

**МИНЕРАЛОГИЯ, КРИСТАЛЛОГРАФИЯ. ГЕОХИМИЯ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / MINERALOGY, CRYSTALLOGRAPHY. GEOCHEMISTRY, GEOCHEMICAL
METHODS OF PROSPECTING FOR MINERALS**

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.58>

**СИНИМПАКТНОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В РАСПЛАВНЫХ ИМПАКТИТАХ КАРСКОЙ
АСТРОБЛЕМЫ**

Научная статья

Зубов А.А.^{1,*}, Шумилова Т.Г.²

¹ ORCID : 0000-0002-5377-5315;

² ORCID : 0000-0002-1772-3606;

^{1,2} Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (alexander.zubov.1994[at]gmail.com)

Аннотация

Проведены исследования трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы – обособленные массивные тела, а также жильные тела и бомбы в зювитах. При помощи оптической микроскопии, рентгенофазового анализа, инфракрасной и рамановской спектроскопии, сканирующей электронной спектроскопии с энергодисперсионной спектроскопией получена информация о присутствующих в структуре расплавных импактитов минералах и стёклах. На основе исследований «in situ» нами установлено, что парагенезис минералов, образовавшихся непосредственно из импактного расплава для массивных тел и бомб однообразен и довольно ограничен. В то же время жильные тела характеризуются большим разнообразием синимпактных минералов, образовавшихся из неомогенного импактного расплава. Анализ пространственных взаимоотношений минеральных фаз и референтных температур плавления минералов позволил установить последовательность минералообразования в расплавных импактитах Карской астроблемы:

1) в массивных телах: лешательерит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевои шпат;

2) в жильных телах: циркон – коэсит – лешательерит – смектит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло – пирротин;

3) в бомбах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевои шпат.

Ключевые слова: Карская астроблема, расплавные импактиты, синимпактная минерализация, последовательность минералообразования, массивные тела, жильные тела, бомбы.

SYNIMPACT MINERALIZATION IN MELT IMPACTITES OF THE KARA ASTROBLEM

Research article

Zubov A.A.^{1,*}, Shumilova T.G.²

¹ ORCID : 0000-0002-5377-5315;

² ORCID : 0000-0002-1772-3606;

^{1,2} Institute of Geology of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktvkar, Russian Federation

* Corresponding author (alexander.zubov.1994[at]gmail.com)

Abstract

Three types of melt impactites of the Kara Astroblem – isolated massive bodies, as well as vein bodies and bombs in suevites – have been studied. Using optical microscopy, X-ray phase analysis, infrared and Raman spectroscopy, scanning electron spectroscopy with energy dispersive spectroscopy, information about minerals and glasses present in the structure of melt impactites was obtained. Based on in situ studies, we have established that the paragenesis of minerals formed directly from the impact melt for massive bodies and bombs is monotonous and rather limited. At the same time, vein bodies are characterized by a great variety of synimpact minerals formed from non-homogeneous impact melt. The analysis of spatial relationships of mineral phases and reference temperatures of melting of minerals allowed to determine the sequence of mineral formation in melt impactites of the Kara Astroblem:

1) in massive bodies: lechatelierite – ilmenite – pyroxene – aluminosilicate glass – feldspar;

2) in vein bodies: zircon – coesite – lechatelierite – smectite – ilmenite – pyroxene – aluminosilicate glass – pyrrhotite;

3) in bombs: lechatelierite – pyroxene – aluminosilicate glass – feldspar.

Keywords: Kara astroblem, melt impactites, synimpact mineralization, mineral formation sequence, massive bodies, vein bodies, bombs.

Введение

Карская астроблема является одной из крупнейших астроблем известных на Земле, её диаметр ~65 км, возраст ~70 млн. лет [1]. Кратер расположен в нижнем течении р. Кары на территории Ненецкого и Ямало-Ненецкого автономных округов. В результате трансформации пород мишени при импактиогенезе происходят различные изменения – растрескивание, дробление, брекчирование, плавление, испарение, при этом, как результат, формируются импактные брекчии (зювиты) и расплавные импактиты. Последние представляют особый интерес, поскольку их формирование происходит из импактного расплава, являющегося результатом воздействия высоких давлений и сопутствующих

высоких температур, существенно превышающих условия регионального метаморфизма [2]. Так, например, в точке контакта ударника с породами мишени температуры могут достигать 10000 °С, а давления – до первых сотен ГПа [3]. В зависимости от скорости остывания импактного расплава могут образовываться стёкла (в процессе закалки импактного расплава), а также разнообразные по степени кристалличности и пористости импактиты [4]. В некоторых случаях образуются высокобарные минеральные фазы, такие как: апографитовые и апоугольные алмазы, алмазы по органическим остаткам [5], [6]; высокобарные модификации кремнезёма – коэсит, стишовит; рейдит и т.д. [4].

