



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552.12 + 552.16

DOI: 10.19110/geov.2024.7.2

Характер матрикса — индикатор температурных условий формирования зювитов (на примере обломочных импактитов Карского метеоритного кратера)

Н. И. Максименко, Т. Г. Шумилова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
nadiamaximenko@mail.ru

В работе предлагается новый подход к изучению особенностей формирования зювитов — определение температурных условий становления обломочных импактитов на основе анализа локального характера спекания компонентов матрикса с применением методов материаловедения. Изучены структурно-текстурные особенности и вещественный состав матрикса зювитов донной и аэродинамической фации Карской астроблемы. Петрохимический состав матрикса обломочных импактитов отражает состав пород мишени, может быть осложнен наложенными процессами в связи с постимпактным преобразованием зювитов. Класты кварца и альбита в матриксе имеют признаки разных стадий спекания, указывающие на сильное различие локальных температурных обстановок, что объясняется термически гетерогенным характером становления зювитов. В связи с этим, определение конкретной температуры становления породы в целом не может быть корректным. При литификации зювитов аэродинамической фации температура локально достигала ~1200 °С. Зювиты донной фации являются относительно более высокотемпературными, максимальная температура при их становлении локально составляла около 1700 °С. Характер спекания матрикса зювитов является индикатором условий формирования и может быть использован для диагностики фаций обломочных импактитов и выяснения параметров и сценария ударных событий.

Ключевые слова: зювиты, матрикс, импактитогенез, импактные фации, Карская астроблема

Matrix nature is an indicator of temperature conditions of suevite formation (on the example of clastic impactites of the Kara meteorite crater)

N. I. Maksimenko, T. G. Shumilova

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The paper proposes a new approach for the study of suevites formation features — the analysis of temperature conditions of clastic impactites formation based on the analysis of local matrix sintering using materials science methods. Structural and textural features and substance composition of the suevite matrix of the bottom and ejecta facies of the Kara astrobleme are studied. The petrochemical composition of the clastic impactite matrix reflects the composition of the target rocks, it can be complicated with the suevites post-impact altering. Quartz and albite clusters in the matrix have signs of different sintering stages, indicating a strong variety in local temperature conditions of the suevites formation. In this regard, it makes no sense to conclude about a certain temperature of rock formation as a whole. During lithification the suevites of aerodynamic facies the local temperature could reach 1200 °C. The bottom facies had relatively higher temperature formation where the maximum temperatures locally reached 1700 °C. The sintering nature of the suevite matrix is an indicator of the specifics of the formation conditions and can be used to diagnose facies of detrital impactites and to clarify the parameters and scenario of impact events.

Keywords: suevite, matrix, impactite genesis, impactite facies, Kara astrobleme

Введение

Ударные кратеры образуются при высокоскоростных столкновениях космических тел и являются широко распространенными геологическими структурами. При ударе давления и температуры достигают огромных (шоковых) значений, поэтому при исследо-

вании космогенных структур и импактных пород важен анализ параметров ударного события. Оценки РТ-условий ударного метаморфизма принято проводить по специальным признакам: макроскопическим (ударные конусы, структуры «грис»), петрографическим (деформационные трещины, планарные деформацион-

Для цитирования: Максименко Н. И., Шумилова Т. Г. Характер матрикса — индикатор температурных условий формирования зювитов (на примере обломочных импактитов Карского метеоритного кратера) // Вестник геонаук. 2024. 7(355). С. 13–23. DOI: 10.19110/geov.2024.7.2

For citation: Maksimenko N. I., Shumilova T. G. Matrix nature is an indicator of temperature conditions of suevite formation (on the example of clastic impactites of the Kara meteorite crater). Vestnik of Geosciences, 2024, 7(355), pp. 13–23, doi: 10.19110/geov.2024.7.2



ные элементы) и минералогическим (высокобарные минеральные фазы — алмаз, коэсит и другие минералы) (French, 1998; Stöffler, Grieve, 2007). Данные признаки успешно применяются в мировой практике изучения импактитов для выяснения параметров образования импактных структур и специфики образования импактных пород.

Зювиты представляют собой полимиктовые импактные брекчии. Основными составными компонентами зювитов являются витрокласты (включения застывшего импактного расплава), литокласты (обломки пород мишени) и матрикс (тонкодисперсная масса). При исследованиях зювитов признаки ударного метаморфизма могут быть применены для характеристики воздействия лишь для отдельных составных компонентов, но не пород в целом. Вместе с тем, обломочные импактиты в некоторых случаях представляют основной объем коптогенного комплекса и являются важным источником информации о параметрах ударного события. Это определяет важность изучения зювитов и необходимость выявления признаков для анализа условий образования этого специфического типа пород.

Для определения таких признаков может быть использован матрикс зювитов. Матрикс представляет собой тонкодисперсный (менее 0.01 см) цементирующий материал зювитов (Геологический словарь, 2011; Селивановская и др., 1990). Ранее исследователями отмечалось, что условия формирования полимиктовых брекчий лучше всего отражаются именно в матриксе (Фельдман, 1990). Вопросы изучения матрикса обломочных импактитов затрагивались в работах Г. Р. Осински (Osinski et al., 2004), К. Майер (Mayer, 2012), Д. Штоффлера (Stöffler et al., 2013). Однако, исследования матрикса зювитов, как правило, проводились в рамках изучения обломочных импактитов в целом и не имеют детальной характеристики. Поэтому на сегодняшний день матрикс зювитов остается наименее изученным компонентом обломочных импактитов.

Известно, что зювиты могут образовываться в различных фациальных обстановках, отличаются механизмами и условиями формирования — импактными фациями. Импактная фация — это «ассоциация импактных пород, возникших при преобразовании материала пород места удара, экскавации импактного кратера, выбросе, отложении и литификации этого материала и характеризующихся особенностями формы залегания, состава вещества, а также структурно-текстурными особенностями» (Геологический словарь, 2010). Зювиты формируются в условиях аэродинамической и донной фацей. Зювиты аэродинамической фацей образуются при отложении и литификации материала взрывного облака, зювиты донной фацей — из центробежных потоков обломочного материала в придонной части кратера. Известно, что зювиты аэродинамической фацей образуются в относительно холодных условиях, в то время как донные отложения — в более горячих (Фельдман, 1990). В литературе упоминается, что донные импактные брекчии могут иметь спекшийся («сваренный») характер компонентов, вплоть до образования спекшихся пород (агглютинатов) (Вишневецкий, 1994; Фельдман, 1990; Электронный справочник, 2024). Однако, до сих пор не было представлено четкого описания спекшихся зювитов и признаков спекания обломочных импактитов. Учитывая

специфику образования обломочных импактитов, такие признаки могут быть выявлены в матриксе обломочных импактитов.

С 2015 года нами проводится систематическое изучение импактитов Карской астроблемы (Шумилова и др., 2016; Shumilova et al., 2020). Среди обломочных импактитов Карского кратера были охарактеризованы отложения донной и аэродинамической фацей (Максименко, Шумилова, 2022). Данная работа посвящена исследованию матрикса зювитов донной и выбросной фацей Карской астроблемы с целью определения признаков для выяснения условий становления зювитов, как породы.

Материалы и методы исследования

Объектом настоящего исследования является матрикс зювитов Карской астроблемы. Обломочные импактиты были отобраны в восточной, южной и западной бортовой частях кратера, в долинах рек Б. Вануйта, Анарога, Кара, Сопчаю и Саяха. Зювиты донной фацей изучены в бассейнах рек Анарога и Кара, зювиты аэродинамической фацей — в бассейнах рек Б. Вануйта, Кара, Сопчаю и Саяха.

Из штучных образцов зювитов были изготовлены большие двусторонне полированные шлифы. С использованием оптического микроскопа Nikon ECLIPSE E400 POL в шлифах были проанализированы петрографические особенности матрикса в проходящем и отраженном свете, производился подбор представительных областей матрицы с целью дальнейшего изучения под электронным микроскопом. Ввиду тонкодисперсного характера матрикса, основные исследования проводились методом сканирующей электронной микроскопии. Изучение проводилось с использованием электронного микроскопа Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments X-Max в шлифах с углеродным напылением. Исследованы структурно-текстурные и вещественные особенности матрикса зювитов. Состав минеральных кластеров матрикса анализировался локально с помощью энергодисперсионной спектроскопии (EDS). Петрохимический состав матрицы изучен с помощью площадного EDS-анализа в разных пространственно удаленных представительных участках матрикса зювитов. В зависимости от представительности выбранных участков анализа проводились по площади от 50 до 300 мкм². Для анализа полученных петрохимических данных были использованы вариационные диаграммы петрогенных компонентов. Для уточнения петрохимического состава производилось поэлементное энергодисперсионное картирование.

