического взаимодействия на стадии еще горячего и подвижного стекла». Такие породы располагаются в нижней части кратера и перекрыты отложениями взрывного облака [17, С. 10–11]. Л.В. Сазоновой было отмечено, что на образование зювитов в условиях донной фации указывает линзовидно-полосчатая и струйчатая текстура матрикса, сформированная при движении центробежных потоков [3, С. 111–112], [21]. Одним из ведущих признаков зювитов донной фации указывались их тесное перемежение и взаимные незакономерные переходы с расплавленными породами, свидетельствующие об интенсивном перемешивании материала донных потоков во время движения [3], [16], [17].

Признаками отложений взрывного облака В.И. Фельдман считал резко закаленные границы и аэродинамическую скульптуру поверхности витрокластов [1, С. 94]. С.А. Вишневицкий отмечал, что отложения взрывного облака залегают в верхней части коптогенного комплекса, перекрывая другие импактиты. Они, в отличие от пород донной фации, обычно обладают монотонным, «седиментационно чередующимся» строением, обусловленным хорошей гомогенностью материала облака при перемешивании в условиях свободного полета [17, С. 27–28], [22, С. 9]. Такие породы, как правило, мелкообломочные и слабосцементированные, содержат массивные, пористые и пемзовидные стекла, крупные из которых часто имеют облик «вскипевших» [17]. Широкое развитие в зювитах аэродинамической фации пузырчатых стекол – пемз и шлаков, наиболее распространенных в верхних горизонтах коптогенного комплекса [3, С. 88], [16, С. 158], обусловлено более благоприятными обстановками газоотделения пород аэродинамической фации, чем пород донной фации [3, С. 88].

Таким образом, на сегодняшний день существуют предпосылки подразделения зювитов на фацию аэродинамических выбросов и фацию придонных потоков [3, С. 112]. Среди отличительных особенностей пород разных фаций указывались также структурная позиция зювитов в кратере, особенности строения, структурно-текстурные и петрографические особенности, характер взаимоотношений импактных стекол и матрикса.

Тем не менее, несмотря на вышеизложенное, до настоящего времени комплекса четких критериев выделения фациального типа зювитов не было предложено. Для выявления генетических признаков и анализа фациальных особенностей обломочных импактитов нами были детально исследованы типы зювитов Карской астроблемы, которые детально описываются ниже.

Макроскопическая характеристика карских зювитов

Зювиты Анарогского типа располагаются на правом берегу р. Анарога, в 200–500 м выше устья руч. Лавовый, где образуют коренные субвертикальные выходы видимой мощностью до 15–20 м и протяженностью первые сотни метров [23]. В ~200 м выше устья руч. Лавовый (рис. 1) находится скальный массив высотой до 15 м и протяженностью около 100 м, сложенный зювитами и расплавленными породами, находящимися в тесных пространственных взаимоотношениях [11].

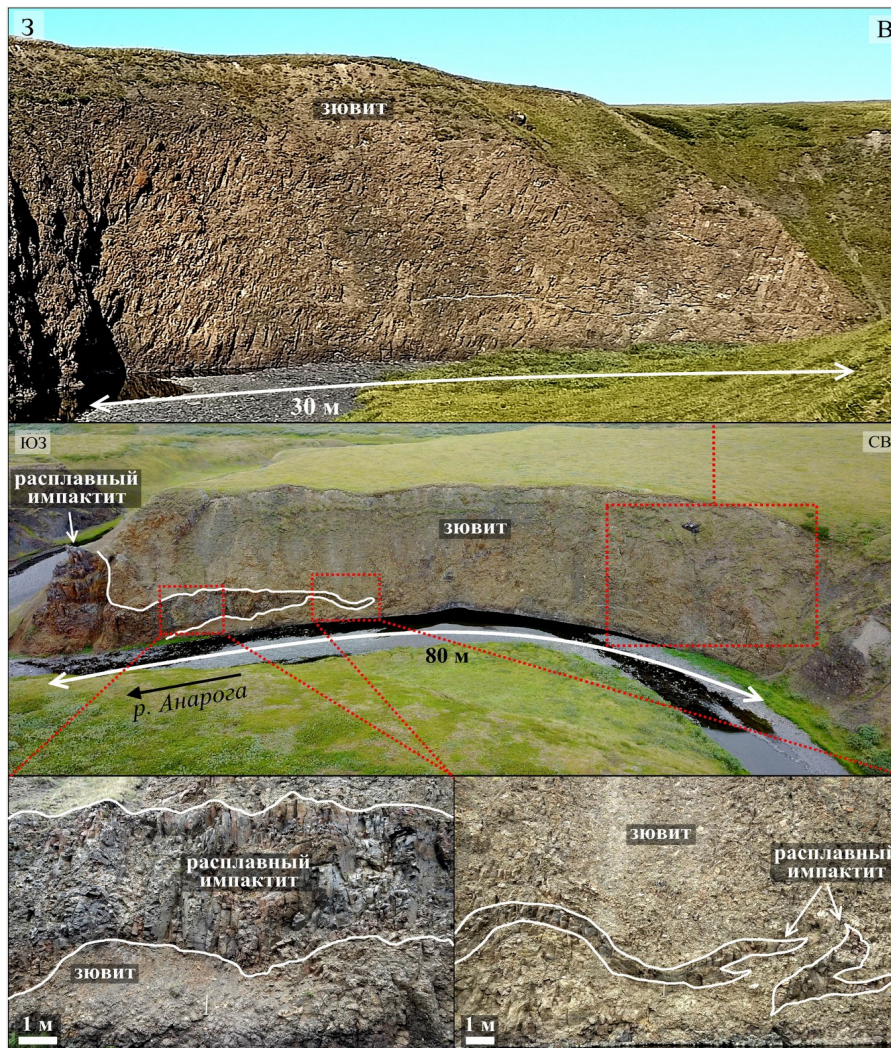


Рисунок 1 - Тесные взаимоотношения зювитов Анарогского типа и расплавных пород в обнажении на правом берегу р. Анарога, в 200 м выше по течению от устья руч. Лавовый по [11]
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.1>

Примечание: в центре – фото А.А. Зубова

Расплавные импактиты образуют массив со столбчатой отдельностью в юго-западной части выхода (рис. 1), разбиты грубыми трещинами на блоки, имеющие гладкую поверхность и острые сколы, с выветрелой стороны коричневатого-серого цвета. Эти породы характеризуются флюидальной и полосчатой текстурой, иногда содержат маломощные линзовидные тела зювитов. В северо-восточном направлении массив расплавных импактитов постепенно переходит в линзовидное тело, которое разбивается на несколько рукавов, выклинивающихся в зювитах. По мере движения на северо-восток расплавный массив полностью переходит в зювиты. Последние в северо-восточной части обнажения характеризуются массивным обликом, имеют неясно выраженную столбчатую отдельность.

Зювиты Анарогского типа – это массивные, плотные породы с высоким содержанием витрокластов неправильной формы и причудливыми, неровными очертаниями. Зювиты имеют сходство с расплавными породами по внешнему облику и формам выветривания, характеризуются брекчиевой текстурой и неоднородной окраской от серого до буровато- и зеленовато-серого цвета, имеют очень низкую пористость, которая инструментально оценивается до 1 % или практически отсутствует (по данным рентгеновской микротомографии с разрешением 25 мкм) [12]. В соответствии с классификацией [15] по размеру кластогенной составляющей породы являются лапиллиевыми, размер кластов варьирует от первых мм до 10–20 см, изредка до 0.5–1.5 м, и в среднем составляет около 2–3 см,

Зювиты Тогорейского типа были изучены в правом борту р. Кара, в 100 м ниже устья руч. Тогорей-Яха. Они образуют субвертикальный скальный выход мощностью до 30 м и протяженностью более 1 км [11], [23], изрезанный глубокими промоинами, формирующими крупные зубообразные столбы с острыми вершинами и массивными основаниями (рис. 2).

