

Использование расплавных и многофазных включений в минералах для исследования интрузивных пород (на примере карбонатитов и ультрамафитов Маймеча-Котуйской провинции)

Чайка И.Ф.^{1,2}, Каменецкий В.С.¹, Владыкин Н.В.³, Васильев Ю.Р.², Малич К.Н.⁴, Зеленский М.Е.²

¹ Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, ivanlab211@gmail.com

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск

⁴ Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В статье освещаются методические аспекты исследования расплавных и многофазных включений в минералах интрузивных горных пород, включая экспериментальный прогрев с быстрой за-
калкой. Предлагается обобщенная схема использования этого подхода для изучения петрологии интрузив-
ных пород. Приводятся два примера получения новых сведений о формировании некоторых интрузивных
горных пород трех комплексов Маймеча-Котуйской провинции (Гули, Бор-Урях и Одихинча) с помощью
этого метода. В первом примере рассмотрены апатит-магнетитовые карбонатиты Гулинского комплекса.
Для них, на основании исследования расплавных и многофазных включений в апатите и магнетите, показано,
что эти карбонатиты формировались при дифференциации богатого К и Na кальциокарбонатитового рас-
плава. При этом составы наиболее щелочных дифференциатов пересекают перитектику «кальцит-ниеререйт»
и эволюционируют вплоть до натрокарбонатитов типа Олдоиньо Ленгаи, таким образом заполняя пробел
в ряду дифференциации ранее известных природных карбонатитовых расплавов. Во втором примере, на осно-
вании исследования первичных и вторичных включений в минералах ультрамафитов рассматриваемых ком-
плексов, показано, что высокодифференцированные щелочные силикатные и карбонатные расплавы, а также
несмешиваемые с ними сульфидные фракции были распространены в интеркумуляусной среде при формировании
ультрамафитов рассмотренных комплексов. Эти интеркумуляусные жидкости были обогащены рудообразую-
щими элементами (РЗЭ, U, Th, Cu, Ni и, возможно, Ru и Ir), что подтверждает предположение о накоплении
этих элементов в ходе фракционирования щелочных магм и свидетельствует о потенциально важной роли
процесса пост-кумуляусной инфильтрации в генезисе рудной минерализации, связанной с ультрамафитами
щелочно-ультраосновных комплексов и сопутствующими щелочными породами.

Ключевые слова: расплавные включения, Маймеча-Котуйская провинция, щелочно-ультраосновные
комплексы, карбонатиты, ультрамафиты.

Using melt and polyphase inclusions hosted by rock-forming minerals in studying plutonic rocks (examples of the carbonatites and ultramafics of the Maymecha-Kotuy province, Siberia)

Chayka I.F.^{1,2}, Kamenetsky V.S.¹, Vladyskin N.V.³, Vasil'ev Yu.R.², Malitch K.N.⁴, Zelenski M.E.²

¹ D.S. Korzhinsky Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, Russia; ivanlab211@gmail.com

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

³ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴ A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UrB RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Discussed are methodological aspects of the study of melt and multiphase inclusions hosted by
minerals of plutonic rocks. A generalized scheme for application of such an approach in petrological studies is
proposed. Two examples, showing an efficiency of this approach in obtaining novel insights into the origin of some
intrusive rocks of the three complexes of the Maymecha-Kotuy province (namely Guli, Bor-Uryakh and Odikhincha)
are given. In the first example, apatite-magnetite carbonatites of the Guli complex are considered. Based on the
study of the apatite- and magnetite-hosted melt and multiphase inclusions, it is shown that these carbonatites resulted
from the differentiation of a K- and Na-rich calciocarbonatite melt. Furthermore, the compositions of the most

alkaline differentiates cross the “calcite-nyerereite” peritectic and evolve up to natrocarbonatites of the Oldoinyo Lengai type, filling the compositional gap between the previously known natural carbonatitic melts and the latter. The second example, based on the study of primary and secondary inclusions in the ultramafic minerals of the considered complexes, shows that highly differentiated alkaline silicate and carbonate melts, as well as sulfide fractions immiscible with them, were common in the intercumulus during the formation of the ultramafics from the considered complexes. These intercumulus liquids were enriched in ore-forming elements (REE, U, Th, Cu, Ni, and possibly Ru and Ir), supporting the idea that these elements accumulate in fractionating alkaline melt and indicating the potentially important role of the post-cumulus infiltration process in the origin of mineralization linked with ultramafic rocks of alkaline-ultrabasic complexes and associated alkaline rocks.