Результаты

Минералогические и структурно-текстурные особенности матрикса

При оптических наблюдениях матрикса зювитов в шлифах выявляется его неоднородное строение, брекчиевидная структура и неравномерное распределение по площади. Цвет матрицы варьируется от серого, темно-серого, желтовато-коричневого до бурого и оранжево-коричневого. Неоднородность окраски определяет пятнистый характер основной массы зювита.



Матрикс зювитов *аэродинамической фации* представляет собой преимущественно пористую, частично спекшуюся глинисто-слюдистую массу, содержащую относительно более крупные минеральные класты (рис. 1). В нем встречаются поры открытого и закрытого типа, которые могут быть крупными и протяженными (более 70 мкм), что придает матриксу рыхлую текстуру. Содержание пор в матриксе колеблется от 5 до 15 об. %. Участками матрикс имеет более плотное строение. В таких участках минеральные класты погружены в сплошную низкопористую тонкодисперсную массу, как бы обволакивающую отдельные кристаллокласты (рис. 2, f).

Минеральный состав матрикса представлен кварцем, кальцитом и альбитом, в меньшей степени отмечаются ортоклаз, мусковит, хлорит, серицит, частицы углеродистого вещества, пирит, единично — гранат, эпидот, анатаз, магнетит, титанит, титаномagnetит и рутил. Наиболее широко развиты кварц и кальцит, которые хорошо выявляются по характеру распределения химических элементов (рис. 1, c). Размер кристаллокластов варьируется от 5 до 40 мкм, иногда более 40 мкм. Форма кристаллокластов угловатая или слабо округлая, неправильная. Очертания отдельных минеральных частиц, как правило, четкие, хорошо ограниченные от вмещающей тонкодисперсной ткани и соседних минеральных

частиц (рис. 2). В редких случаях кристаллокласты имеют неотчетливые очертания и неровные границы, иногда они имеют признаки «припекания» — наблюдаются маломощные перешейки на контактах частиц (рис. 2, c, d, f). Реже отдельные кристаллокласты образуют спекшиеся минеральные агрегаты с открытой и закрытой пористостью, с хорошо различимыми очертаниями спекшихся частиц (рис. 2, e, g, h).

Матрикс зювитов *донной фации* характеризуется брекчиевидной структурой, имеет плотное строение и относительно низкое содержание пор (около 5 об. %) (рис. 3). Редкие поры не крупные (до ~10 мкм), неправильной или изометричной округлой формы, часто изолированного типа. Минеральный состав, в целом, аналогичен матриксу зювитов *аэродинамической фации*. Главными минералами здесь являются кварц и полевые шпаты (альбит, реже ортоклаз). Отмечается интенсивное развитие глинистых минералов (сметкита) в межзерновом пространстве и в виде обособлений в матриксе (рис. 3, a, b), что хорошо видно по характеру распределения магния на картах распределения химических элементов (рис. 3, c). Минеральные класты имеют угловатые или округлые очертания (рис. 4). Более крупные обломки кварца могут иметь крупные деформационные трещины или неотчетливые планарные деформационные элементы.

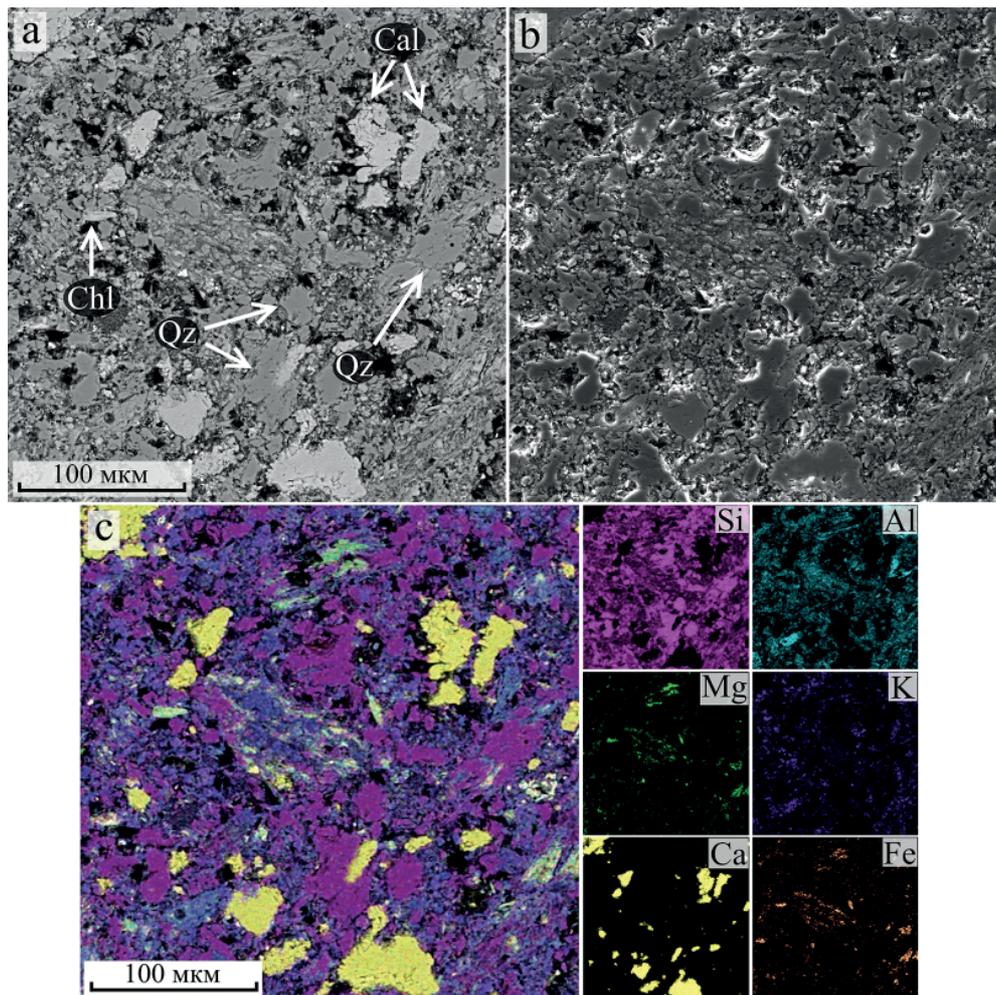


Рис. 1. Структурно-текстурные особенности (СЭМ-изображения: а — BSE, б — SE) и карты распределения химических элементов (с) в матриксе зювитов *аэродинамической фации* (р. Кара). Cal — кальцит, Chl — хлорит, Qz — кварц

Fig. 1. Structural and textural features (electron microscopic images: a — BSE, b — SE) and maps of chemical element distribution (c) in suevite matrix of the ejecta facies (Kara River). Cal — calcite, Chl — chlorite, Qz — quartz