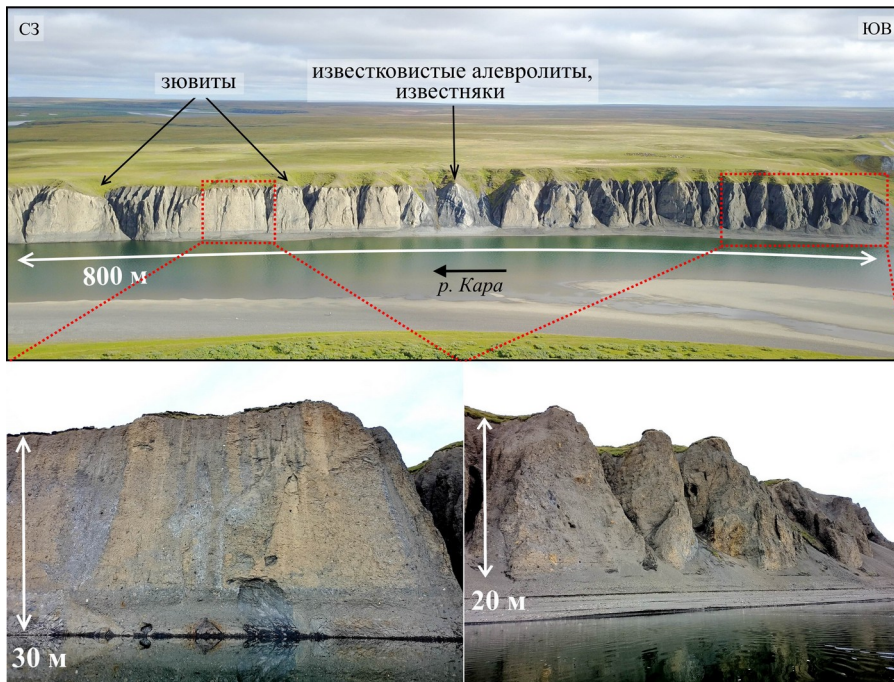


Рисунок 2 - Коренной скальный выход зювитов Тогорейского типа на правом берегу р. Кара по [11]
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.2>

Примечание: сверху – фото А.А. Зубова

В юго-восточной, прикраевой части выхода отмечается контакт зювитов с дислоцированными углистыми алевролитами мишени. В центральной части выхода находится крупный (~40 м) блок известковистых алевролитов с системами субсинхронно ориентированных конусов разрушения, который сменяется крупным (~30 м) блоком известняков. В участке выходов пород мишени обнажение характеризуется отрицательными формами рельефа, что обусловлено более сильным воздействием эрозионных процессов на известняки.

Зювиты Тогорейского типа представляют собой массивные, довольно плотные, но хрупкие, пористые и трещиноватые породы с острыми сколами. Поры в зювитах видны невооруженным глазом, их содержание существенно выше, чем в зювитах Анарогского типа, составляет около 7 об. % [12]. Породы имеют пестрый облик, с выветрелой поверхности светло-серые, в свежем сколе серого цвета. По крупности обломочной компоненты являются лапиллиевыми и агломератово-лапиллиевыми [15], средний размер кластов составляет 2–3 см, иногда 5–6 см. Часто в зювитах присутствуют крупные (до 1.5 м) фрагменты пород мишени и импактных стекол. Витрокласты зювитов Тогорейского типа имеют изометричную или удлиненную, часто аэродинамическую форму и четкие очертания.

Зювиты Сопчаюского типа имеют протяженные коренные выходы в среднем течении р. Сопчаю. Нами было изучено обнажение на левом берегу реки. Выход имеет протяженность более 500 м и мощность до 10 м, достаточно пологие склоны с крутизной около 60° (рис. 3) [11], [23]. В рельефе обнажения положительно выделяются крупные неправильные по форме, угловатые глыбы светло-серых, более плотных и наименее выветрелых зювитов.

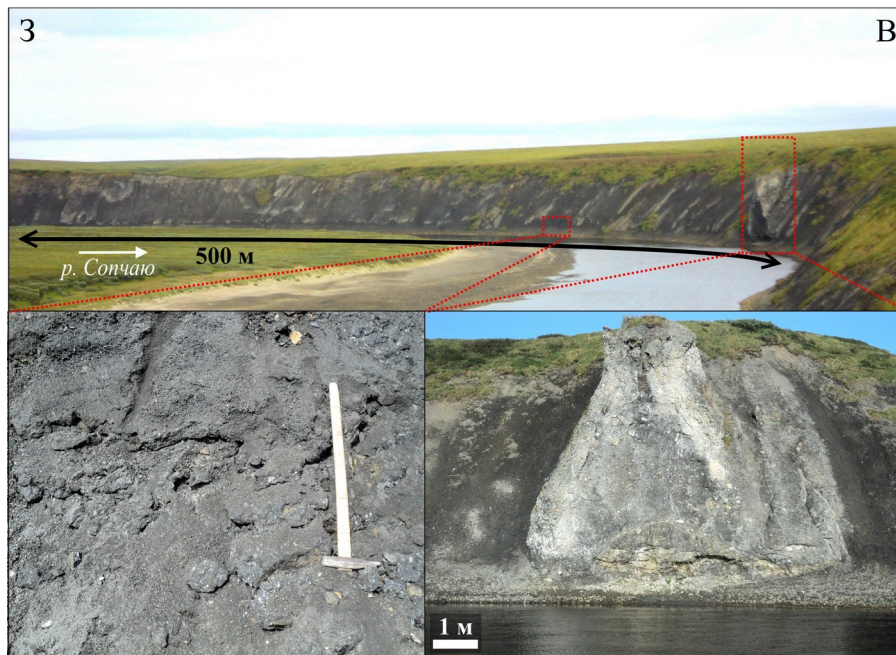


Рисунок 3 - Коренной скальный выход зювитов Сопчаюского типа на левом берегу р. Сопчаю по [11]
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.3>

Зювиты с поверхности разбиты густой сетью трещин, имеют черепитчатую или чешуйчатую отдельность, рыхлые, участками интенсивно дезинтегрированы до сыпучего состояния. Породы с поверхности серые, в свежей зачистке – темно-серые до черного цвета, сильно обводненные, пестрые из-за разноцветных вкрапленников импактных стекол. Зювиты хрупкие, трещиноватые и пористые (содержание пор оценивается в 14 об.% по [12]). Породы содержат многочисленные относительно мелкие (около 1–3 см, единично до 25 см) фрагменты пород мишени и витрокласты, по размеру обломочной компоненты являются лапиллиевыми [15].

Микроскопическая характеристика карских зювитов

Микроскопические особенности зювитов и их составных компонентов – кристалло- и литокластов, витрокластов и матрикса, исследовались с помощью оптической и электронной сканирующей микроскопии. Далее подробно рассматриваются характеристики компонентов, играющих значимую роль при реконструкции фациальных обстановок формирования зювитов – фрагментов импактных стекол и матрикса. Характеристика особенностей кристаллокластов и литокластов трех типов зювитов приводится в кратком виде, с подробным описанием можно ознакомиться в работе [8].

Зювиты Анарогского типа. Содержание кристаллокластов в породах составляет ~6 об.%, они представлены полевыми шпатами, кварцем, пиритом, редко серицитом, мусковитом, биотитом и хлоритом. Литокласты представлены фрагментами алевролитов и аргиллитов, песчаников, различных сланцев и алевросланцев, редко известняков и силицитов [8].

Зювиты на микроуровне характеризуются высоким содержанием витрокластов (от 25 до 32 об.%), представленных в различной степени измененными, преимущественно, расплавленными импактными стеклами, в редких случаях – диаплектовыми [8]. Расплавленные стекла образуют неправильные протяженные лентообразные и изометричные, кляксообразные обособления (рис. 4), имеют флюидальную иногда полосчатую, массивную, реже пористую текстуру, размеры в шлифах составляют от 100 до 600 и более мкм. Границы витрокластов часто неровные, волнистые, пламенеvidные, кляксообразные и причудливо закрученные, как правило, нечеткие, имеют спекшийся характер очертаний, постепенно переходят в матрикс зювита (рис. 4).

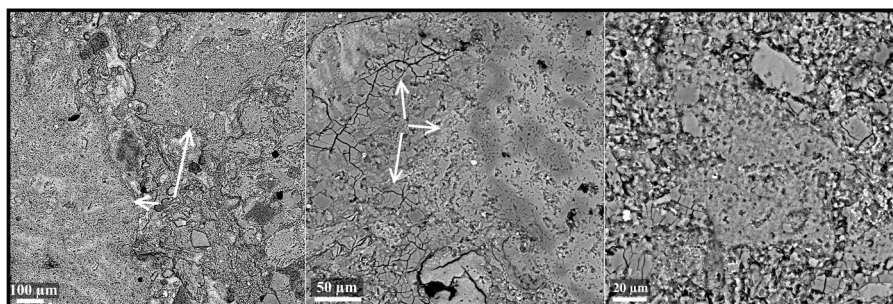


Рисунок 4 - Неправильные обособления «импактных стекол», спекшиеся с матриксом, в зювитах Анарогского типа
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.4>

Примечание: СЭМ-изображения, упруго-отраженные электроны

В проходящем свете импактные стекла зювитов характеризуются светло- и темно-коричневым цветом. В стеклах зачастую наблюдаются характерные для полевых шпатов при выветривании изменения цвета и облика (потемнение и помутнение), свидетельствующие о замещении пелитом. Неизмененные прозрачные витрокласты встречаются реже. Они часто зональны, имеют разную цветовую окраску прикраевых и внутренних частей (от прозрачной до коричневой).

Флюидальная текстура витрокластов иногда подчеркивается цепочками изометричных и удлиненных пор и реликтовых включений пород и минералов. Поры в «импактных стеклах» имеют средний диаметр до 10 мкм, нередко имеют тонкие каймы от светло-желтого до темно-коричневого цвета с волокнистым строением и волнистым погасанием. На границе импактных стекол с матриксом иногда прослеживается рыжеватого-коричневая нераскristализованная кайма, обогащенная, предположительно, гидрооксидами железа.