Минералы в продуктах импактитогенеза подразделяются на *реликтовые* – реликтовые минералы пород мишени, *синимпактные* – образующиеся непосредственно в ходе ударного процесса и *постимпактные* – продукты преобразования реликтовых и синимпактных минералов. В то же время синимпактное минералообразование подразделяется в зависимости от механизма перехода вещества из одной формы в другую на продукты твердофазной трансформации и сформированные из расплава путем диффузной кристаллизации (кристаллические фазы) и закалки/солидификации расплава (стёкла).

Современная международная классификация предусматривает подразделение расплавных импактитов на *богатые обломками*, *бедные обломками* и *безобломочные*. Их разнообразие также расширяется за счёт вариативной степени кристалличности и возможных постимпактных преобразований исходного вещества импактита [2].

Изучение массивных тел расплавных импактитов (обычно называемых в русскоязычной литературе «тагамитами») на р. Анарога ранее проводилось В.Л. Масайтисом, М.С. Мащакком, Т.В. Селивановской, Б.А. Мальковым, В.Л. Андриичевым и др. Предшественниками была представлена общая характеристика массивных тел расплавных импактитов [7], [8]. Были выделены две разновидности тагамитов согласно их текстурно-структурным особенностям – атакситовые и массивные, изучен вещественный состав тагамитов, а также содержание элементов-примесей. Согласно [9] в основной массе тагамитов диагностированы обломки олигоклаза, осколки кварца и его изометричные округлые зёрна, обломки гранулированного кварца (кварцита), обломки и гипидиоморфные кристаллы полевых шпатов, литокласты серицитового сланца, обломки «микродиорита», а также вкрапленность пирита. С помощью СЭМ были выявлены графит, циркон, бадделит, монацит, апатит, барит, сфен, ильменит, рутил, хромит, пентландит, пирротин, халькопирит, пирит, сфалерит, купроаурит. Также отмечалось, что циркон, хромит, ильменит и титанит несут следы ударной грануляции и частичного плавления.

Жильные стёкла, обнаруженные на р. Кара, первоначально названные «лентовидными стёклами» [8] и «жилыми тагамитами» [9], имеют более сложный минеральный парагенезис. Сульфиды меди и никеля, а также комплекс ксеногенных рудных (сфен, ильменит, рутил) и редкометалльных (циркон, бадделит, монацит) минералов были рассмотрены в исследовании Б.А. Малькова [9]. Отмечалось присутствие микровкрапленников купроаурита [10]. Позднее в жильных телах обнаружен коэсит, что позволило отнести их к ультравысокобарным высокотемпературным образованиям [11].

Бомбы расплавных импактитов изучены в существенно меньшей степени. Среди них были выделены разновидности по цветовым характеристикам и содержанию воды [12], а также спектроскопическим особенностям [13].

Изучение минералогии кристаллических и некристаллических веществ, образующихся в ходе импактогенеза имеет фундаментальное значение, что определяется многогранностью процесса трансформации вещества, анализируется в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей. Выполнение данного исследования обусловлено необходимостью выявления специфики синимпактного минералообразования в расплавных импактитах, принципиально различающихся по форме тел, степени их кристалличности и парагенезису минералов, а также по условиям солидификации.

Методы и принципы исследования

Каменный материал был отобран из естественных обнажений в долинах рр. Кара, Анарога, Кердорсашор и Хановой-Яха в ходе геологических экспедиций 2015, 2017 и 2021 гг. Аналитические исследования проведены на базе центра коллективного пользования «Геонаука» (Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар). Диагностика минералов выполнялась при помощи комплекса методов. Анализ валового состава выполнялся на порошковых пробах. Пробоподготовка для локальных микроскопических и спектроскопических исследований включала изготовление петрографических шлифов большой площади с полированной поверхностью без использования покровного стекла. Рентгенодифракционный анализ порошковых проб выполнен на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu, Япония) в стандартной алюминиевой кювете (Cu-анод, ток – 30 мА, напряжение – 30 кВ). Порошковая проба коричневого стекла проанализирована на приборе DX2700BH (Haoyuan, Китай) с использованием кремниевого дрейфового детектора и рентгеновской трубки с Cu анодом при токе – 30 мА, напряжении – 40 кВ на кремниевом держателе. Инфракрасные спектры получены на фурье-спектрометре ИнфраЛИОМ ФТ-02, Люмекс (Россия). Спектры комбинационного рассеяния света получены на спектрометре высокого разрешения LabRam HR 800 (Horiba Jobin Yvon) при комнатной температуре и атмосферном давлении с возбуждением лазером Ar⁺ (514.5 нм). Фазовая диагностика, морфологические особенности и анализ пространственного взаимоотношения минералов выполнены при помощи сканирующих электронных микроскопов (СЭМ) TESCAN VEGA3 (Czech Republic) с энергодисперсионной приставкой Oxford instruments X-Max и Axia ChemiSEM (ThermoFisher Scientific).