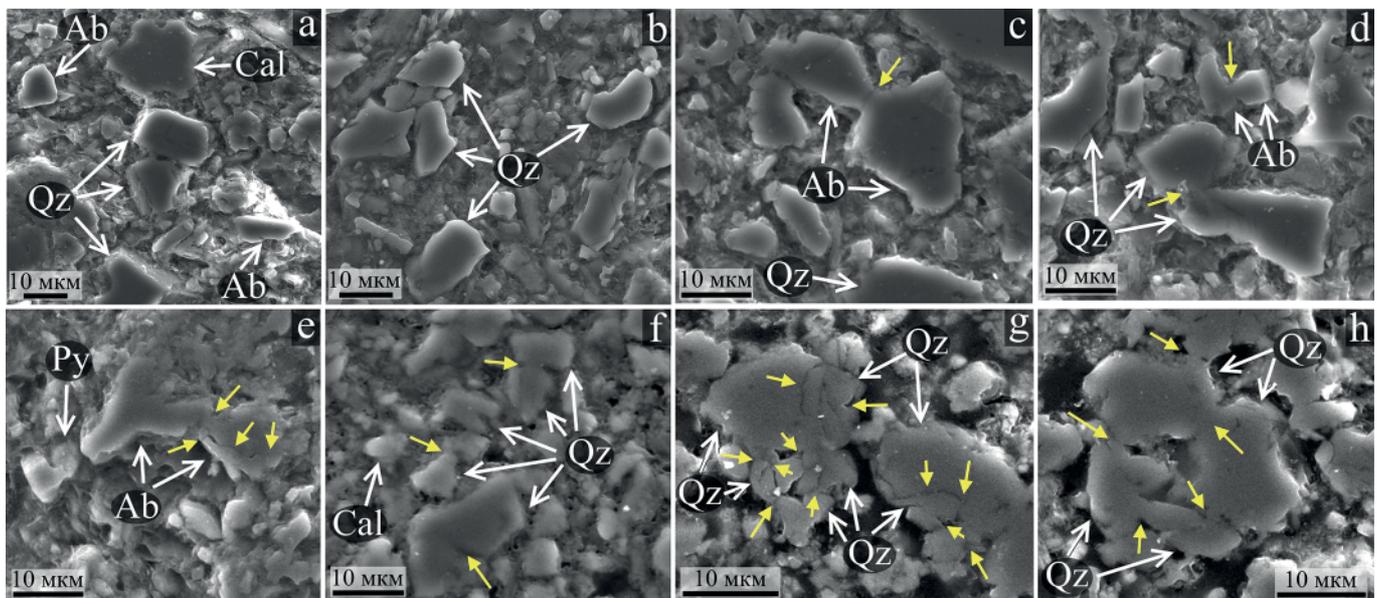


Рис. 2. Кристаллокласты в матрице зювитов аэродинамической фации (СЭМ-изображения, SE). Ab — альбит, Cal — кальцит, Py — пирит, Qz — кварц. а-d — зювиты района р. Саяхи; е — зювиты района р. Б. Вануйта; f — зювиты района р. Кары; g, h — зювиты района р. Сопчаю. Желтыми стрелками показано спекание кристаллокластов

Fig. 2. Crystalloclasts in matrix of the ejecta facies of suevites (electron microscopic images, SE). Ab — albite, Cal — calcite, Py — pyrite, Qz — quartz. a-d — suevites of the Sayakha River area; e — suevites of the B. Vanuyta River area; f — suevites of the Kara River area; g, h — suevites of the Sopchayu River area. Yellow arrows point to sintering of the crystalloclasts

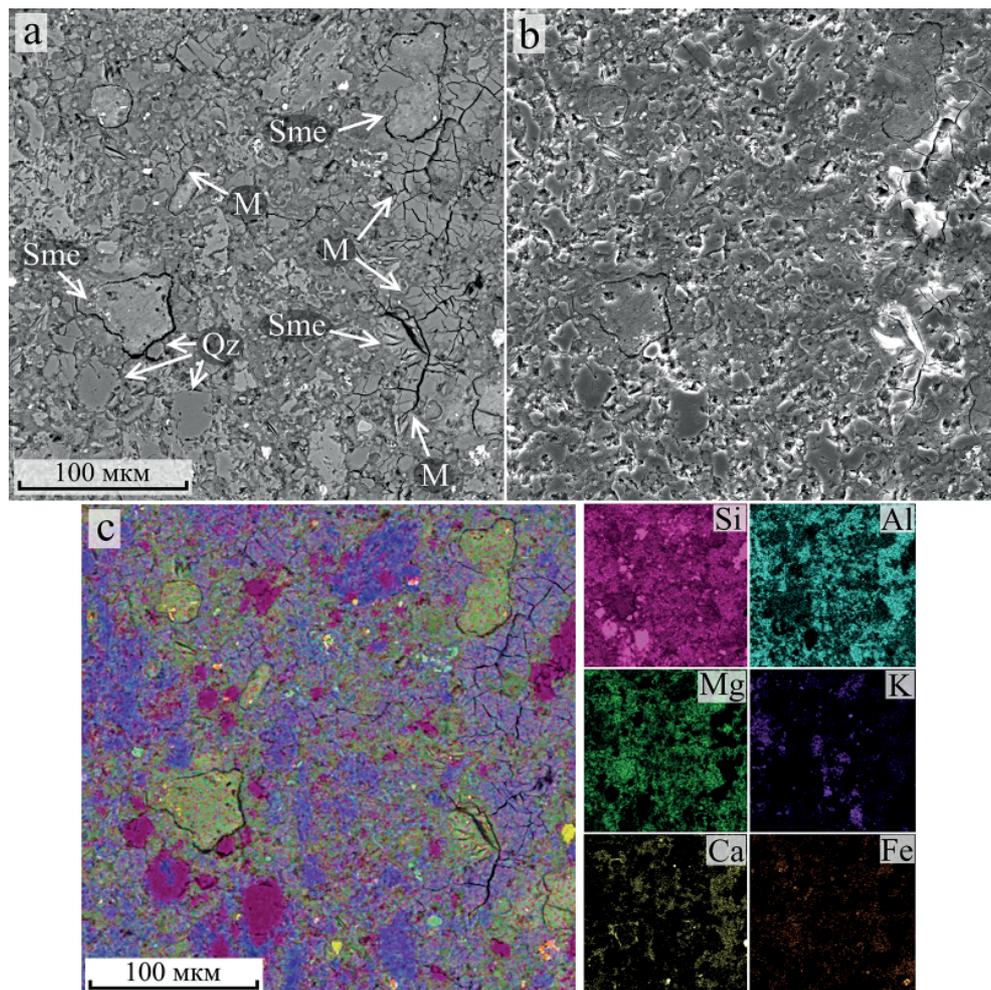


Рис. 3. Структурно-текстурные особенности (СЭМ-изображения: а — BSE, b — SE) и карты распределения химических элементов (с) в матрице зювитов донной фации (р. Анарога). М — застывший импактный расплав, Sme — смектит, Qz — кварц

Fig. 3. Structural and textural features (electron microscopic images: a — BSE, b — SE) and maps of chemical element distribution (c) in suevite matrix of the bottom facies (Anaroga River). M — solidified impact melt, Sme — smectite, Qz — quartz



В матрице донных зювитов отмечаются включения застывшего импактного расплава, имеющие алюмосиликатный состав (рис. 3, с). Они характеризуются неправильной, удлинённой, кляксообразной (аутоморфной) формой и неровными, иногда пламеневидными очертаниями, что придает матриксу аутоморфную текстуру (рис. 3, а, б).

Характерной особенностью матрикса зювитов донной фации является присутствие спекшихся минеральных агрегатов (спеков) (рис. 4, d–g), которые представлены обособленными минеральными микротельцами размером до 60 и более мкм, характеризующимися неправильной формой с неровными границами. Спекки обладают низкой, часто закрытой пористостью и плохо различимыми очертаниями отдельных кристаллокластов (рис. 4, e–g). В пределах спеков частицы в некоторых случаях имеют форму многогранников с ровными границами (рис. 4, g), поры могут иметь неправильную, округлую или «полигранную» форму с ровными стенками (рис. 4, d–g). Изредка в матриксе отмечаются класты кварца частично угловатой, а частично неправильной формы со сглаженными или ровными очертаниями (рис. 4, h).

Петрохимический состав матрикса

Матрикс изученных зювитов характеризуется достаточно широким разбросом по содержанию петрогенных компонентов (рис. 5). Матрица зювитов аэродинамической и донной фации имеет широкие вариации состава по концентрации кремнезема (52–91 вес. %), глинозема (2–14 вес. %) и по оксидам щелочей (Na_2O и K_2O 0–4 вес. %). В то же время, фации зювитов хорошо разделяются по FeO и MgO. Более высокие содержания этих компонентов характерны для зювитов донной фации (FeO 2–19 вес. % и MgO 4–15 вес. %). Зювиты аэродинамической фации, напротив, отличаются относительно низким содержанием FeO и MgO (1–5 вес. % каждый). Обращает на себя внимание, что

зювиты аэродинамической фации, в целом, характеризуются относительно более высоким содержанием CaO (до 24 вес. %), в отличие от зювитов донной фации, где содержание оксида кальция составляет 1–7 вес. %. Выявлены некоторые различия вещественного состава матрикса по содержанию Al_2O_3 и K_2O , которые наблюдаются у зювитов из разных областей астроблемы (рис. 5).