В витрокластах содержится от 5–10 до 15 % интенсивно измененных фрагментов пород, минералов и их реликтов. Включения представлены кварцем, полевыми шпатами, глинистыми аргиллитами, рудными минералами (пиритом, титанитом), сланцами и реликтами других минералов и литокластов. Кварцевые включения в «стеклах» нередко обладают планарными трещинками. Включения в стеклах часто ориентированы вдоль направления течения расплава (по флюидальности), изредка формируют очковую текстуру витрокластов.

Содержание матрикса в исследованных образцах зювитов Анарогского типа колеблется в пределах 44–48 об.% и, в среднем, составляет около 45 об.%. При оптическом изучении было выявлено, что матрикс имеет желтовато-коричневатый до серовато-рыжеватого-коричневого цвета, характеризуется частичной изотропностью. Матрица выполнена продуктами застывания импактного расплава и, в меньшей степени, различными минеральными фрагментами. Частицы импактных стекол в матриксе обнаруживаются в виде неправильных кляксообразных обособлений, как бы пропитывающих породу (рис. 4), или каплевидных включений со сглаженными очертаниями [24]. Минеральные класты в матриксе представлены мелкими, часто округлыми (вероятно, оплавленными) частицами полевых шпатов (анортклаза), кварца, реже слюд (мусковита, серицита, хлорита), включениями кальцита [25]. Также отмечаются включения рудных минералов – пирита, титанита, титаномагнетита, рутила и мельчайшие частицы углеродистого вещества.

По данным, полученным в результате микронзондовых исследований, установлено, что матрикс зювитов представляет собой смесь, состоящую из частиц и капель застывшего импактного расплава, минеральных компонентов и вмещающего тонкодисперсного глинисто-слюдистого материала. Выявлено, что для матрикса зювитов Анарогского типа характерно плотное строение, наличие мелких (10–50 мкм) трещинок и низкое (первые проценты) содержание микропор размером менее 5 мкм (рис. 5), которые находятся за пределами чувствительности инструментального определения с применением использованной рентгеновской микротомографии [12]. Поры в матриксе изолированного типа, имеют изометричную форму и незначительные размеры (менее 10 мкм). Установлено, что до 80 % объема матрицы зювитов Анарогского типа выполнено относительно однородным вмещающим межкластовым материалом, в котором очертания минеральных компонентов неразличимы. Отдельные минеральные фрагменты, имеющие отчетливые контуры, занимают около 15–20 об. % матрикса. Они имеют угловатые или слабо окатанные очертания, иногда образуют «спеки» друг с другом неправильной формы.

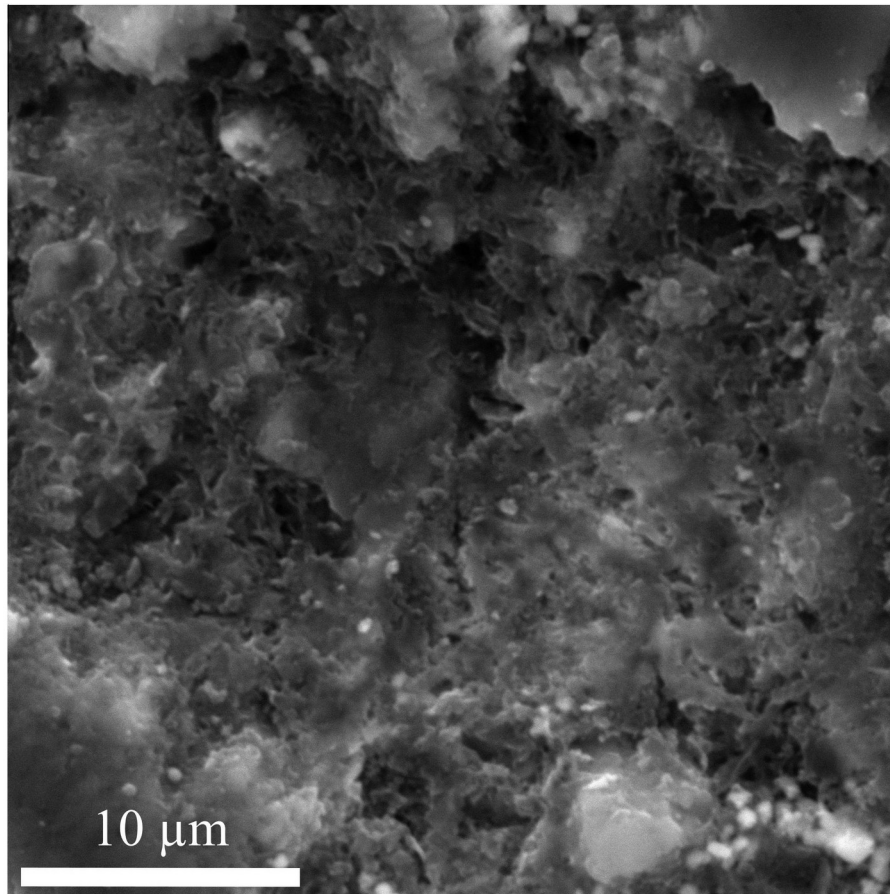


Рисунок 5 - Электронно-микроскопическое изображение матрикса зювита Анарогского типа
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.5>

Примечание: изображение в режиме обратно-рассеянных электронов

Зювиты Тогорейского типа содержат 10–16 об. % минеральных кластеров – кальцита, полевых шпатов, кварца, редко пирохлора, мусковита, серицита, хлорита. Содержание литокластеров составляет около 24 об.%, среди них встречаются различные сланцы и известняки, реже песчаники, алевролиты, силициты и угли [8].

На микроуровне импактные стекла в зювитах Тогорейского типа занимают от 13 до 21 об.% [8]. Они представлены, главным образом, тонко девитрифицированными стеклами размером от 700 мкм до 4 мм. Оптически, витрокласты зювитов этого типа имеют желтовато- или зеленовато-коричневато-серую окраску, иногда прозрачны. Цвет стекол зависит от степени преобразования. Выявлено, что слабоизмененные импактные стекла частично прозрачны, интенсивно преобразованные – непрозрачны, имеют однородную окраску. Витрокласты имеют, преимущественно, изометричную форму. Среди них встречаются лепешки, лапилли, ленты и другие образования аэродинамической формы, а также угловатые (ксеноморфные) фрагменты (рис. 6). Границы «стекол» с вмещающим матриксом зювитов, как правило, четкие, могут быть как ровными, так и волнистыми (рис. 6), нередко подчеркнуты тончайшей каймой темно-серого цвета, судя по всему, аккреционного характера.

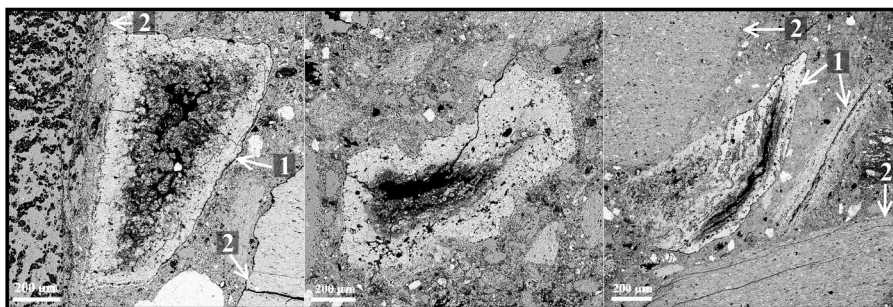


Рисунок 6 - Витрокласты ксеноморфной и аэродинамической формы с резко закаленными границами в зювитах Тогорейского типа:

1 – витрокласты; 2 – фрагменты пород мишени
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.6>

Примечание: СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

Витрокласты характеризуются пористой, реже массивной и флюидальной текстурой. Поры в «стеклах» овальные или округлой формы, каплевидные, имеют размеры до 100–200 мкм и занимают до 40 % фрагментов, нередко расположены субпараллельно друг другу по направлению флюидальности. Стенки пор в скрещенных николях обнаруживают светлую окраску и волнистое погасание. Флюидальная текстура стекол иногда подчеркнута тончайшими червеобразными, округлыми, субпараллельно расположенными включениями анатаза. Реже импактные стекла характеризуются комковатой и очковой текстурой, обусловленной реликтами и теневыми структурами захваченных расплавом обломков, которые развиты преимущественно у интенсивно измененных фрагментов.

Иногда витрокласты характеризуются зональным строением, имеют отчетливую более светлую внешнюю кайму и более темную внутреннюю зону. Часто в центральных частях расплавных фрагментов наблюдаются раскристаллизованные участки, а в краевых зонах, стекло большей частью изотропно. Фрагменты застывшего импактного расплава содержат включения сильно измененных фрагментов пород размерами до 600 мкм и рваными оплавленными краями. В стеклах с флюидальной текстурой отмечаются мелкие включения кварца, кальцита и слюды. Интенсивно измененные витрокласты повсеместно содержат мелкие угловатые черные включения, предположительно, углеродистого вещества.