Основные результаты

Тела массивных расплавных импактитов присутствуют на рр. Кара и Анарога (рис. 1а). Мощность коренных выходов достигает 8–10 м. На макроскопическом уровне излом породы раковистый, сколы острые. Цвет коричневатый. На микроскопическом уровне основная масса представлена смесью аморфной и кристаллической компонент полевошпатового состава.

Жильные тела обнаружены в коренных выходах зювитов массивного облика на правом и левом берегах р. Кара недалеко от устья руч. Тогорей (рис. 1б, в). Тела образуют маломощные извилистые вытянутые тела, формирующие штокверкоподобную систему субвертикального направления. Мощность тел 2-3 см с раздувами до 10 см. Цвет стёкол преимущественно серый, серый с фиолетовым оттенком, реже чёрный, иногда коричневый. Коричневые тела характеризуются явно выраженным стекляннным блеском, черные – жирным, остальные стекла являются матовыми.

Бомбы застывшего импактного расплава являются компонентом зювитов и присутствуют на рр. Кара, Анарога, Кердорсашор и Хановой-Яха (рис. 1г). Их размеры в поперечнике в основном находятся в пределах первых десятков сантиметров. Бомбы в коренных обнажениях представлены как субизометричной формой, так и существенно удлинёнными телами в видимом сечении. По цвету встречаются светло-серые, серые, светло-коричневые, коричневые и ярко бурые разности.

Данные разновидности расплавных импактитов по степени кристалличности и преобладающей в них кристаллической компоненте подразделяются на несколько разновидностей – преимущественно стекловатые (в основном относятся к жильным телам и некоторым бомбам), преимущественно смектитовые (некоторые бомбы) и бомбы с плотной матрицей, представленной главным образом микрокристаллическим полевошпатовым агрегатом.

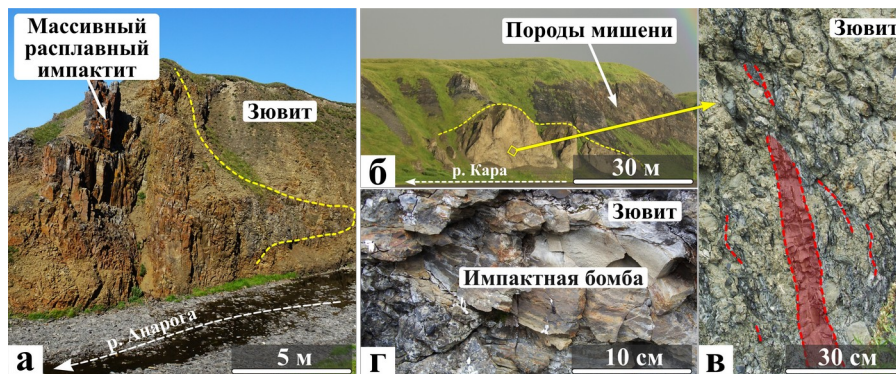


Рисунок 1 - Коренные выходы массивного расплавного импактита на р. Анарога (а), зювитов с жильными телами на р. Кара (б), жильные тела во вмещающем зювите на р. Кара (в), а также импактная бомба в зювите на р. Анарога (г)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.58.1>

Примечание: на рисунке (в) красным цветом с пунктиром отмечены жильные тела мощностью в пределах до первых см, а также тело мощностью до 10 см в центральной части изображения

Последовательность синимпактного минералообразования для трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы установлена после комплексной фазовой диагностики минералов на основе анализа их морфологических особенностей и пространственных взаимоотношений в структуре расплавных импактитов по данным сканирующей электронной микроскопии и референтных температур плавления минералов.

В массивных расплавных импактитах установлены следующие синимпактные фазы в порядке их образования при снижении температуры неомогенного расплава: лешательерит (здесь и далее в скобках – температура плавления ~1700 °С) – ильменит (~1300 °С [14]) – пироксен (~1200 °С [15]) – алюмосиликатное стекло (~1200 °С) – полево шпат (~1200 °С). Кристаллы пироксена в массивных телах мало сохранились, единственное скопление кристаллов данного минерала было установлено в образце из тагамитового столба на р. Кара [16] (рис. 2г). Полученная цветная карта энергодисперсионной спектроскопии и снимок СЭМ матрицы массивного расплавного импактита свидетельствуют о преобладании в массивном расплавном импактите полевого шпата, что подтверждается данными спектроскопии КРС.

В расплавных бомбах выявлено присутствие следующих синимпактных минералов в порядке их солидификации: пироксен – алюмосиликатное стекло – полево шпат. Необходимо отметить, что анатаз был диагностирован при КРС профилировании полевошпатовой матрицы импактной бомбы, однако, его морфологические особенности не ясны, так как самостоятельные обособления при СЭМ исследованиях не были выявлены. Исследованные бомбы представлены несколькими разновидностями в зависимости от степени кристалличности и фазового состава: стекловатые, микрокристаллические полевошпатовые и смектитовые.