Относительно высокое содержание оксидов железа и магния в матриксе зювитов донной фации может быть связано с обилием глинистой компоненты в матрице этих пород, что подтверждается данными микроскопических исследований (рис. 3). Бурное развитие глинистых минералов может указывать на интенсивное вторичное преобразование зювитов, при котором отмечается обилие слоистых силикатов (Naumov, 2002; Stöffler et al., 2013). Этот процесс может свидетельствовать, что материал обломочных импактитов после отложения оставался горячим довольно долго (Вишневицкий, 1992). Относительно высокое содержание CaO в зювитах аэродинамической фации может быть обусловлено широким развитием кальцита в поровом пространстве матрикса, что также наблюдается при гидротермальных преобразованиях обломочных импактитов (Naumov, 2002; Stöffler et al., 2013) и хорошо согласуется с выявленными особенностями матрицы (рис. 1). Наблюдаемые различия матрикса зювитов из разных участков астроблемы по содержанию Al_2O_3 и K_2O , учитывая петрологические различия обломочных импактитов (Максименко и др., 2020; Шумилова и др., 2019) и минералого-петрохимическую специфику пород мишени астроблемы (Ковальчук, Шумилова, 2020), скорее всего, связаны с различием состава исходного протолита зювитов.

Таким образом, выявленные петрохимические особенности матрикса зювитов донной и аэродинамической фаций могут быть обусловлены составом пород мишени астроблемы и постимпактными изменениями

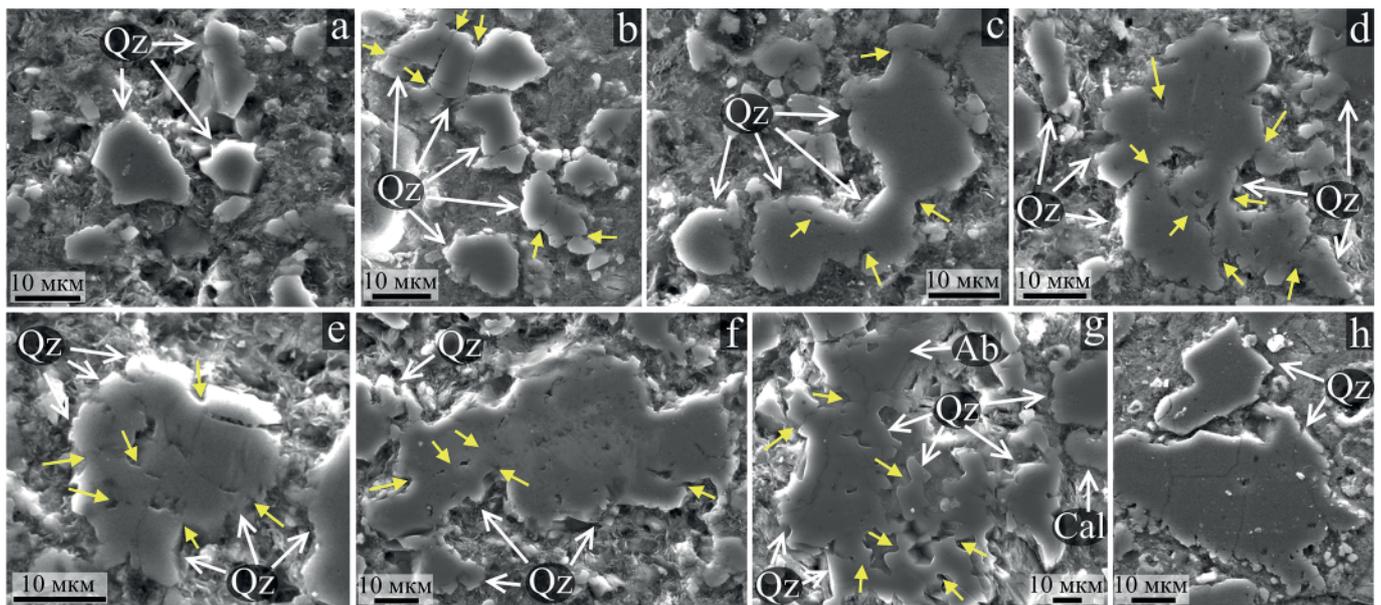


Рис. 4. Кристаллокласты кварца (Qz) и альбита (Ab) в матрице зювитов донной фации (СЭМ-изображения, SE). а, с–g — зювиты района р. Кары; b, h — зювиты района р. Анароги. Желтыми стрелками показаны участки спекания кристаллокластов

Fig. 4. Crystalclasts of quartz (Qz) and albite (Ab) in the matrix of suevites of the bottom facies (electron microscopic images, SE). а, с–g — suevites of the Kara River; b, h — suevites of the Anaroga River. Yellow arrows point to sintering of the crystalloclasts

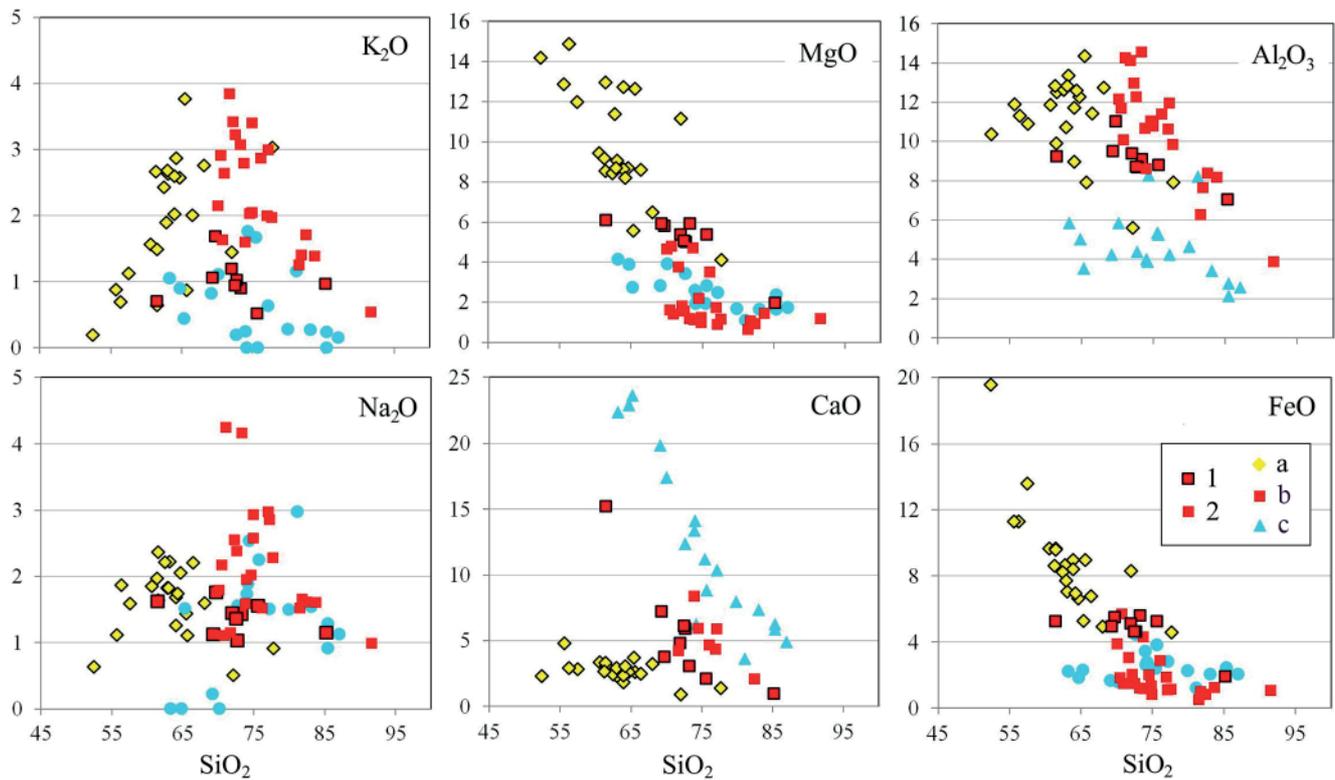


Рис. 5. Вариационные диаграммы петрогенных компонентов матрикса зювитов Карской астроблемы по данным площадного микрозондового анализа с нормированием на 100 (вес. %). Фации зювитов: 1 — донная, 2 — аэродинамическая. Районы распространения зювитов: а — р. Анарога, б — р. Кара, с — р. Сопчаю

Fig. 5. Variation diagrams of petrogenic components of suevite matrix of the Kara astrobleme based on the data of area microprobe analysis, normalized to 100 wt %. Suevite facies: 1 — bottom, 2 — ejecta. Suevite distribution areas: а — Anaroga River, б — Kara River, с — Sopchayu River

обломочных импактитов, т. е. отражают протогенетические особенности протолита и эпигенетические изменения, и не могут быть использованы для анализа условий становления обломочных импактитов.