При петрографическом изучении установлено, что матрикс зювитов Тогорейского типа слагает до половины объема пород и представлен неоднородной пористой, участками спекшейся тонкодисперсной массой от серого до темно-серого цвета. Матрикс выполнен различными минеральными фрагментами, среди которых преобладают кварц, полевые шпаты (главным образом альбит) и кальцит, в меньшей степени слюды, частицы углеродистого вещества, гранат, единичные включения анатаза и магнетита [25].

В ходе изучения с помощью микрозондового анализа установлено, что содержание пустотного пространства во вмещающей массе может достигать ~10 об.%. Поры изолированного и открытого типа, в большинстве имеют неправильную форму, достигают размера 10–20 мкм (рис. 7). В матриксе присутствует до 30–40 % спекшихся минеральных кластов, образующих минеральные агрегаты – спеки. Спеки характеризуются неправильной, кляксообразной морфологией и достаточно четкими очертаниями, внутри них прослеживаются реликтовые очертания отдельных минеральных кластов, которые на контактах друг с другом имеют смычки (рис. 7). Вмещающий спекшийся фрагменты межкластовый материал занимает около 50 % объема матрикса и представлен глинисто-слюдистой массой.

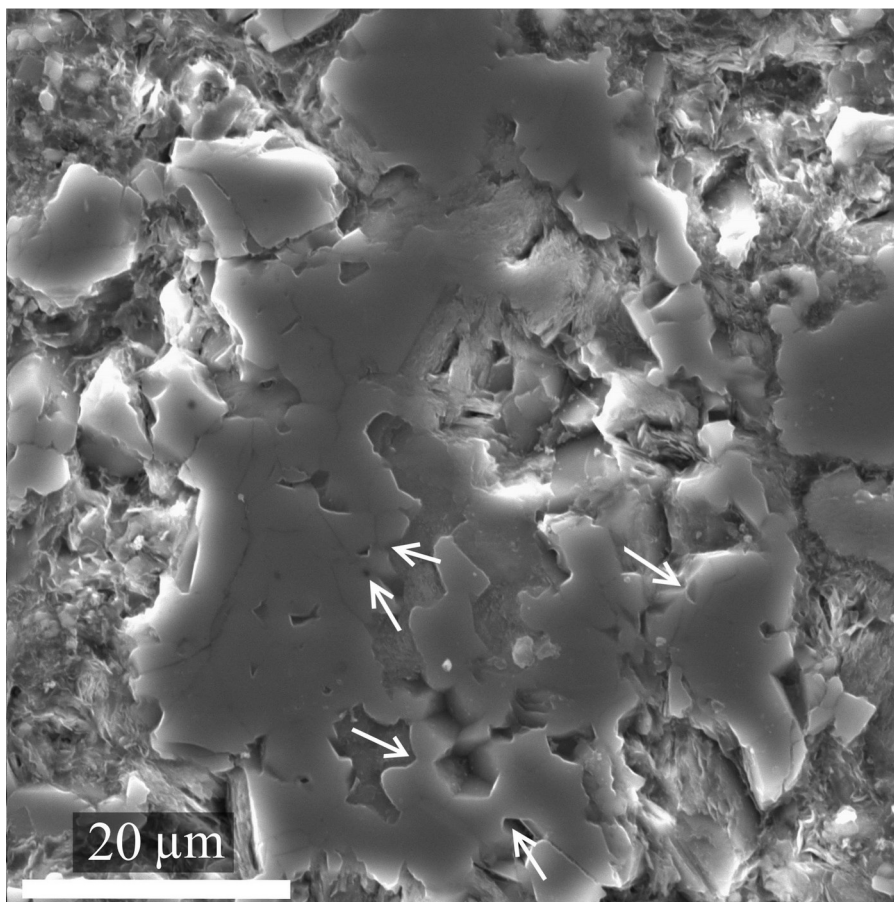


Рисунок 7 - Электронно-микроскопическое изображение матрикса зювитов Тогорейского типа
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.7>

Примечание: обратно-рассеянные электроны; стрелками выделены перемычки между спекшимися минеральными кластами

Зювиты Сопчаюсского типа содержат класты и зерна кальцита, полевых шпатов, кварца, мусковита, серицита, редко хлорита и пирохлора (около 10 об.%). Литокласты занимают ~ 22 об.% пород и представлены кластами углистых, реже слюдистых сланцев, углей, алевролитов, известняков, реже песчаников, силицитов, единично – кварцевых долеритов [8].

Импактные стекла в зювитах Сопчаюсского типа на микроуровне занимают около 15 % от их объема [8]. Они в разной степени раскристаллизованы, имеют размеры от ~ 60 мкм до 4–5 мм. При изучении под оптическим микроскопом установлено, что продукты застывания импактного расплава характеризуются разнообразными формами. В породах встречаются как изометричные, так и удлиненные расплавные фрагменты. Витрокласты характеризуются кластогенной и аэродинамической формой, среди них обнаружены угловатые и слабоокруглые, паутино- и лентообразные, таблитчатые и клиновидные обособления (рис. 8).

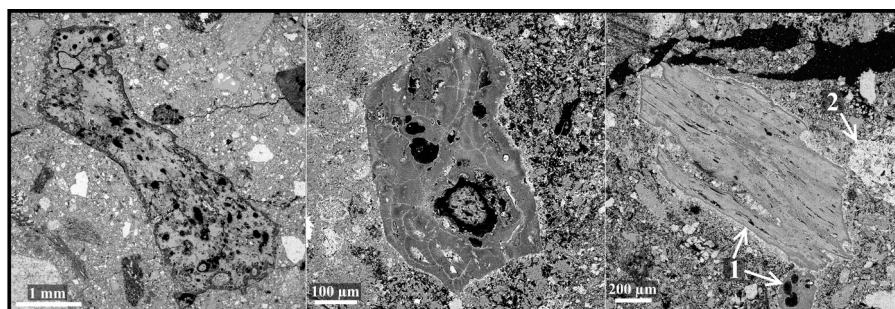


Рисунок 8 - Витрокласты угловатой и аэродинамической формы с четкими очертаниями в зювитах Сопчаюсского типа:
1 – импактные стекла; 2 – фрагменты пород мишени
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.8>

Примечание: СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

Витрокласты обладают, преимущественно, четкими, резко очерченными границами (рис. 8) и неровными, волнистыми, как бы «изъеденными» очертаниями. Единично в зювитах отмечаются импактные стекла специфической формы с неправильными буроватыми обособлениями, имеющие размеры до 900 мкм и четкие границы. Иногда продукты застывания импактного расплава содержат протяженные (до 20 мкм) отчетливые тонкие (~ 10 мкм) темно-коричневые зоны, располагающиеся по направлению течения расплава.

Импактные стекла на микроуровне неоднородны из-за присутствия раскристаллизованных зон, разнообразных пор и включений. Это определяет флюидальные, пористые и пемзовидные, массивные, реже пятнистые и глобулярные текстуры таких фрагментов (рис. 8). Содержание порового пространства в стеклах в некоторых случаях достигает 60–70%. Форма пор изометричная округлая или слегка удлиненная, реже линзовидная с неровными краями или неправильная. Размеры пор достигают ~ 80 мкм в поперечнике. Стенки крупных пор иногда опоясаны маломощной темно-серой до черного цвета каймой, которая в скрещенных николях характеризуется двумя зонами – внешней изотропной и внутренней областью светло-желтоватого цвета. В редких случаях в порах витрокластов наблюдаются мелкие игольчатые кристаллы вторичных цеолитов.

Слабоизмененные витрокласты относительно прозрачны, характеризуются светловато-желтоватым или коричневато-буроватым цветом, что, судя по всему, обусловлено повышенным содержанием железа. Сильно измененные стекла имеют преимущественно светло-голубовато-серый цвет, их внутренняя структура плохо диагностируется вследствие помутнения. Иногда витрокласты обладают зональным строением, в них отмечается прикраевая раскристаллизованная светло-желтовато-серая зона, постепенно переходящая в сероватую центральную часть. Раскристаллизованные импактные стекла выполнены тонкими кристаллами ортоклаза, образующими сноповидные агрегаты.

Витрокласты зювитов Сопчаюсского типа содержат от 10 до 25 % включений обломков пород и минералов. Последние имеют размеры в среднем порядка 10–20 мкм, изредка до 200 мкм. Среди включений в стеклах отмечаются зерна пирохлора, кристаллы пирита и пирротина с ореолами гидрооксидов железа рыжевато-бурого цвета, частицы углеродистого вещества. Изредка витрокласты содержат крупные (до 200 мкм) фрагменты матрикса округлой, овальной и слабоокруглой формы. Включения в стеклах с флюидальной текстурой, как правило, ориентированы согласно направлению флюидальности.