Стекловатая разновидность представлена образцом бомбы с алюмосиликатной матрицей полевошпатового состава с большим количеством рассеянных в ней агрегатов (обломков) сильно дезинтегрированных минералов граната (родолита), микрокристаллами пироксенов и миндалинами со смектитом (рис. 2д). В данном случае последовательность их образования, исходя из их температур плавления (примерно равна температуре кристаллизации), следующая: пироксен (~1200 °С [15]) – алюмосиликатное стекло (~1200 °С [17]). Явных признаков кристаллизации граната не обнаружено.

Микрокристаллическая разновидность практически нацело представлена микрокристаллическим полевым шпатом. В полевошпатовой матрице наблюдается практически полное замещение микрокристаллов пироксена смектитом (рис. 2е). Данная разновидность характеризуется следующей последовательностью минералообразования из импактного расплава: лешательерит (~1700 °С) – пироксен (~1200 °С [15]) – полево шпат (~1200 °С [17]).

Смектиновая разновидность сложна для изучения в связи с интенсивным выветриванием и замещением смектиновой и глинистой компонентой, поэтому последовательность минералообразования в ней на данный момент не однозначна и требует более прецизионных исследований (рис. 2и).

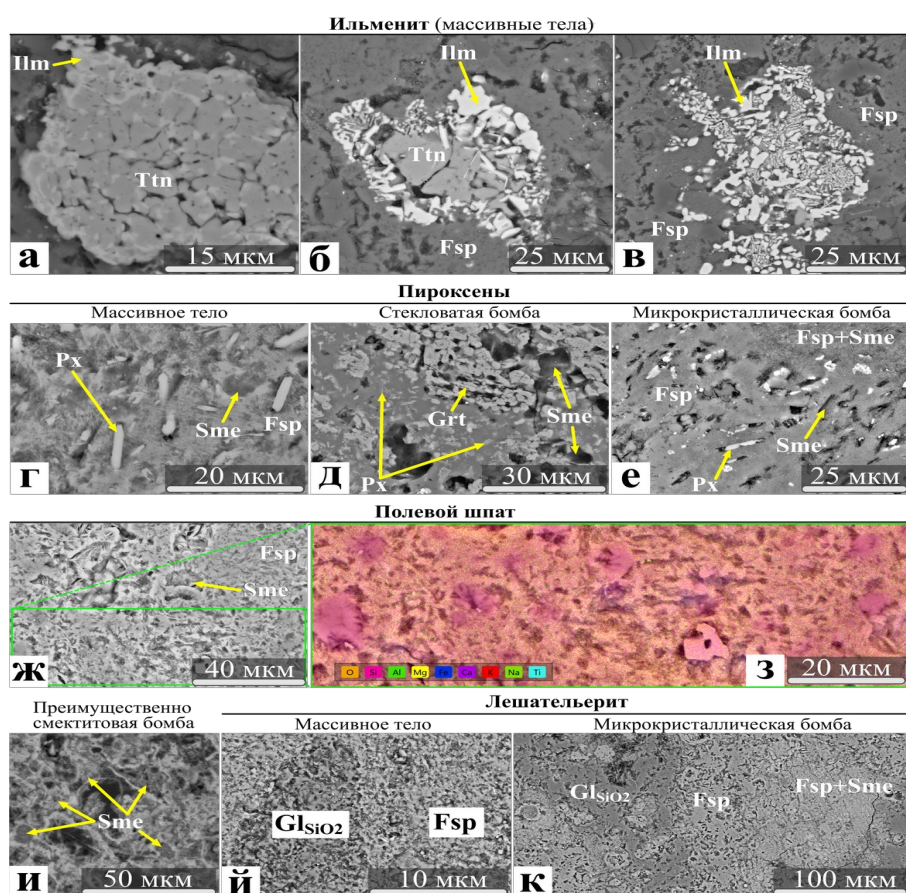


Рисунок 2 - Минералы и стёкла расплавленного парагенезиса расплавных импактитов в массивных телах (ф-г, ж, з, й) и бомбах (д, е, к) Карской астроблемы по данным СЭМ
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.58.2>

Примечание: Fsp – полевой шпат; Sme – смектит; Px – пироксен; Ttn – титанит; Ilm – ильменит; Grt – гранат; на рисунке з – цветная карта распределения элементов по данным ЭДС спектроскопии участка полевошпатовой матрицы (ж) образца массивного расплавленного импактита на р. Анарага; на рисунке и – микроструктура преимущественно смектиновой бомбы

Для жильных расплавных импактитов ранее нами была установлена синимпактная последовательность минералообразования с дифференциацией импактного расплава [11], [23]. На текущий момент парагенезис минералов дополнен и последовательность минералообразования уточнена (в порядке понижения температуры солидификации):

1 – циркон (гранулярный) (здесь и далее по тексту в скобках температура плавления ~ 2500 °C [18]) встречается на границе реликтовых кристаллов циркона, которые зачастую дезинтегрированы (рис. 3а). Форма гранул циркона изометричная без признаков проявления идиоморфизма, размеры находятся в пределах до 1 мкм. Источником расплава, из которого сформировались гранулы, послужил непосредственно сам реликтовый циркон;