Keywords: melt inclusions, Maymecha-Kotuy province, alkali-ultramafic complexes, carbonatites, ultramafics.

Введение

Несмотря на то, что подход, основанный на исследовании включений минералообразующих сред в минералах, широко используется в петрологии вулканических пород и геологии гидротермальных рудных месторождений, его применение в петрологии интрузивных пород было гораздо более ограниченным (Kesler et al., 2013). Тем не менее, известные авторам примеры подобных исследований, проведенных для таких сложных и дискуссионных объектов как гранитные пегматиты (Kamenetsky et al., 2002; Смирнов и др. 2017), хромититы (Spandler et al., 2005; Пушкарев и др., 2015) и интрузивные карбонатиты (Kogarko et al., 1991; Chen et al., 2013) позволили получить принципиально новые данные о генезисе этих пород и ассоциаций. В данной работе мы, на примере двух исследований щелочно-ультраосновных комплексов Маймеча-Котуйской провинции, более подробно изложенных в (Chayka et al., 2021; Chayka et al., 2023 – в печати), рассматриваем методику работы с расплавленными и многофазными включениями в интрузивных породах, еще раз показываем

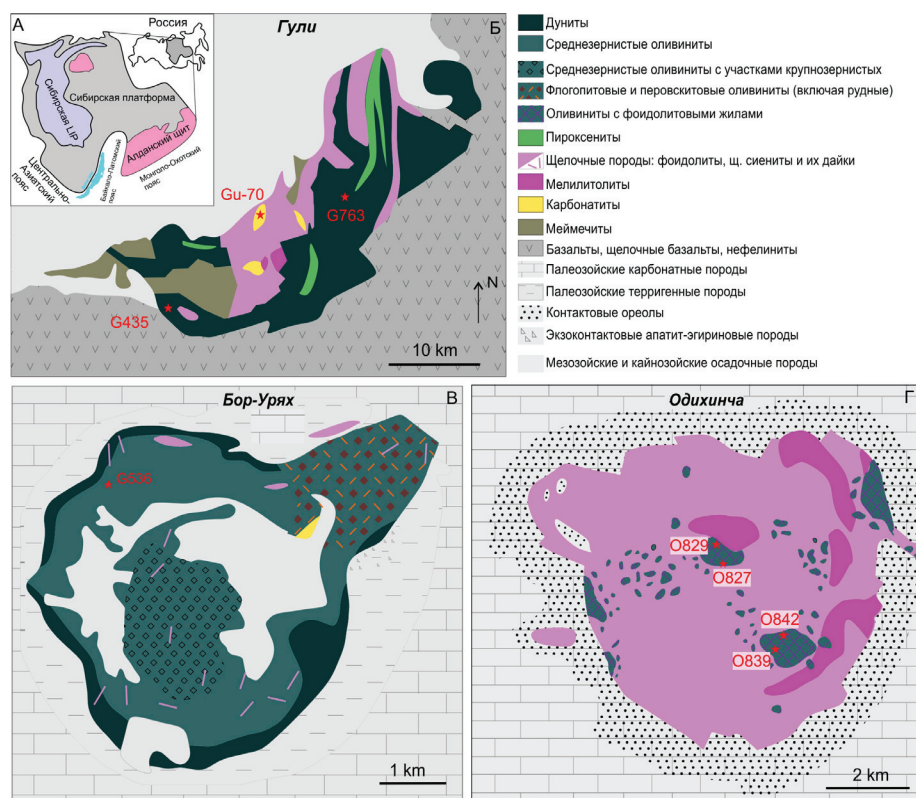


Рис. 1. Регионально-геологическая позиция Маймеча-Котуйского района (А) и геологические карты рассмотренных комплексов (Б, В, Г) по (Васильев и Золотухин, 1975; Егоров, 1991) с отмеченными местами отбора образцов.