Матрикс зювитов Сопчаюсского типа занимает около 50 % объема пород, оптически отличается коричневато-серым и темно-серым цветом. В ходе петрографического и микрозондового изучения выявлено, что матрикс характеризуется неравномерным распределением мелких хорошо обособленных и частично спекшихся минеральных компонентов [26]. Отличительной чертой матрикса зювитов этого типа является существенная пористость и кавернозность, за счет чего матрица пород имеет рыхлый облик [25] (рис. 9). По данным оптической микроскопии содержание пор в матриксе составляет около 15–20 % от его общего объема. Пустотное пространство выполнено протяженными (до 50–70 мкм) порами неправильной формы преимущественно открытого типа. В полостях зювита зачастую бурно развиты вторичные кристаллы цеолитов и пирита.

Содержание минеральных кластов в матриксе достигает 40–50 %. Среди последних преобладают класты кварца, кальцита, полевого шпата (преимущественно ортоклаза), в меньшей степени встречаются включения углеродистого вещества, мусковита, хлорита, реже серицита [25]. Повсеместно отмечаются тончайшие кристаллы пироксенового состава (главным образом диопсидового), тяготеющих к обрамлению пустот породы и контурам некоторых лито- и кристаллокластов. Обломки минералов, в основном, характеризуются угловатой формой и четкими очертаниями. Кристаллокласты имеют припекшиеся и спекшиеся характеры контактов (рис. 9). Припекание выражается ясно различимыми тонкими смычками между соседними кластами. Спекшиеся класты характеризуются большей площадью контактных перешейков, очертания отдельных компонентов в них практически не различимы.

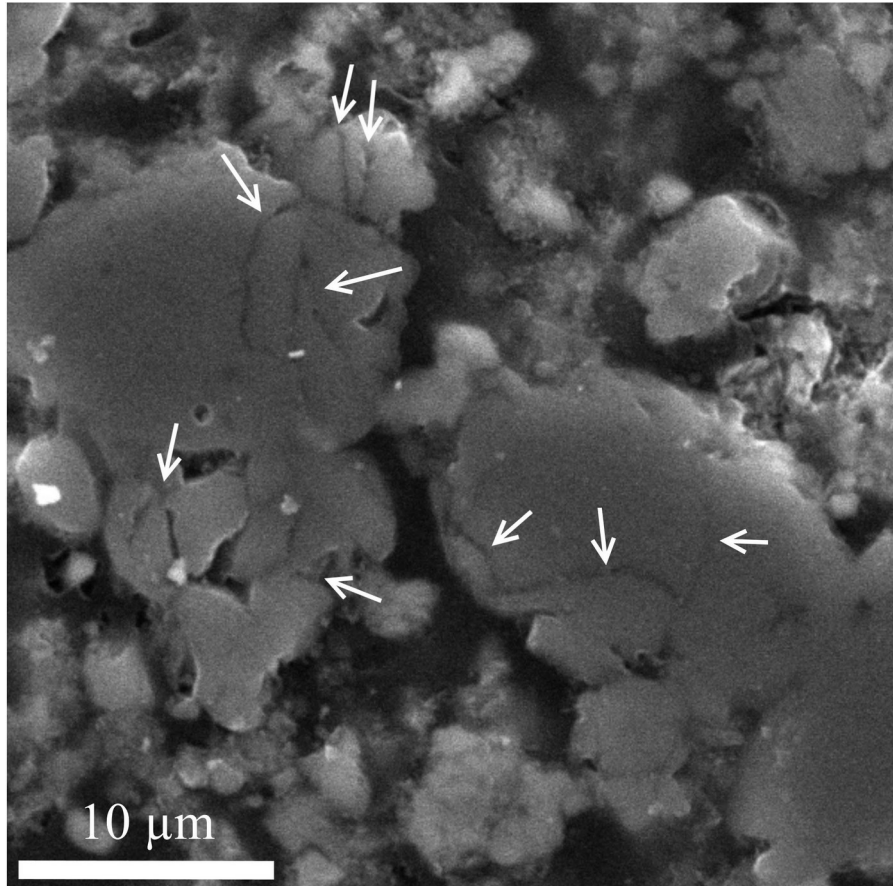


Рисунок 9 - Электронно-микроскопическое изображение матрикса зювитов Сопчаюсского типа
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.9>

Примечание: изображение в режиме обратно-рассеянных электронов; стрелками показаны перемычки между спекшимися минеральными кластами

Обсуждение

Известно, что специфика зювитов и их литологических компонентов позволяет реконструировать процессы, приводящие к образованию как включений в зювитах, так и вмещающих их пород в целом [4], [5, С. 31]. По выявленным нами макроскопическим, структурно-текстурным и петрографическим особенностям зювитов Карской астроблемы с учетом литературных данных по генетическим особенностям импактитов [1], [3], [16], [17] и данных материаловедения в области порошковой металлургии [18], [19] можно выявить соответствующие фациальные условия трех типов зювитов Карской астроблемы.

Тесные и сложные взаимоотношения зювитов Анарогского типа с расплавленными импактными породами, часто взаимопроникающих между собой, свидетельствуют о динамическом взаимодействии и интенсивном перемешивании расплавленного и обломочного материала донных центробежных потоков во время движения [3], [17]. Столбчатая отдельность, наблюдаемая в естественных выходах зювитов, указывает на быстрое остывание, что обычно характерно для тел расплавленных пород [3]. Высокая плотность и большое содержание расплавленной компоненты в зювитах этого типа свидетельствует о принадлежности пород к отложениям донной фации [17]. Присутствие в зювитах Анарогского типа стекол неправильной формы с причудливыми размочаленными, пламенивидными контурами, взаимопроникающими в матрикс, указывает на их горячее состояние и перемещение вместе с кластическим материалом [3]. Кроме того, спекшийся («горячий») характер контакта импактных стекол с матриксом, обилие частиц стекла в матрице (т.н. «пропитка пород стеклом») указывают на то, что компоненты зювитов формировались в относительно высокотемпературных условиях и пластичном состоянии [1], [3], [16].

Зювиты Анарогского типа характеризуются спекшимся матриксом, демонстрирующим заключительную стадию спекания [18], [19]. На это указывает достаточно однородная микроструктура матрицы [19] и низкая преимущественно закрытая пористость с порами округлой формы (рис. 5). Спекшийся характер матрикса, соответствующий заключительной стадии спекания, свидетельствует в пользу высокотемпературных условий формирования зювитов.

Согласно [1], [3], [16] выше указанные признаки позволяют рассматривать зювиты Анарогского типа как отложения фации донных центробежных потоков, представляющие собой отложения нижней части толщи возвращенных зювитов.

Относительно слабая цементация зювитов Тогорейского типа, о которой можно судить по их хрупкости, глубоким промоинам и мощной осыпи обнажений, не характерна для пород донной фации [17]. Аэродинамическая и кластогенная форма витрокластов зювитов этого типа свидетельствуют, что импактный расплав застывал в условиях воздушной транспортировки и подвергался дроблению, то есть при осаждении из газопылевого облака был уже в твердом виде [3], [4], [5]. На последнее также указывает то, что фрагменты импактных стекол имеют преимущественно четкие очертания, также свидетельствующие о попадании в зювит уже существенно охлажденными, в застывшем или полупластичном состоянии [1], [16].

Матрикс зювитов Тогорейского типа имеет преимущественно спекшийся характер, соответствующий промежуточной стадии спекания [18], [19]. На это указывают относительно высокая пористость (до 10 об.%), неправильная форма и открытый характер пор, присутствие в матриксе агрегатов спекшихся минеральных частиц, в которых наблюдаются лишь реликтовые очертания отдельных частиц, имеющих смывки на контактах друг с другом (рис. 7). Спекшийся характер матрикса, соответствующий промежуточной стадии спекания, и отсутствие в нем расплавных частиц может указывать на относительно высокотемпературные условия формирования зювитов, однако недостаточные для полного плавления вмещающей массы.

Все вышесказанное позволяет заключить, что зювиты Тогорейского типа были сформированы при выбросе, оседании и захоронении материала из взрывного облака и соотносятся с фацией аэродинамических выбросов [1], [16].

Относительно слабая цементация зювитов Сопчаюсского типа (вплоть до сыпучего состояния), а также преобладание в породах массивных и пористых стекол является характерной особенностью отложений взрывного облака [17]. Резко закаленные границы витрокластов указывают на то, что расплавные компоненты зювитов, в целом, формировались в условиях относительно быстрого отвердевания [3]. Кластогенная и аэродинамическая форма фрагментов импактных стекол указывает на их формирование в условиях воздушного переноса и дробления [3], [4], [5].

Матрикс зювитов Сопчаюсского типа спекшийся, по характеру литификации соответствует промежуточной и начальной стадии спекания [18], [19]. На это указывает наличие признаков припекания (тонких перемычек минеральных частиц с отчетливо обособленными исходными угловатыми контурами) и высокая пористость матрикса в целом (до 20 об.%) с крупными неправильными по форме порами открытого типа (рис. 9).

На основании выявленных признаков можно считать зювиты Сопчаюсского типа «холодными» породами, сформированными в условиях аэродинамической фации импактитогенеза [1], [3]. Кроме того, большое количество пористых и шлаковых («вскипевших») стекол в зювитах Сопчаюсского типа свидетельствует об образовании витрокластической компоненты в благоприятных обстановках газоотделения, что соответствует условиям формирования верхних горизонтов коптогенного комплекса [3], [16].