2 – коэзит ($\sim 2400-2700$ °C [19]) присутствует в структуре капель лешательерита в виде идиоморфных удлинённых кристаллов размером до 2 мкм в поперечнике (рис. 3в). В совместной системе с вмещающим коэзит лешательеритом, коэзит согласно пространственным взаимоотношениям и фазовой диаграмме SiO_2 сформировался раньше стекла;

3 – лешательерит (~ 1700 °C) представлен множеством силикатных капель в структуре алюмосиликатного стекла (рис. 3б, е). В каплях в большом количестве присутствуют микрокристаллы коэзита и миндалин заполненные смектитом. Опираясь на морфологию и пространственные взаимоотношения лешательерита, коэзита и смектита последовательность их формирования следующая – коэзит – стекло SiO_2 – смектит;

4 – смектит (~ 1600 °C). Температура указана на основе экспериментальных данных, полученных Х. Наказава с коллегами путём закалки гидротермального продукта, в ходе которого получена ассоциация смектита и коэзита [21]. Его специфика нахождения в структуре капель лешательерита в виде изолированных миндалин говорит о том, что данный минерал образовался непосредственно из импактного расплава и не связан с постимпактной трансформацией минерального вещества импактита (рис. 3б, в);

5 – ильменит (~1300 °C [14]) часто встречается в структуре алюмосиликатной матрицы. Его разнообразие нахождения представлено тремя разновидностями: в виде небольших выделений вокруг зёрен титанита (рис. 3ё), в виде каймы вокруг титанита (рис. 3ж) и как обособление (рис. 3з). Первые два варианта встречаются наиболее часто по сравнению с последним. Зачастую вместо титанита встречается фаза TiO_2 , идентификация которой требует применения спектроскопии КРС;

6 – пироксен (авгит) (~1200 °C [15]) в большом количестве распространены в стекле алюмосиликатного состава (рис. 3И, Й, К). Характер их пространственного взаимоотношения указывает на явное формирование до солидификации (стеклования) окружающего алюмосиликатного расплава. В некоторых случаях игольчатая морфология авгита (рис. 3й) говорит о существенно более быстром росте кристаллов по сравнению с менее удлинёнными разновидностями (рис. 3и);

7 – алюмосиликатное стекло полевошпатового состава (~1200°C) занимает основную часть объёма жильного тела, имеет флюидальную текстуру и слабо развитую пористость (рис. 3а, е, з, и);

8 – пирротин (~1200 °C [22]) встречается относительно редко, имеет округлые очертания и в некоторых случаях обрамляется по периферии кристаллами пироксенов перпендикулярной ориентировки к поверхности пирротина (рис. 3к).

Помимо перечисленных минералов в смектитовых обособлениях среди алюмосиликатной стекловатой основной массы жильных стекол была обнаружена синимпактная шпинель, кристаллы которой имеют идиоморфный октаэдрический облик, размер кристаллов до 2 мкм (рис. 3г, д). По данным ЭДС шпинель характеризуется следующим составом (вес. %): MgO – 16.43%, Al_2O_3 – 60.9%, SiO_2 – 8.4%, FeO – 16.9%. При этом, точная диагностика разновидности шпинели затруднительна в связи с малыми размерами кристаллов и вероятным искажением состава за счет возможного частичного вклада окружающей матрицы. Принимая во внимание, что диапазон температур шпинели на фазовой диаграмме [20] довольно широк, на данный момент определить ее положение в последовательности минералообразования не представляется возможным.