Обсуждение

Главным источником информации о температурных обстановках формирования импактных пород являются их породообразующие минералы (Фельдман, 1990). Матрикс зювитов характеризуется разнообразием минерального состава и хорошо подходит для анализа температурных условий становления зювитов. Для этого используются минералы-индикаторы температуры. К температурным маркерам относятся кварц, полевые шпаты, циркон, ильменит и магнетит (Stöffler et al., 2013). Другие минералы, такие как хлорит, эпидот, слюды, смектит, кальцит, с учетом интенсивного гидротермального преобразования зювитов (Naumov, 2002), скорее всего, являются новообразованными и не могут быть использованы в качестве надежных реперов для анализа температурного режима формирования обломочных импактитов.

Как правило, для оценки условий образования зювитов используются трековый анализ минералов, анализы остаточной намагниченности и реакционных кайм обломков известняков (Stöffler et al., 2013). Нами установлено, что структурно-текстурные особенности матрицы обломочных импактитов проявляют аналогию со структурой керамических материалов (Шелег и др., 2015; German, 2014; Kong et al., 2015; Richerson,

Lee, 2018 и др.), при образовании которых вещество проходит разные стадии спекания. Мы предлагаем новый подход к изучению особенностей генезиса зювитов — определение специфики температурных условий их становления по характеру локального спекания матрикса, основываясь на подходах материаловедения.

Спекание — это агломерация «индивидуального вещества, взятого в виде порошка при высокой температуре, но ниже его температуры плавления, а также смеси веществ, при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из них» (Салахов, 2015; Сайфуллин, Сайфуллин, 2010). Спекание принято разделять на три стадии — начальную, промежуточную и заключительную (Richerson, Lee, 2018) (рис. 6). Известно, что температура спекания монокомпонентной системы составляет 0.6–0.8 от температуры плавления материала (Chmielewski et al., 2014). За температуру начальной стадии спекания монокомпонентной системы можно принять значение нижней границы температуры спекания, а за температуру заключительной стадии — значение верхней границы (0.6 и 0.8 от температуры солидуса соответственно). Следовательно, температура промежуточной стадии спекания может приниматься равной 0.7 от температуры плавления.

Наиболее распространенными минералами — температурными индикаторами в матриксе изученных зювитов являются кварц и альбит, присутствующие во всех изученных зювитах. Поэтому эти минералы могут быть использованы для оценки локальных температур формирования зювитов.

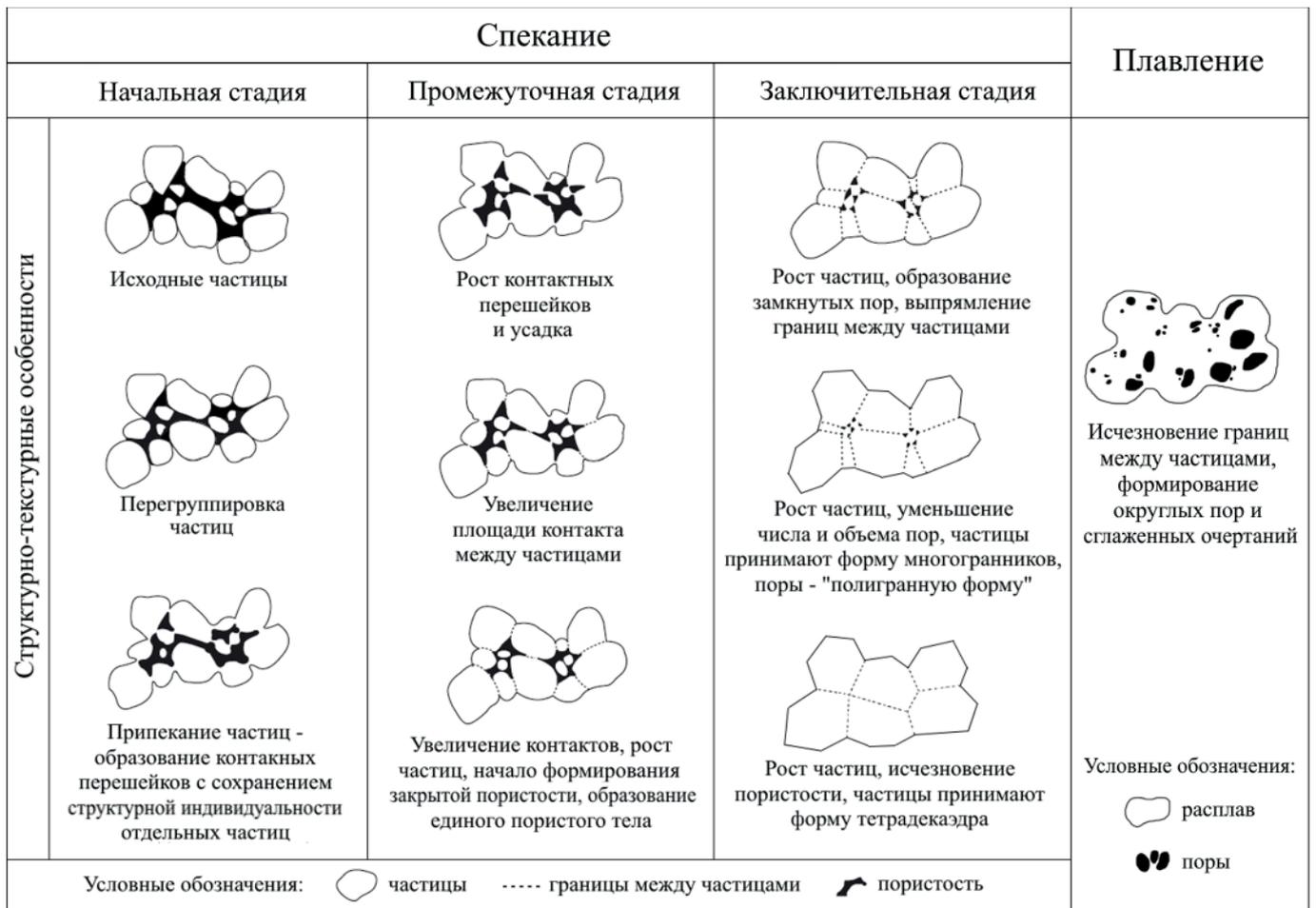


Рис. 6. Схема стадий спекания и плавления (по Андриянов, Лукин, 1979; Уляшев и др., 2023; Шелег и др., 2015; German, 2014; Kong et al., 2015; Richerson, Lee, 2018)

Fig. 6. Schemes of sintering stages and melting (after Andriyanov, Lukin, 1979; Ulyashev et al., 2023; Sheleg et al., 2015; German, 2014; Kong et al., 2015; Richerson, Lee, 2018)

В зювитах аэродинамической фашии альбит установлен в виде угловатых, хорошо обособленных кластеров без признаков спекания (рис. 2, а). Отсутствие признаков спекания альбитовых кластеров указывает на то, что температура локально не достигала нижней границы спекания альбита — около 660 °C (0.6 от температуры плавления альбита) (Navrotsky et al., 1982; Chmielewski et al., 2014). При этом альбитовые класты на контакте друг с другом могут припекаться, что выражается в появлении маломощных контактных перешейков на границах зерен, что по (Richerson, Lee, 2018) является признаком начальной стадии спекания (рис. 2, с). Реже альбитовые класты образуют спекшиеся минеральные агрегаты с сохраненными очертаниями частиц (рис. 2, е), что является признаком промежуточной стадии спекания (Richerson, Lee, 2018). Эти признаки указывают на локальные температуры, достигающие ~660 °C и ~770 °C (0.6 и 0.7 от температуры плавления альбита соответственно) (Navrotsky et al., 1982; Chmielewski et al., 2014).