Как известно, отложения донной фации в астроблемах объединяют породы нижней части коптогенного комплекса, прилегающей ко дну кратера [3, С. 70]. Отложения фации аэродинамических выбросов покровно перекрывают породы донной фации и венчают разрез импактитов [17, С. 10–11]. С учетом этого, на основе полученных результатов предлагается схема фациального разреза коптогенного комплекса Карской структуры (рис. 10).

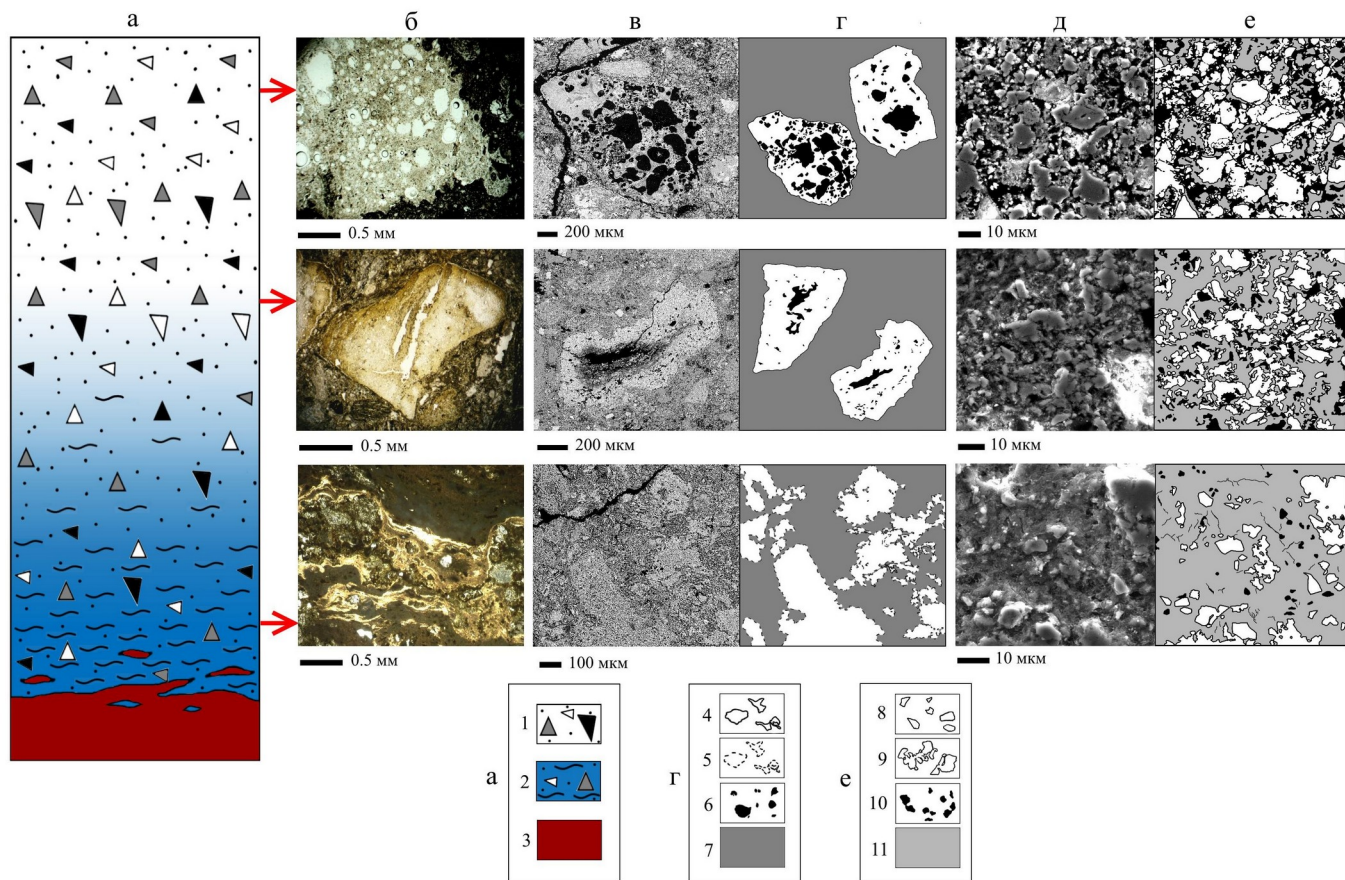


Рисунок 10 - Принципиальная схема расположения фаций импактитов в разрезе колтогенного комплекса Карской астроблемы (вне масштаба) (а) и характерные особенности витрокластов (б-г) и матрикса (д, е) фаций зювитов:

б – оптические изображения полированных шлифов (без анализатора); в, д – электронно-микроскопические изображения (в – в режиме упруго-отраженных электронов, д – в режиме обратно-рассеянных электронов); г, е – схематические изображения; 1 – зювиты аэродинамической фации; 2 – зювиты фации донных потоков; 3 – расплавные импактиты донной фации; 4, 5 – импактные стекла (4 – с четкими закаленными границами, 5 – с нечеткими спекшимися очертаниями); 6 – поры; 7 – матрикс; 8 – минеральные класты; 9 – спекшиеся минеральные агрегаты; 10 – поры; 11 – тонкодисперсная вмещающая масса

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.69.10>

На приведенной схеме видно, что зювиты залегают на породах донной фации, при этом контакт между зювитами и расплавленными породами может быть как резкий и четкий, так и со взаимными постепенными переходами и линзовидными включениями одних пород в других. Толща зювитов включает отложения верхней части фации донных потоков и фации аэродинамических выбросов, которые между собой не имеют резких границ. Снизу вверх по разрезу зювиты фации донных потоков постепенно сменяются зювитами аэродинамической фации. Соответственно, снизу вверх по разрезу в зювитах уменьшается содержание импактных стекол, увеличивается пористость стекол и пористость матрикса, уменьшается степень спекания матрикса. Морфология витрокластов изменяется от неправильной на преимущественно аэродинамическую и ксеноморфную, очертания импактных стекол становятся преимущественно ровными и четкими, резко закаленными.

Комплекс основных критериев фацеального деления зювитов

На основе полученных нами результатов по изучению импактитов Карской астроблемы и анализа импактитов в целом по опубликованным данным определен комплекс основных критериев фацеального расчленения зювитов на фацию донных центробежных потоков и фацию аэродинамических выбросов.

Зювиты фации донных центробежных потоков характеризуются следующими признаками:

1. Тесные взаимоотношения с импактными расплавленными породами, сложные переходы одних пород в другие [3], [17].
 2. Высокая плотность и низкая пористость (отсутствие пористости) пород на макроуровне [17].
 3. Высокое содержание импактных стекол [17].
 4. Спекшийся характер контактов фрагментов импактных стекол с матриксом [1], [3], [16].
 5. Преобладание среди стекол фрагментов неправильной формы со следами динамического взаимодействия с матриксом – неровными, извилистыми, пламеневидными очертаниями, свидетельствующими о застывании импактного расплава в движении [3].
 6. Низкое содержание пористых стекол, отсутствие витрокластов с пемзовидной и шлаковой текстурой [16], [17].
 7. Высокая степень спекания матрикса [3], соответствующая заключительной стадии спекания [18], [19].
- Отсутствие четких обособленных границ минеральных частиц в матриксе, слабая пористость, некрупные размеры, изолированный тип и правильная округлая форма пор.

Зювиты аэродинамической фации характеризуются следующими признаками:

1. Хрупкость и пористость пород на макроуровне [17].
 2. Низкое содержание витрокластической компоненты [17].
 3. Преимущественно резко закаленные контакты импактных стекол с матриксом [1], [16].
 4. Преобладание среди стекол фрагментов угловатой и аэродинамической формы [3], [4], [5].
 5. Большая доля пористых импактных стекол (вплоть до пемзовидных и шлаковидных разновидностей) [16], [17].
 6. Низкая степень спекания матрикса [3], соответствующая начальной и промежуточной стадиям спекания [18], [19].
- Припекание соседних минеральных частиц в матриксе – наличие смычек между ними и сохранение первичных обособленных очертаний частиц, высокое содержание порового пространства, достаточно крупные размеры, преимущественно открытый тип и неправильная форма пор.

В то же время, некоторые фацеальные особенности зювитов, описанные предшественниками, в изученных зювитах Карской астроблемы нами не были обнаружены. Так, «струйчатая» и «линзовидно-полосчатая» текстура матрикса, описываемая для донных зювитов астроблемы Янисъярви [21, С. 110], при изучении зювитов Карской астроблемы не была выявлена. В то же время, данный признак проявляется в донных отложениях Усть-Карской импактной структуры, богатых обломочной компонентой [27]. В связи с этим, данная особенность, свидетельствующая о перемещении материала по дну кратера [21, С. 110], скорее всего, является отличительным признаком импактных пород донной фации, однако это требует более детального изучения и выходит за рамки данной работы, представляя собой задачу будущих исследований.