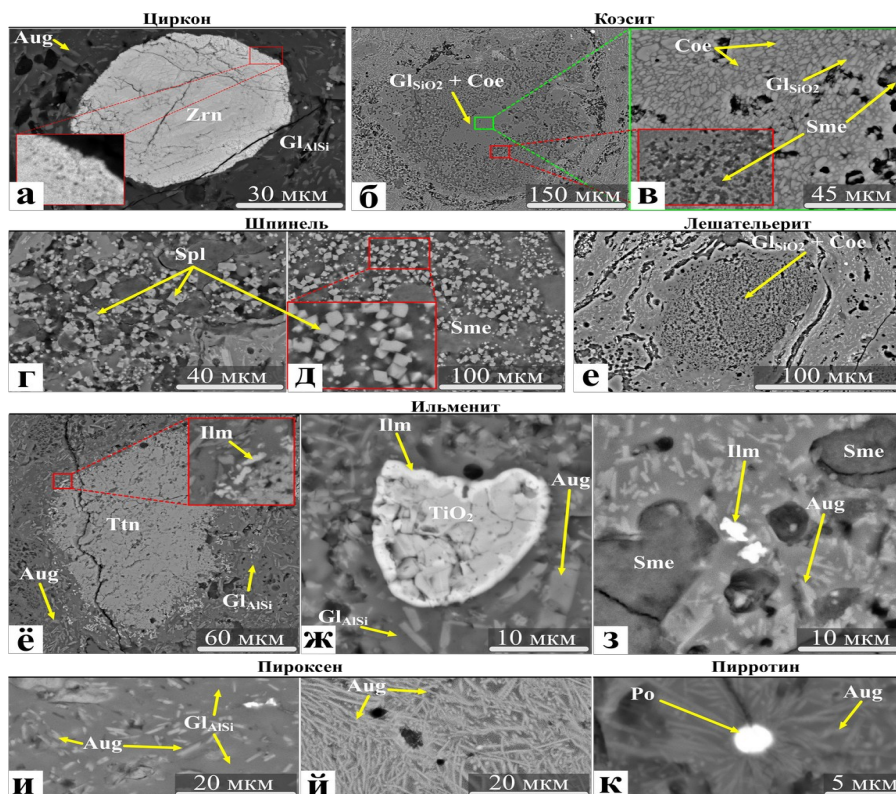


Рисунок 3 - Минералы и стёкла расплавного парагенезиса жильных расплавных импактитов Карской астроблемы по данным СЭМ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.58.3>

Примечание: Gl_{SiAl} – алюмосиликатное стекло полевошпатового состава; Gl_{SiO_2} – силикатное стекло (лешательерит); Sme – смектит; Po – пирротин; Spl – шпинель; Coe – коэзит; Aug – авгит; Ttn – титанит; Ilm – ильменит; Zrn – циркон

Заключение

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

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

Анализ морфологии и пространственных взаимоотношений минеральных фаз и референтных температур плавления минералов позволил установить последовательность минералообразования для расплавных импактитов Карской астроблемы:

- 1) в массивных телах: лешательерит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевой шпат;
- 2) в жильных телах: циркон – коэсит – лешательерит – смектит – ильменит – пироксен – алюмосиликатное стекло – пирротин;
- 3) в бомбах: лешательерит – пироксен – алюмосиликатное стекло – полевой шпат.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90065.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.М. Тропникову, С.И. Исаенко, Ю.С. Симаковой, М.Ф. Самотолковой за помощь в аналитических работах. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 20-35-90065, аналитические исследования выполнены в ЦКП «Геонаука», финансируемого из средств финансирования ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

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 № 20-35-90065.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to E.M. Tropnikov, S.I. Isaenko, Y.S. Simakova, and M.F. Samotolkova for assistance in analytical work. This work was supported by the RFBR project No. 20-35-90065; analytical studies were carried out at the "Geoscience" Centre funded by the IG FRC Komi Scientific Centre of the Ural RAS Department.

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. Trieloff M. The Age of the Kara Impact Structure, Russia / M. Trieloff, A. Deutsch, E.K. Jessberger // *Meteoritics & Planetary Science*. — 1998. — 33. — p. 361-372.
2. Stöffler D. Shock Metamorphism of Planetary Silicate Rocks and Sediments: Proposal for an Updated Classification System / D. Stöffler, C. Hamann, K. Metzler // *Meteoritics & Planetary Science*. — 2018. — 53. — p. 5-49.
3. Вишневецкий С.А. Астроблемы / С.А. Вишневецкий — Новосибирск: Нонпарель, 2007. — 288 с.
4. Фельдман В.И. Импактитогенез / В.И. Фельдман, Л.И. Глазовская — Москва: КДУ, 2018. — 154 с.
5. Езерский В.А. Гипербарические полиморфы, возникшие при ударном преобразовании углей / В.А. Езерский // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. — 1986. — CXV, №1. — с. 26-33.
6. Shumilova T.G. Karite – Diamond Fossil: a New Type of Natural Diamond / T.G. Shumilova, V.V. Ulyashev, V.A. Kazakov, S.I. Isaenko, E.A. Vasil'ev, S.A. Svetov, Y. Chazhengina, N.S. Kovalchuk // *Geoscience Frontiers*. — 2020. — Volume 11. Issue 4.
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*. — 1990. — Л. — с. 55-96.
8. Мащак М.С. Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя. Сб. ст. / М.С. Мащак. Под ред. В.Л. Масайтис. — Л.: Наука, 1990. — 191 с.
9. Мальков Б.А. Алмазоносные тагамиты Карской астроблемы / Б.А. Мальков, В.Л. Андреичев // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. — 2010. — 3.
10. Мальков Б.А.. Купроаурит в жильных тагамитах Карской астроблемы / Б.А. Мальков, В.Н. Филиппов // *Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы IV Международного минералогического семинара*; — Сыктывкар: Геопринт, 2006.
11. Shumilova T.G. Ultrahigh-pressure Liquefaction of an Impact Melt / T.G. Shumilova, S.I. Isaenko, A.A. Zubov, S.N. Shanina, Ye.M. Tropnikov, A.M. Askhabov // *Doklady Earth Sciences*. — 2018. — Vol. 480. Part 1. — p. 595-598.
12. Гурович Ж.Г. Водосодержащие стекла Карского взрывного кратера / Ж.Г. Гурович // *Проблемы геологии Тимано-Североуральского сегмента литосферы*; — Сыктывкар: Институт геологии Коми научного центра РАН, 1993. — с. 12.
13. Сазонова Л.В.. Связь внутреннего строения и условий залегания плавленых стекол Карского метеоритного кратера / Л.В. Сазонова, Н.Н. Никишина // *Космохимия метеоритов, Луны и планет*; — Киев: Наукова думка, 1980. — с. 45-55.
14. Habashi F. Ilmenite for Pigment and Metal Production / F. Habashi // *Interdiscip J Chem*. — 2016. — 1(1). — p. 28-33.
15. Thy P. Low-pressure Melting Studies of Basalt and Basaltic Andesite from the Southeast Greenland Continental Margin and the Origin of Dacites at Site 917 / P. Thy, C. Leshner Leshner, J.D. Mayfield // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, College Station, TX (Ocean Drilling Program)*. — 1999. — 163. — p. 1-18.