Кварцевые класты в матрице зювитов аэродинамической фашии могут присутствовать как в обособленном виде (рис. 2, b) (температура локально не достигала начала спекания кварца ~1030 °C) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014), так и с признаками спекания. Класты кварца могут иметь признаки припекания, когда их границы характеризуются маломощными

контактными перешейками (рис. 2, d, f), что является характерной особенностью начальной стадии спекания (Richerson, Lee, 2018). Это указывает на то, что температура при литификации зювитов локально могла достигать порядка 1030 °C (0.6 от температуры плавления кварца) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Кроме того, в матрице зювитов аэродинамической фашии установлены спекшиеся кварцевые агрегаты с порами открытого и изолированного типа, с неровными границами между спекшимися частицами в пределах спеков (рис. 2, g, h). Эти особенности отражают промежуточную стадию спекания, на которой начинается формирование закрытой пористости, а частицы еще сохраняют неровные очертания (рис. 6) (Richerson, Lee, 2018). Соответственно, локальная температура матрикса при литификации зювитов локально могла достигать около 1200 °C (0.7 от температуры плавления кварца) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014).

Матрикс обломочных импактитов донной фашии отличается более высокой степенью локального спекания. Кварц может присутствовать в виде угловатых микрокластеров без признаков спекания (рис. 4, а), что указывает на локальную температуру ниже 1030 °C (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Также изредка отмечаются припекшиеся класты кварца (рис. 4, b), означающие локальную температуру около 1030 °C (0.6

от температуры плавления кварца) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Однако более распространен кварц в виде спекшихся минеральных частиц, образующих плотные обособленные микротельца с низкой, преимущественно закрытой пористостью (рис. 4, d–g). Поры в спеках имеют неправильную, округлую или «полигранную» форму, границы между спекшимися

частицами ровные. Эти признаки отвечают заключительной стадии спекания, на которой происходит уменьшение объема пор, выравнивание границ между зернами, а также формирование «полигранной» формы пор (рис. 6) (Richerson, Lee, 2018). Соответственно, локальная температура могла достигать 0.8 от температуры плавления кварца (температуры заключитель-

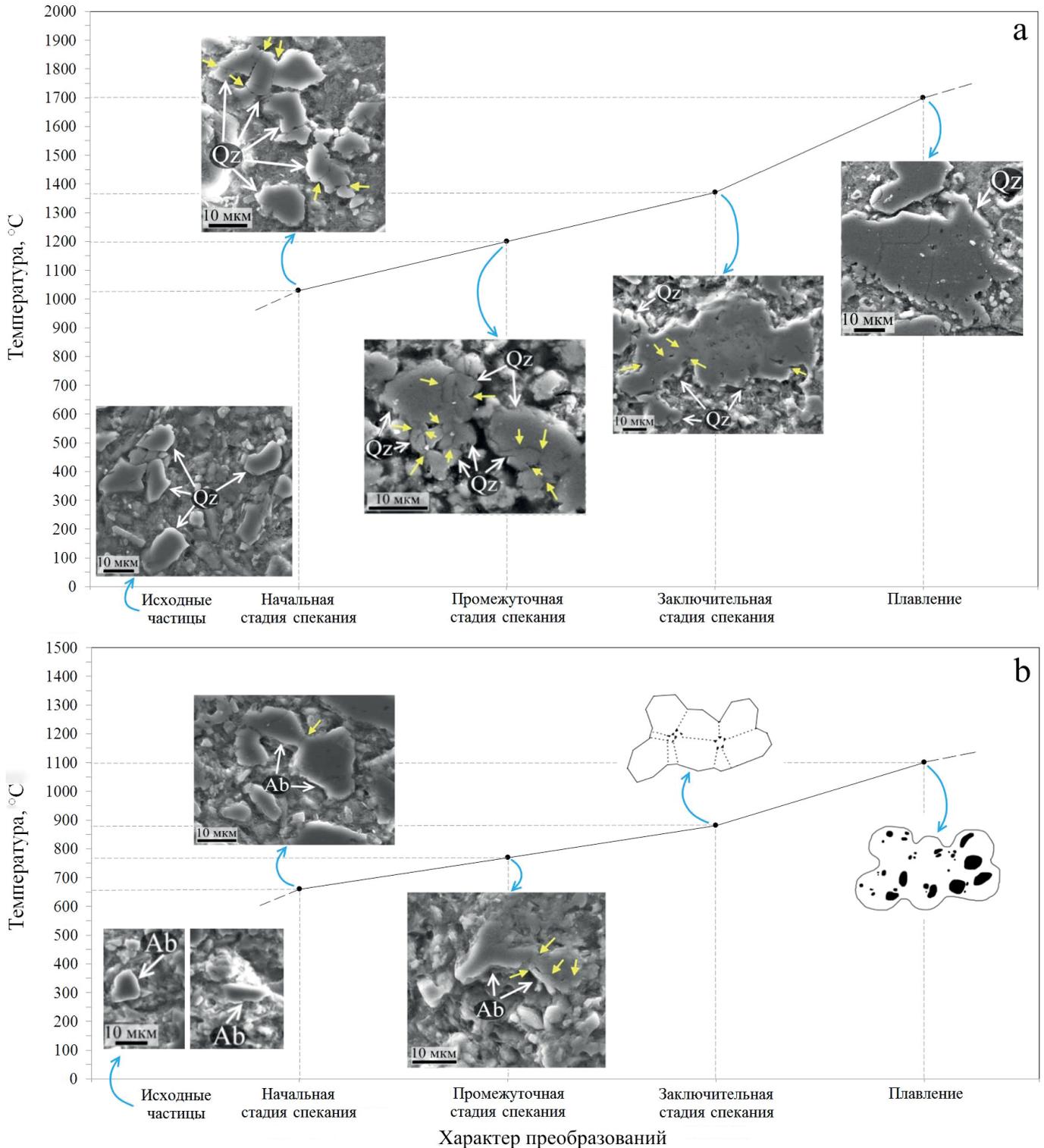


Рис. 7. Схема характера преобразования кварца (а) и альбита (б) в матрице зювитов Карской астроблемы в зависимости от температуры. Температуры рассчитаны с использованием данных (Navrotsky et al., 1982; He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014; Richerson, Lee, 2018). СЭМ-изображения, SE. Желтыми стрелками показано спекание кристаллокластов

Fig. 7. Scheme of quartz (a) and albite (b) transformation in suevite matrix of the Kara astrobleme as a function of temperature. Temperatures were calculated using data from (Navrotsky et al., 1982; He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014; Richerson, Lee, 2018). Electron microscopic images, SE. Yellow arrows point to sintering of crystalloclasts



ной стадии спекания кварца) — около 1370 °С (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Интересной особенностью донных зювитов является присутствие в матриксе кластов кварца угловатой формы с частично сглаженными очертаниями и мелкими округлыми порами (рис. 4, h). Эти особенности находят отражение в морфологии расплавных ударных стекол, полученных экспериментальным путем (Уляшев и др., 2023) (рис. 6). Сохраненные угловатые очертания указывают на частичное плавление кластов в зювитах in situ, уже после попадания в породу. Соответственно, температура локально могла достигать температуры плавления кварца (около 1700 °С) (He et al., 2021), но кратковременно, поскольку не произошло полного плавления таких кластов.

Таким образом, установлено, что матрикс зювитов Карской астроблемы характеризуется разным характером спекания минеральных компонентов. Для кварца выявлены признаки трех основных стадий спекания. Альбит в матриксе зювитов присутствует от неизмененных частиц до промежуточной стадии спекания. С использованием полученных данных построены диаграммы, отображающие характер изменений кварца и альбита в зависимости от температуры (рис. 7). На диаграммах точками обозначены температуры начала различных стадий преобразования кварца (рис. 7, a) и альбита (рис. 7, b), кривые показывают возрастание температуры и смену стадий преобразования этих минералов. Диаграммы проиллюстрированы соответствующими характерными структурно-текстурными особенностями кристаллокластов в матриксе зювитов Карской астроблемы. Отмечается, что наиболее интен-

сивные структурно-текстурные преобразования кварца и альбита происходят начиная с промежуточной стадии спекания (около 1200 °С для кварца и около 770 °С для альбита), на которой кристаллокласты образуют спекшиеся минеральные агрегаты и утрачивают свою обособленность. При дальнейшем увеличении температуры такие спекы преобразуются в единые минеральные микротельца, в которых очертания отдельных спекшихся частиц становятся неразличимы.