Заключение

Таким образом, проведено комплексное исследование, выявлены макроскопические, структурно-текстурные и петрографические особенности трех типов зювитов Карской астроблемы. Установлено, что три типа зювитов отличаются мощностью и протяженностью обнажений, крутизной склонов естественных выходов, наличием контактов с расплавленными импактными породами и породами мишени, на микроуровне характеризуются отличием содержания составных компонентов, структурно-текстурных и морфологических особенностей витрокластов, имеют отличия в характере литификации матрицы.

По выясненным признакам, с учетом накопленных данных о генетических особенностях импактитов, среди трех типов зювитов Карской астроблемы было выделено две фации зювитов – отложения фации донных центробежных потоков и отложения аэродинамической фации. Установлено, что зювиты Анарогского типа представляют собой породы фации донных потоков, тесно связанные с донными расплавленными породами. Зювиты Тогорейского и Сопчаюсского типа являются отложениями аэродинамической фации, сформированными при оседании взрывного облака.

Предложена принципиальная схема расположения импактных фаций в разрезе коптогенного комплекса Карской астроблемы. Зювиты фации донных потоков располагаются в верхней части донных отложений, перекрывают отложения расплавленных импактитов донной фации, с которыми имеют как резкие границы, так и сложные взаимные переходы. Зювиты аэродинамической фации приурочены к верхней части разреза коптогенного комплекса, залегающие с постепенным переходом от пород фации донных потоков.

На основе полученных результатов определен комплекс основных критериев фациального расчленения зювитов. Фация аэродинамических выбросов имеет признаки: высокая хрупкость и пористость пород, относительно низкое содержание закаленных импактных стекол аэродинамической и кластогенной формы; спекшийся матрикс, соответствующий начальной и промежуточной стадиям спекания. Зювиты фации донных потоков характеризуются признаками: высокой прочностью, тесными взаимоотношениями с расплавленными породами, высоким содержанием спекшихся с матрицей стекол неправильной формы и спекшимся матриксом, соответствующим заключительной стадии спекания

Предложенный комплекс критериев фациального разделения зювитов может быть использован при исследовании зювитов других астроблем, что имеет значение для прогнозирования и поиска полезных ископаемых в других астроблемах в целом.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90011

Благодарности

Авторы выражают большую благодарность А.А. Зубову за проведение фотосъемки обнажений зювитов с использованием квадрокоптера и Е.М. Тропникову за аналитические работы с применением сканирующей электронной микроскопии и микрозондового анализа.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The reported study was funded by RFBR, project number 20-35-90011

Acknowledgement

The authors express their gratitude to A.A. Zubov for photographing the suevites outcrops using a quadcopter and to E.M. Tropnikov for analytical work using scanning electron microscopy and microprobe analysis.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Фельдман В.И. Импактитогенез / В.И. Фельдман – М.: КДУ, 2018. – 151 с.
2. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Ред. В. И. Гинцбург. - СПб. : ВСЕГЕИ, 2009. - 200 с.
3. Фельдман В.И. Петрология импактитов / В.И. Фельдман – М.: МГУ, 1990. – 299 с.
4. Электронный справочник-определитель импактитов и брекчиевых образований астроблем России на примере Попигаиской, Карской и Усть-Карской астроблем [Электронный ресурс] // Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ. – 2022. – URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=cbae64d392441749538cdc73124ccef#2c102a469d1894646> . (дата обращения: 09.06.22)
5. Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов / Науч. ред. В. Л. Масайтис. - Л. : Недра, 1983. - 159 с.
6. Шумилова Т.Г. «Звездные раны» — уникальные геологические объекты Арктики. / Т.Г. Шумилова, А.А. Зубов, Н.И. Максименко // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2022) : материалы российской конференции с международным участием; – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2022. – с. 210-211.
7. Селивановская Т.В. Импактные брекчии и импактиты Карской и Усть-Карской астроблем. / Т.В. Селивановская, М.С. Мащак, В.Л. Масайтис // Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя; – Л.: Наука, 1990. – с. 55-96.
8. Максименко Н.И. Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) / Н.И. Максименко, Т.Г. Шумилова, Н.С. Ковальчук // Петрология. – 2020. – Т. 28. - № 6. – с. 628-649. – DOI: 10.31857/S0869590320050039
9. Шумилова Т.Г. Разновидности импактитов, апоуольных алмазов и сопутствующих углеродных фаз Карской астроблемы. / Т.Г. Шумилова, С.И. Исаенко, Н.С. Ковальчук и др. // 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.
10. Шумилова Т.Г. Геохимическая специфика алмазоносных зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой). / Т.Г. Шумилова, Н.С. Ковальчук, Б.А. Макеев // Доклады академии наук. – 2019. – № 486 (2). – с. 233-236. – DOI: 10.31857/S0869-56524862233-236
11. Shumilova T. Varieties of Impactites and Impact Diamonds of the Kara Meteorite Crater (Pay-Khoy, Russia). / T. Shumilova, N Maksimenko, A Zubov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 362. – p. 012043. – DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012043
12. Zubov A.A. X-ray computed microtomography of diamondiferous impact suevitic breccia and clast-poor melt rock from the Kara astrobleme (Pay-Khoy, Russia). / A.A. Zubov, T.G. Shumilova, A.V. Zhuravlev et al. // American Mineralogist. – 2021. – № 106. – p. 1860-1870. – DOI: 10.2138/am-2021-7578
13. Сазонова Л. В. Карский метеоритный кратер / Л.В. Сазонова, Н.Н. Каратаева, Г.Я. Пономарев и др. // Импактиты. - Москва: Изд-во МГУ, 1981. - С. 93-135.
14. Maksimenko N. Petrographic and petrochemical characteristics of suevite matrix, western part of the Kara Astrobleme (Russia). / N. Maksimenko, T. Shumilova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 906. – p. 012088. – DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012088

15. Геологический словарь / Гл. ред. О. В. Петров. - СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. - Т.1, А-Й. - 432 с.
16. Базилевский А.Т. Ударные кратеры на Луне и планетах / А.Т. Базилевский, Б.А. Иванов, К.П. Флоренский и др. - М.: Наука, 1983. - 200 с.
17. Вишневский С.А. Зювиты Попигайской астроблемы: некоторые парадоксы и мнимо-вторичные взаимоотношения / С.А. Вишневский – Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1992. – 53 с.
18. Гиршов В.Л. Современные технологии в порошковой металлургии / В.Л. Гиршов, С.А. Котов, В.Н. Цеменко – СПб: Политехн. Ун-т, 2010. – 385 с.
19. Михайлов М.Д. Современные проблемы материаловедения. Нанокompозитные материалы : учебное пособие / М.Д. Михайлов – СПб: Политехн. ун-та, 2010. – 385 с.
20. Фельдман В.И. Импактиты / В.И. Фельдман, Л.Б. Грановский, Л.В. Сазонова и др. – М.: МГУ, 1981. – 240 с.
21. Сазонова Л.В. Петрография импактитов астроблемы Янисъярви дис. ...канд. null: 04.00.08 : защищена 1984-08-28 : утв. 1984-04-09 / Л.В. Сазонова – М.: 1984. – 271 с.
22. Вишневский С.А. Зювитовые мегабрекчии - новый тип отложений взрывного облака в Попигайской астроблемы / С.А. Вишневский – Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1994. – 66 с.
23. Максименко Н.И. Геологическая позиция и геоморфологические особенности разновидностей зювитов Карской астроблемы . / Н.И. Максименко // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента : материалы 28-й научной конференции; – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2019. – с. 91-95.
24. Максименко Н.И. Сравнительный анализ структурно-вещественных особенностей разновидностей зювитов Карской астроблемы . / Н.И. Максименко // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента : материалы 27-й научной конференции; – Сыктывкар: Геопринт, 2018. – с. 121-124.
25. Максименко Н.И. Структурно-текстурные особенности и фазовый состав матрикса разновидностей зювитов Карской астроблемы . / Н.И. Максименко, С.И. Исаенко // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII Геологического съезда Республики Коми; – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2019. – с. 206-207.
26. Максименко Н.И. Структурно-вещественные особенности матрикса разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой). / Н.И. Максименко // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы X Всероссийской молодежной научной конференции; – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2019. – с. 150-151.
27. Shumilova T. UHPHT glasses in bottom suevite facies (Ust'-Kara, Arctic Ocean, Russia). / T. Shumilova, S. Isaenko, N. Maximenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 609. – p. 012052. – DOI: 10.1088/1755-1315/609/1/012052