16. Zubov A.A. Comparative Characteristics of Structural-Textural, Mineralogical and Petrochemical Features of Melt Rock Impactites of the Kara Astrobleme. Preliminary Data (Pay-Khoy, Russia) / A.A. Zubov, T.G. Shumilova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — 906. — p. 102-108.
17. Sobolev R.N. Experimental Investigation of the Melting of Minerals and Rocks / R.N. Sobolev, V.V. Mal'tsev, E.A. Volkova // Russian Metallurgy (Metally). — 2021. — 2. — p. 102-108.
18. Nakamori F. Mechanical and Thermal Properties of ZrSiO₄ / F. Nakamori, Y. Ohishi, H. Muta, K. Kurosaki, K. Fukumoto, S. Yamanaka // Journal of Nuclear Science and Technology. — 2017. — 54:11. — p. 1267-1273.
19. Kayama M. Lunar and Martian Silica / M. Kayama, H. Nagaoka, T. Niihara // Minerals. — 2018. — Vol. 8. — p. 267.
20. Simon S. Multiple Shallow Crustal Origins for Spinel-Bearing Lithologies on the Moon: A Perspective From the Luna 20 Mission / S. Simon, C. Shearer, S. Haggerty, D. Moriarty, N. Petro, J. Papike, Z. Vaci // Journal of Geophysical Research: Planets. — 2022. — 127.
21. Nakazawa H. Crystal Synthesis of Smectite Applying Very High Pressure and Temperature / H. Nakazawa, H. Yamada, T. Fujita // Applied Clay Science. — 1992. — 6. — p. 395-401.
22. Ribbe P.H. Mineralogical Society of America Short Course Notes. Volume 1: Sulfide Mineralogy / P.H. Ribbe — Virginia: Mineralogical Society of America, 1974. — 301 p.
23. Shumilova T.G. Mysterious Long-living Ultrahigh Pressure or Secondary Impact Crisis / T.G. Shumilova, A.A. Zubov, S.I. Isaenko, I.A. Karateev, A.L. Vasiliev // Scientific Reports. — 2020. — 10:2591.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Trieloff M. The Age of the Kara Impact Structure, Russia / M. Trieloff, A. Deutsch, E.K. Jessberger // Meteoritics & Planetary Science. — 1998. — 33. — p. 361-372.
2. Stöffler D. Shock Metamorphism of Planetary Silicate Rocks and Sediments: Proposal for an Updated Classification System / D. Stöffler, C. Hamann, K. Metzler // Meteoritics & Planetary Science. — 2018. — 53. — p. 5-49.
3. Vishnevskij S.A. Astroblemy [Astroblems] / S.A. Vishnevskij — Novosibirsk: Nonparel', 2007. — 288 p. [in Russian]
4. Fel'dman V.I. Impaktitogenez [Impactitogenesis] / V.I. Fel'dman, L.I. Glazovskaja — Moskva: KDU, 2018. — 154 p. [in Russian]
5. Ezerskij V.A. Giperbaricheskie polimorfy, vznikshie pri udarnom preobrazovanii uglej [Hyperbaric Polymorphs Resulting from Impact Transformation of Coals] / V.A. Ezerskij // Notes of the All-Union Mineralogical Society. — 1986. — CXV, №1. — p. 26-33. [in Russian]
6. Shumilova T.G. Karite – Diamond Fossil: a New Type of Natural Diamond / T.G. Shumilova, V.V. Ulyashev, V.A. Kazakov, S.I. Isaenko, E.A. Vasil'ev, S.A. Svetov, Y. Chazhengina, N.S. Kovalchuk // Geoscience Frontiers. — 2020. — Volume 11. Issue 4.
7. Selivanovskaya T.V. Impaktny'e brekchii i impaktity' Karskoj i Ust'-Karskoj astrobleme [Impact Breccias and Impactites of the Kara and Ust-Kara Astroblemes] / T.V. Selivanovskaya, M.S. Mashhak, V.L. Masajtis – L.: Nauka, 1990. — 191 p. [in Russian]
8. Mashchak M.S. Impaktnye krateri na rubezhe mezozoya i kajnozoya. Sb. st. [Impact Craters at the Turn of the Mesozoic and Cenozoic. Digest of articles] / M.S. Mashchak. Ed. by V.L. Masajtis. — L.: Nauka, 1990. — 191 p. [in Russian]
9. Mal'kov B.A. Almazonosnye tagamity Karskoj astroblemy [Diamond-bearing Tagamites of the Kara Astrobleme] / B.A. Mal'kov, V.L. Andreichev // Bulletin of the Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. — 2010. — 3. [in Russian]