С использованием выявленных признаков спекания альбита и кварца в матриксе установлены максимальные локальные температурные условия при становлении фаций зювитов Карской астроблемы. Наиболее чувствителен к температуре альбит, поэтому характер его спекания может служить маркером нижней границы диапазона температур становления обломочных импактитов. Кварц, как более термоустойчивый минерал, может использоваться в качестве индикатора верхней границы возможных максимальных локальных температур при формировании зювитов. Исходя из полученных данных, следует, что становление зювитов аэродинамической фации происходило при локальных температурах от <600 до 1200 °С, зювитов донной фации — при температурах от <1030 до 1700 °С (рис. 8). Таким образом, формирование зювитов Карского кратера происходило в условиях очень широкого диапазона температур даже в пределах одной фации, что подтверждает гетерогенный характер условий формирования обломочных импактитов на микроуровне. В целом, для зювитов фации донных центробежных потоков характерна более высокая максимальная локальная температура при становлении по-

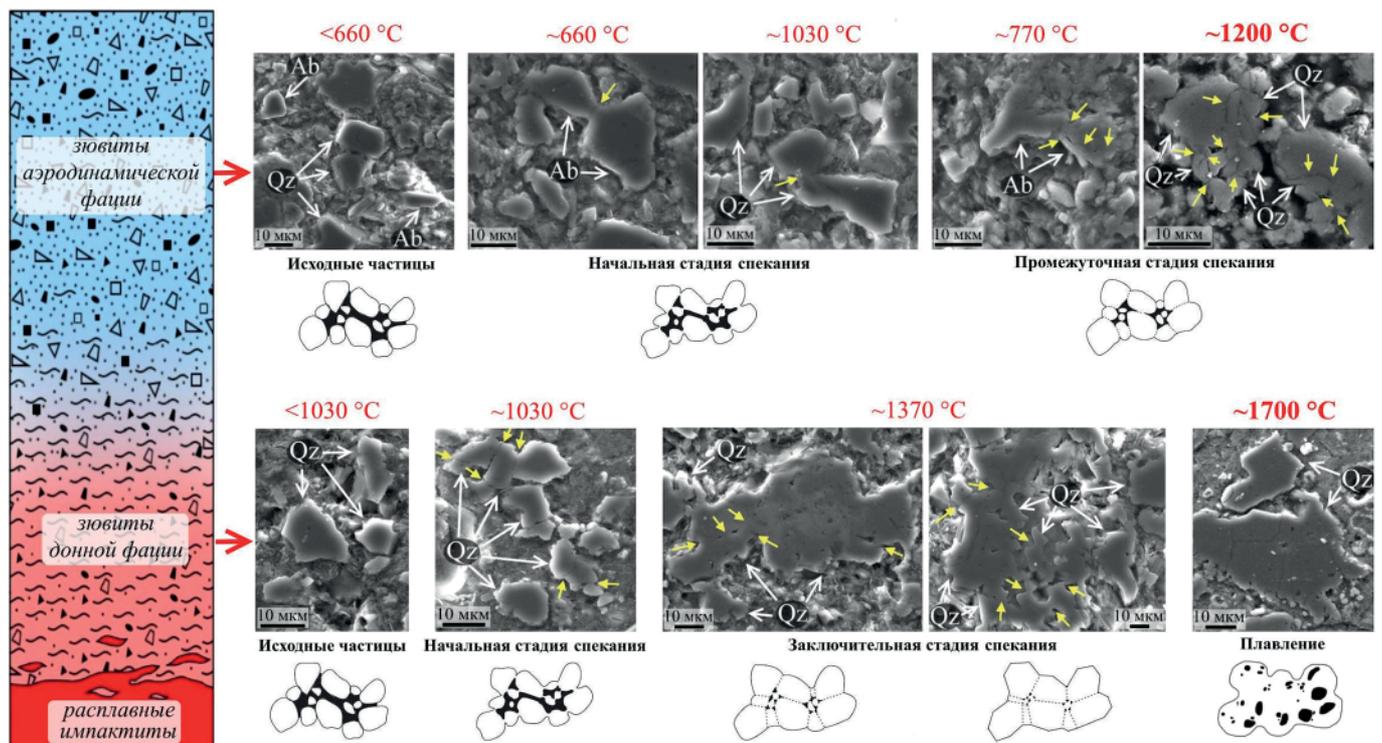


Рис. 8. Характер спекания матрикса и локальные температуры становления фаций зювитов на схеме разреза коптогенного комплекса Карской астроблемы (вне масштаба). СЭМ-изображения, SE. Желтыми стрелками показано спекание кристаллокластов

Fig. 8. Nature of matrix sintering and local temperatures of suevite facies formation on the diagram of the section of the coptogenic complex of the Kara astrobleme (out of scale). electron microscopic images, SE. Yellow arrows point to sintering of crystallites



роды (~1700 °С) по сравнению с обломочными импактитами аэродинамической фации (~1200 °С), что хорошо согласуется с известными моделями импактного кратерообразования (Stöffler et al., 2013).

Сильно гетерогенный температурный режим становления обломочных импактитов определяется количеством и размерами капель ударного расплава, присутствующих в кластическом материале при литификации (Максименко и др., 2020, 2022). Кроме того, важным фактором для температурного режима может быть плотность осадка — в донной фации более плотный кластический материал, обеспечивающийся первично придонной потоковой природой и перекрытием толщей аэродинамического материала. При этом, учитывая очень большую разницу локальных термических условий, оценивать конкретную температуру формирования зювитов некорректно. В то же время, анализ максимальных температур представляется весьма полезным при выполнении фациального анализа обломочных импактитов.

Заключение

В результате проведенных исследований впервые детально описаны структурно-текстурные и вещественные особенности матрикса фаций обломочных импактитов Карской астроблемы. Установлено, что матрикс зювитов донной и аэродинамической фаций характеризуется разнообразием минерального состава и широкими вариациями петрохимического состава. Определено, что петрохимический состав матрикса зювитов может быть обусловлен особенностями состава исходного протолита и постимпактного преобразования обломочных импактитов и не является определяющим признаком для выявления фациальных условий образования зювитов. Фациальные различия зювитов отражаются различными структурно-текстурными особенностями матрикса, на основе которых, с использованием подходов материаловедения, проведен анализ характера спекания матрикса. Выявлено, что он различен. Кварц и альбит в матриксе также отличаются по стадиям спекания, соответствующим разным температурным условиям. Установлено, что зювиты донной фации отличаются более высокой локальной максимальной температурой литификации — около 1700 °С, зювиты аэродинамической фации — около 1200 °С. Таким образом, характер спекания матрикса зювитов является хорошим индикатором условий формирования и может быть использован в качестве инструмента для установления максимальных температурных условий при литификации и для диагностики фаций обломочных импактитов в других астроблемах, что важно при выяснении параметров и сценариев ударных событий. В ходе проведенных исследований установлен весьма гетерогенный характер термических условий формирования обломочных импактитов, что указывает на отсутствие возможности определения конкретных условий становления зювитов как породы в целом.

Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории минералогии алмаза ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за помощь в экспедиционных работах и отборе образцов зювитов, Е. М. Тропникову за помощь в электронно-микроскопическом исследовании зювитов, А. Е. Шмы-

рову за помощь в пробоподготовке. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Геонаука» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Работа выполнена в рамках темы НИР ГР № 122040600009-2.