Fig. 1. Regional setting of the Maymecha-Kotuy region (A) and geological maps of the considered complexes (Б, В, Г) after (Vasil'ev and Zolotukhin, 1975; Egorov, 1991) with the sampling locations marked.

эффективность этого подхода и предлагаем обобщенную схему его применения для интрузивных пород. Рассмотренные объекты включают в себя комплексы Гули, Бор-Урях и Одихинча, являющиеся одними из крупнейших щелочно-ультраосновных плутонов Сибирской изверженной провинции (рис. 1). Набор пород, характерных для этих комплексов, включает ультрамафиты (дуниты, оливиниты и пироксениты), мелилитолиты, щелочные фельдшпатоидные породы, щелочные сиениты, и карбонатиты (Васильев и Золотухин, 1975; Егоров, 1991).

Методика исследований

Поскольку изучение включений, даже в одном образце горной породы, является трудоемким исследованием, начальной задачей был отбор представительных образцов из имеющихся коллекций. Критериями отбора являлись: (1) представительность образца для пород комплекса в целом с точки зрения петрографии, (2) низкая степень вторичных изменений горной породы, (3) хорошо проявленные взаимоотношения минералов и структурно-текстурные признаки и (4) собственно наличие многофазных включений в первичных пороодообразующих и типичных акцессорных минералах. Далее следовало изучение фазового состава включений и состава минералов-хозяев с использованием электронной микроскопии (SEM EDS, фотографирование в режиме BSE), электронно-зондового

рентгеноспектрального микроанализа (EPMA) и Рамановской спектроскопии. По результатам этих исследований, с учетом времени формирования включения относительно минерала-хозяина (первичность/вторичность) и позиции минерала-хозяина в парагенетической схеме породы, можно было сделать первые выводы о качественном составе среды во время образования или преобразования минерала и в целом на определенном этапе формирования породы.

Однако, более полное представление об этой среде, ее фазовом и валовом составе, дает ее экспериментальная реконструкция при предполагаемой температуре и давлении захвата включения. Для этого был использован метод экспериментального прогрева включений до предполагаемой температуры захвата с последующей быстрой закалкой, обеспечивающей гомогенизацию образовавшегося во включении расплава. Целевая температура в общем случае определяется либо по данным прогрева и гомогенизации включений под наблюдением, либо исходя из минеральной термометрии и ранее опубликованных данных. Экспериментальная установка (рис. 2) представляет собой трубчатую печь: сапфировая трубка обвита нагревателем из термостойкого сплава FeCrAl и погружена в корпус, состоящий из термостойкого наполни-