10. Mal'kov B.A.. Kuproaurid v zhil'nyh tagamitah Karskoj astroblemy [Cuproauride in the Vein Tagamites of the Kara Astrobleme] / B.A. Mal'kov, V.N. Filippov // Theory, History, Philosophy and Practice of Mineralogy: Proceedings of the IV International Mineralogical Seminar; — Syktyvkar: Geoprint, 2006. [in Russian]
11. Shumilova T.G. Ultrahigh-pressure Liquefaction of an Impact Melt / T.G. Shumilova, S.I. Isaenko, A.A. Zubov, S.N. Shanina, Ye.M. Tropnikov, A.M. Askhabov // Doklady Earth Sciences. — 2018. — Vol. 480. Part 1. — p. 595-598.
12. Gurovich Zh.G. Vododerzhazhaschie stekla Karskogo vzryvnogo kratera [Hydrous Glasses of the Kara Explosion Crater] / Zh.G. Gurovich // Problemy geologii Timano-Severoural'skogo segmenta litosfery [Problems of Geology of the Timan-Severoural'sk Segment of the Lithosphere. Institute of Geology, Komi Science Center RAS]; — Syktyvkar: Institute of Geology of the Komi Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 1993. — p. 12. [in Russian]
13. Sazonova L.V.. Svjaz' vnutrennego stroeniya i uslovij zaleganiya plavlennyh stekol Karskogo meteoritnogo kratera [Relationship between the Internal Structure and Conditions of Occurrence of Fused Glasses of the Kara Meteorite Crater] / L.V. Sazonova, N.N. Nikishina // Cosmochemistry of Meteorites, Moon and Planets; — Kiev: Naukova dumka, 1980. — p. 45-55. [in Russian]
14. Habashi F. Ilmenite for Pigment and Metal Production / F. Habashi // Interdiscip J Chem. — 2016. — 1(1). — p. 28-33.
15. Thy P. Low-pressure Melting Studies of Basalt and Basaltic Andesite from the Southeast Greenland Continental Margin and the Origin of Dacites at Site 917 / P. Thy, C. Leshner Leshner, J.D. Mayfield // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, College Station, TX (Ocean Drilling Program). — 1999. — 163. — p. 1-18.
16. Zubov A.A. Comparative Characteristics of Structural-Textural, Mineralogical and Petrochemical Features of Melt Rock Impactites of the Kara Astrobleme. Preliminary Data (Pay-Khoy, Russia) / A.A. Zubov, T.G. Shumilova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — 906. — p. 102-108.
17. Sobolev R.N. Experimental Investigation of the Melting of Minerals and Rocks / R.N. Sobolev, V.V. Mal'tsev, E.A. Volkova // Russian Metallurgy (Metally). — 2021. — 2. — p. 102-108.
18. Nakamori F. Mechanical and Thermal Properties of ZrSiO₄ / F. Nakamori, Y. Ohishi, H. Muta, K. Kurosaki, K. Fukumoto, S. Yamanaka // Journal of Nuclear Science and Technology. — 2017. — 54:11. — p. 1267-1273.

19. Kayama M. Lunar and Martian Silica / M. Kayama, H. Nagaoka, T. Niihara // Minerals. — 2018. — Vol. 8. — p. 267.
20. Simon S. Multiple Shallow Crustal Origins for Spinel-Bearing Lithologies on the Moon: A Perspective From the Luna 20 Mission / S. Simon, C. Shearer, S. Haggerty, D. Moriarty, N. Petro, J. Papike, Z. Vaci // Journal of Geophysical Research: Planets. — 2022. — 127.
21. Nakazawa H. Crystal Synthesis of Smectite Applying Very High Pressure and Temperature / H. Nakazawa, H. Yamada, T. Fujita // Applied Clay Science. — 1992. — 6. — p. 395-401.
22. Ribbe P.H. Mineralogical Society of America Short Course Notes. Volume 1: Sulfide Mineralogy / P.H. Ribbe — Virginia: Mineralogical Society of America, 1974. — 301 p.
23. Shumilova T.G. Mysterious Long-living Ultrahigh Pressure or Secondary Impact Crisis / T.G. Shumilova, A.A. Zubov, S.I. Isaenko, I.A. Karateev, A.L. Vasiliev // Scientific Reports. — 2020. — 10:2591.