Литература / References

- Андрианов Н. Т., Лукин Е. С. Термическое старение керамики. Москва: Metallurgy, 1979. 100 с.
Andrianov N. T., Lukin E. S. Thermal aging of ceramics. Moscow: Metallurgy, 1979, 100 p. (in Russian)
- Вишневецкий С. А. Зювитовые мегабрекчии — новый тип отложений взрывного облака Попигайской астроблемы. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГТМ, 1994. 66 с.
Vishnevsky S. A. Zuvite megabreccias — a new type of explosive cloud deposits in the Popigai astrobleme. Novosibirsk: SB RAS SRC UIGGM, 1994, 66 p. (in Russian)
- Геологический словарь. В трех томах. Т.1. А-Й. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2010. 432 с.
Geological dictionary. In three volumes. V. 1. A-Й. St. Petersburg: VSEGEI, 2010, 432 p. (in Russian)
- Геологический словарь. В трех томах. Т. 2. К-П. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.
Geological dictionary. In three volumes. V. 2. K-P. St. Petersburg: VSEGEI, 2011, 480 p. (in Russian)
- Ковальчук Н. С., Шумилова Т. Г. Минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Карской астроблемы (Пай-Хой) // Литосфера. 2020. 20 (2). С. 168–183. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-168-183
Kovalchuk N. S., Shumilova T. G. Mineralogical and geochemical features of black shales surrounding the Kara astrobleme (Pai-Khoi). Lithosphere, 2020, 20 (2), pp. 168–183. (in Russian)
- Максименко Н. И., Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С. Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) // Петрология. 2020. Т. 28. № 6. С. 628–649. DOI: 10.31857/S0869590320050039.
Maksimenko N. I., Shumilova T. G., Kovalchuk N. S. Petrological characteristics of suevite varieties of the Kara astrobleme (Pai-Khoi, Russia). Petrology, 2020, V. 28, No. 6, pp. 628–649. (in Russian)
- Максименко Н. И., Шумилова Т. Г. Критерии фациального деления зювитов (на примере зювитов Карской астроблемы) // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. №10 (124). DOI: 10.23670/IRJ.2022.124.69
Maksimenko N. I., Shumilova T. G. Criteria for the facies division of suevites (using suevites of the Kara astrobleme as an example). International Research Journal, 2022, No. 10 (124). (in Russian)
- Сайфуллин Р. С., Сайфуллин А. Р. Современная химико-физическая энциклопедия — лексикон. Казань: Издательство «Фэн» АН РТ, 2010. 696 с.
Saifullin R. S., Saifullin A. R. Modern chemical-physical encyclopedia — lexicon. Kazan: Fan, 2010, 696 p. (in Russian)
- Салахов А. М. Структурообразование керамики из глин, формирующих при обжиге различные минеральные фазы // Керамические строительные материалы. 2015. № 8. С. 68–74.
Salakhov A. M. Structure formation of ceramics from clays that form various mineral phases during firing. Ceramic building materials, 2015, No. 8, pp. 68–74. (in Russian)



- Селивановская Т. В., Мащак М. С., Масайтис В. Л. Импактные брекчии и импаکتиты Карской и Усть-Карской астроблем // Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя. Л.: Наука. 1990. С. 55–96.
- Selivanovskaya T. V., Maschak M. S., Masaitis V. L. Impact breccias and impactites of the Kara and Ust-Kara astroblemes. Impact craters at the Mesozoic-Cenozoic boundary. Leningrad: Nauka, 1990, pp. 55–96. (in Russian)
- Уляшев В. В., Шумилова Т. Г., Исаенко С. И. Характеристика стекол в продуктах экспериментального моделирования импактных расплавов // Стекло и керамика. 2023. Т. 96. № 5. С. 14–22. DOI: 10.14489/glc.2023.05.pp.014-022
- Ulyashev V. V., Shumilova T. G., Isaenko S. I. Characteristics of glasses in the products of experimental modeling of impact melts. Glass and Ceramics, 2023, V. 96, No. 5, pp. 14–22. (in Russian)
- Фельдман В. И. Петрология импактитов. Москва: МГУ, 1990. 299 с.
- Feldman V. I. Petrology of impactites. Moscow: Moscow State University, 1990, 299 p. (in Russian)
- Шелег В. К., Ковчур А. С., Москалец Р. А. Теоретический анализ диффузии при спекании порошковых материалов // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2015. Вып. 29. С. 114–120.
- Sheleg V. K., Kovchur A. S., Moskalets R. A. Theoretical analysis of diffusion during sintering of powder materials. Bulletin of the Vitebsk State Technological University. 2015, 29, pp. 114–120. (in Russian)
- Шумилова Т. Г., Исаенко С. И., Ковальчук Н. С., Уляшев В. В., Макеев В. А. 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.
- Shumilova T. G., Isaenko S. I., Kovalchuk N. S., Ulyashev V. V., Makeev V. A. Varieties of impactites, apogonal diamonds and associated carbon phases of the Kara astrobleme. Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings 2016): Proceedings of the mineralogical seminar with international participation. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2016, pp. 270–271. (in Russian)
- Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С., Макеев В. А. Геохимическая специфика алмазоносных зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой) // Доклады академии наук. 2019. 486 (2). С. 233–236. DOI: 10.31857/S0869-56524862233-236
- Shumilova T. G., Kovalchuk N. S., Makeev V. A. Geochemical specificity of diamondiferous suevites of the Kara astrobleme (Pai-Khoi). Doklady Earth Sciences, 2019, 486 (2), pp. 233–236. (in Russian)
- Электронный справочник-определитель импактитов и брекчиевых образований астроблем России на примере Попигаийской, Карской и Усть-Карской астроблем. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ. 2024. URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=cbae64d392441749538cdc73124ccef#2c102a469d1894646> (дата обращения: 28.05.2024)
- Electronic reference book-determinant of impactites and breccia formations of astroblemes of Russia on the example of Popigai, Kara and Ust-Kara astroblemes. Saint Petersburg: VSEGEI. 2024. URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=cbae64d392441749538cdc73124ccef#2c102a469d1894646> (date of access: 28.05.2024) (in Russian)
- French B. M. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. 120 p.
- Chmielewski M., Nosewicz Sz., Rojek J., Pietrzak K., Mackiewicz S., Romelczyk-Baishya B. A study of densification and microstructure evolution during hot pressing of NiAl/Al₂O₃ composite // Advanced Composite Materials. 2014. 24. P. 1–10. DOI: 10.1080/09243046.2013.879408
- He J., Jusnes K. F., Tangstad M. Phase transformation in quartz at elevated temperatures // Aspects in Mining & Mineral Science. 2021. 6. P. 691–699. DOI: 10.31031/AMMS.2021.06.000629
- German R. M. Sintering: from empirical observations to scientific principles. Elsevier, 2014. 536 p.
- Kong L. B., Huang Y. Z., Que W. X., Zhang T., Li S., Zhang J., Dong Zh., Tang D. Transparent Ceramics. Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer, 2015. XII. 734 p.
- Meyer C. Sedimentological, structural and geochemical investigations of the suevite of the impact crater Nördlinger Ries, Germany. PhD thesis. Berlin: Free University, 2012. 130 p.
- Navrotsky A., Capobianco C., Stebbins J. Some thermodynamic and experimental constraints on the melting of albite at atmospheric and high pressure // Journal of geology. 1982. V. 90. № 6. P. 679–698. DOI: 10.1086/628724
- Naumov N. V. Impact-Generated Hydrothermal Systems: Data from Popigai, Kara, and Puchezh-Katunki Impact Structures // Impacts in Precambrian Shields. Ed. J. Plado, L. J. Pesonen. Impact Studies. Berlin, Heidelberg: Springer. 2002. P. 117–171. DOI: 10.1007/978-3-662-05010-1_6
- Osinski G. R., Grieve R. A. F., Spray J. G. The nature of the groundmass of surficial suevite from the Ries impact structure, Germany, and constraints on its origin // Meteoritics & Planetary Science. 2004. Vol. 39. Issue 10. P. 1655–1683. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00065.x
- Richerson D. W., Lee W. E. Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design, 4th Ed. CRC Press, 2018. 837 p. DOI: 10.1201/9780429488245
- Shumilova T. G., Zubov A. A., Isaenko S. I., Karateev I. A., Vasiliev A. L. Mysterious long-living ultrahigh pressure or secondary impact crisis // Scientific Reports. 2020. Vol. 10 (2591). DOI: 10.1038/s41598-020-59520-3
- Stöffler D., Grieve R. Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms // Recommendation of the International Union of Geological Sciences. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2007. P. 82–92.
- Stöffler D., Artemieva N. A., Wünnemann K., Reimold U. W., Jacob J., Hansen K. B., Summerson I. A. T. Ries crater and suevite revisited — Observations and modeling Part I: Observations // Meteoritics & Planetary Science. 2013. V. 48. № 4. P. 515–589. DOI: 10.1111/MAPS.12086

Поступила в редакцию / Received 13.06.2024