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fel'dman V.I. Impaktitogenez [Impactogenesis] / V.I. Fel'dman – М.: KDU, 2018. – 151 p. [in Russian]
2. Petrograficheskij kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya [Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations] / Ed. by V. I. Gincburg. - SPb. : VSEGEI, 2009. - 200 p. [in Russian]
3. Fel'dman V.I. Petrologiya impaktitov [Petrology of impactites] / V.I. Fel'dman – М.: MGU, 1990. – 299 p. [in Russian]
4. E'lektronny'j spravochnik-opredelitel' impaktitov i brekchiev'x obrazovaniy astroblem Rossii na primere Popigajskoj, Karskoj i Ust'-Karskoj astroblem [Electronic guide-determinant of impactites and breccia formations of Russian astroblems on the example of Popigai, Kara and Ust'-Kara astroblemes] [Electronic source] // Sankt-Peterburg : VSEGEI. – 2022. – URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=ccbae64d392441749538cdc73124ccef#2c102a469d1894646> . (accessed: 09.06.22) [in Russian]
5. Struktury i tekstury vzryvnyh brekchij i impaktitov [Structures and textures of explosive breccias and impactites] / Scient. ed. V. L. Masajtis. - L. : Nedra, 1983. - 159 p. [in Russian]
6. Shumilova T.G. «Zvezdny'e rany» — unikal'ny'e geologicheskie ob'ekty' Arktiki ["Star wounds" - unique geological objects of the Arctic]. / T.G. Shumilova, A.A. Zubov, N.I. Maksimenko // Modern Problems of Theoretical, Experimental, and Applied Mineralogy (Yushkin Readings - 2022) : Proceedings of the Russian Conference with International Participation; – Sy'kty'vkar: IG Komi NCz Uro RAN, 2022. – p. 210-211. [in Russian]
7. Selivanovskaya T.V. Impaktny'e brekchii i impaktity' Karskoj i Ust'-Karskoj astroblem [Impact breccias and impactites of the Kara and Ust-Kara astroblemes]. / T.V. Selivanovskaya, M.S. Mashhak, V.L. Masajtis // Impact craters of the Mesozoic-Cenozoic boundary; – L.: Nauka, 1990. – p. 55-96. [in Russian]
8. Maksimenko N.I. Petrologicheskaya kharakteristika raznovidnostei zyuvitov Karskoj astroblemi (Pai-Khoi, Rossiya) [Petrological Characteristics of Suevite Varieties in the Kara Astrobleme, Pay-Khoy, Russia] / N.I. Maksimenko, T.G. Shumilova, N.S. Kovalchuk // Petrologiya [Petrology]. – 2020. – Vol. 28. - № 6. – p. 628-649. – DOI: 10.31857/S0869590320050039 [in Russian]
9. Shumilova T.G. Raznovidnosti impaktitov, apougol'ny'xalmazov i soputstvuyushhix uglerodny'x faz Karskoj astroblemy' [Varieties of impactites, apocold diamonds, and associated carbon phases of the Kara astrobleme]. / T.G. Shumilova, S.I. Isaenko, N.S. Koval'chuk et al. // Modern Problems of Theoretical, Experimental and Applied Mineralogy (Yushkin Readings - 2016) : Proceedings of the Mineralogical Seminar with International Participation; – Sy'kty'vkar: IG Komi NCz Uro RAN, 2016. – p. 270-271. [in Russian]
10. Shumilova T.G. Geoximicheskaya specifika amazonosny'x zyuvitov Karskoj astroblemy' (Paj-Xoj) [Geochemical specificity of diamond-bearing suevites of the Kara astrobleme (Pay-Khoy)]. / T.G. Shumilova, N.S. Koval'chuk, B.A. Makeev // Doklady' akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]. – 2019. – № 486 (2). – p. 233-236. – DOI: 10.31857/S0869-56524862233-236 [in Russian]

11. Shumilova T. Varieties of Impactites and Impact Diamonds of the Kara Meteorite Crater (Pay-Khoy, Russia). / T. Shumilova, N Maximenko, A Zubov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 362. – p. 012043. – DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012043
12. Zubov A.A. X-ray computed microtomography of diamondiferous impact suevitic breccia and clast-poor melt rock from the Kara astrobleme (Pay-Khoy, Russia). / A.A. Zubov, T.G. Shumilova, A.V. Zhuravlev et al. // American Mineralogist. – 2021. – № 106. – p. 1860-1870. – DOI: 10.2138/am-2021-7578
13. Sazonova L.V. Karskij meteoritnyj krater [Kara meteorite crater] / L.V. Sazonova, N.N. Karataeva, G.Ja. Ponomarev et.al. // Impaktity [Impactites]. - Moscow : MSU Publishing house, 1981. - P. 93-135. [in Russian]
14. Maksimenko N. Petrographic and petrochemical characteristics of suevite matrix, western part of the Kara Astrobleme (Russia). / N. Maksimenko, T. Shumilova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 906. – p. 012088. – DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012088
15. Geologicheskij slovar' [Geological dictionary] / Ed. by O.V. Petrov. - SPb. : VSEGEI Publishing house, 2010. - Vol. 1 - 432 p. [in Russian]
16. Bazilevskij A.T. Udarny'e krater' na Lune i planetax [Impact craters on the Moon and planets] / A.T. Bazilevskij, B.A. Ivanov, K.P. Florenskij et al. – M.: Nauka, 1983. – 200 p. [in Russian]
17. Vishnevskij S.A. Zyuvity' Popigajskoj astroblemy': nekotory'e paradoksy' i mnimo-vtorichny'e vzaimootnosheniya [Suevites of the Popigai astrobleme: some paradoxes and pseudo-secondary relationships] / S.A. Vishnevskij – Novosibirsk: SO RAN NICZ OIGGM, 1992. – 53 p. [in Russian]
18. Girshov V.L. Sovremennyye tekhnologii v poroshkovej metallurgii [Modern technologies in powder metallurgy] / V.L. Girshov, S.A. Kotov, V.N. Cemenko – SPb: Politehn. Un-t, 2010. – 385 p. [in Russian]
19. Mixajlov M.D. Sovremennyye problemy' materialovedeniya. Nanokompozitny'e materialy' : uchebnoe posobie [Modern problems of materials science. Nanocomposite Materials: Tutorial] / M.D. Mixajlov – SPb: Politehn. un-ta, 2010. – 385 p. [in Russian]
20. Fel'dman V.I. Impaktity' [Impactites] / V.I. Fel'dman, L.B. Granovskij, L.V. Sazonova et al. – M.: MGU, 1981. – 240 p. [in Russian]
21. Sazonova L.V. Petrografiya impaktitov astroblemy' Yanis"yarvi [Petrography of impactites of the Janisjärvi astrobleme] dis....of PhD in Natural sciences: 04.00.08 : defense of the thesis 1984-08-28 : approved 1984-04-09 / Л.В. Сазонова – М.: 1984. – 271 p. [in Russian]
22. Vishnevskij S.A. Zyuvitovy'e megabrekchii - novyj tip otlozhenij vzry'vnogo oblaka v Popigajskoj astroblemy' [Suevite megabreccias - a new type of explosive cloud deposits in the Popigai astrobleme] / S.A. Vishnevskij – Novosibirsk: SO RAN NICZ OIGGM, 1994. – 66 p. [in Russian]
23. Maksimenko N.I. Geologicheskaya poziciya i geomorfologicheskie osobennosti raznovidnostej zyuvitov Karskoj astroblemy' [Geological position and geomorphological features of varieties of suevites of the Kara astrobleme]. / N.I. Maksimenko // Structure, Substance, History of the Lithosphere of the Timan-North Ural Segment : Proceedings of the 28th Scientific Conference; – Sy'kty'vkar: IG Komi NCz UrO RAN, 2019. – p. 91-95. [in Russian]
24. Maksimenko N.I. Sravnitel'nyj analiz strukturno-veshhestvenny'x osobennostej raznovidnostej zyuvitov Karskoj astroblemy' [Comparative analysis of the structural and material features of varieties of suevites of the Kara astrobleme]. / N.I. Maksimenko // Structure, Substance, History of the Lithosphere of the Timan-North Ural Segment : Proceedings of the 27th Scientific Conference; – Sy'kty'vkar: Geoprint, 2018. – p. 121-124. [in Russian]
25. Maksimenko N.I. Strukturno-teksturnyye osobennosti i fazovyj sostav matriksa raznovidnostej zyuvitov Karskoj astroblemy' [Structural and textural features and phase composition of the matrix of varieties of suevites of the Kara astrobleme]. / N.I. Maksimenko, S.I. Isaenko // Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia: Proceedings of the XVII Geological Congress of the Komi Republic; – Sy'kty'vkar: IG Komi NCz UrO RAN, 2019. – p. 206-207. [in Russian]
26. Maksimenko N.I. Strukturno-veshchestvennye osobennosti matriksa raznovidnostej zyuvitov Karskoj astroblemi (Pay-Khoy) [Structural and material features of the matrix of varieties of suevites of the Kara astrobleme (Pay-Khoy)]. / N.I. Maksimenko // Minerals: Structure, Properties, Research Methods: Proceedings of the X All-Russian Youth Scientific Conference; – Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019, 2019. – p. 150-151. [in Russian]
27. Shumilova T. UHPHT glasses in bottom suevite facies (Ust`-Kara, Arctic Ocean, Russia). / T. Shumilova, S. Isaenko, N. Maximenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 609. – p. 012052. – DOI: 10.1088/1755-1315/609/1/012052