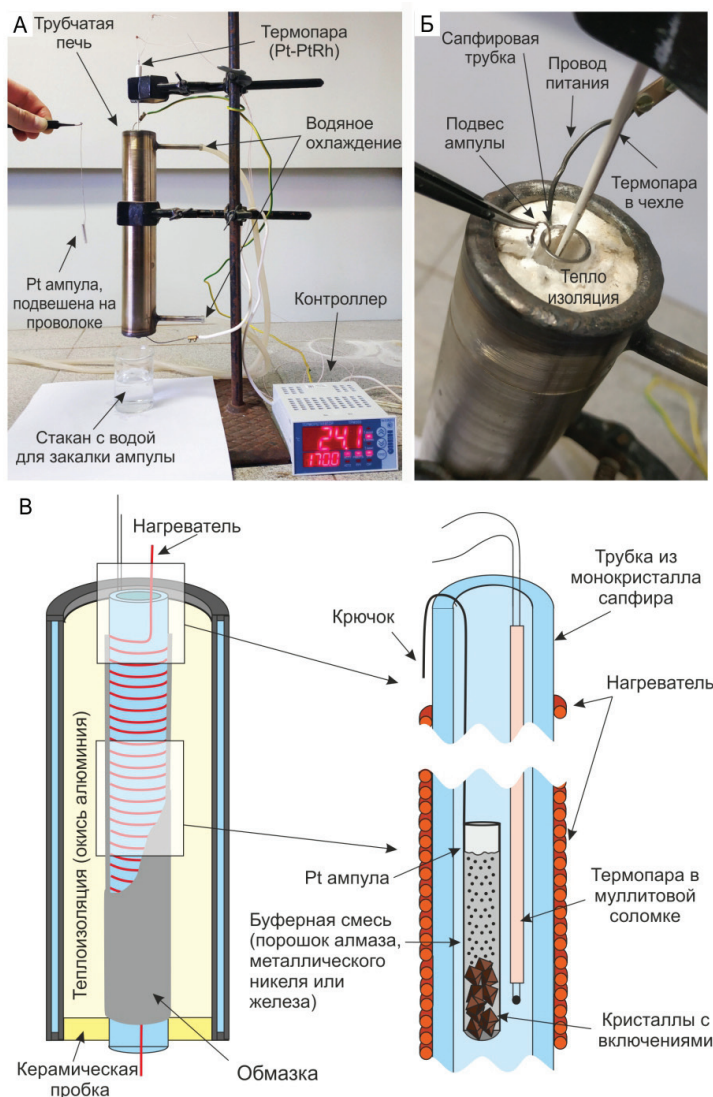


Рис. 2. Фотографии (А, Б) и схема строения (В) трубчатой печи для прогрева включений с быстрой закалкой

Fig. 2. Photographs (A, B) and inner design of the (B) of the tube furnace for the heating-quenching experiments

теля (окись алюминия) и двухстенного стального тубуса, выполняющего роль внешней оболочки установки. Предусмотрена возможность водяного охлаждения. Зерна для эксперимента помещаются в платиновую ампулу с возможностью задания окислительно-восстановительного буфера путем добавления углерода (алмазный порошок, буфер CCO), никеля (буфер NNO), железа (буферы IW и WM). Температуры прогрева варьируют от комнатной до 1400°C. Быстрая закалка обеспечивается ручным сбросом подвешенной на проволоке ампулы в воду, скорость остывания ампулы диаметром 3 мм до 100°C составляет менее 2 с.

После эксперимента зерна минерала с включениями монтируются в эпоксидную шайбу, включения выводятся и изучаются методами SEM-EDS, EPMA для определения их фазового состава и химического состава получившихся расплавов. Кроме этого, для получения данных о примесях и летучих в составе расплавов используются методы масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором (LA-ICP-MS), и вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS).

Вся пробоподготовка, связанная с выведением на поверхность как прогретых, так и непрогретых включений, проводится с использованием безводных смазочных компонентов для предотвращения растворения водорастворимых минералов. Кроме этого, препараты с наиболее легко растворимыми фазами (сульфаты и хлориды щелочных металлов) хранились под слоем керосина либо в эксикаторе.

После определения фазового состава прогретых включений и валового состава полученных и закаленных расплавов, необходимо правильно интерпретировать полученные данные, так как в отличие от включений в фенокристаллах в вулканических породах, включения в минералах интрузивных пород, далеко не всегда захватывают только расплав. Наконец, полученные в ходе исследования включений данные, необходимо сопоставить с минералого-петрографическими и геологическими сведениями и интерпретировать их только в общем контексте образования данных пород и комплексов в целом.

Пример 1: карбонатит Гулинского комплекса

Был исследован образец апатит-магнетитового карбонатита Гулинского комплекса (обр. Gu-70). В нем апатит-магнетитовые скопления с подчиненным количеством оливина образуют линейные текстуры в матрице преимущественно кальцитового состава (рис. 3 А, Б). Многофазные включения

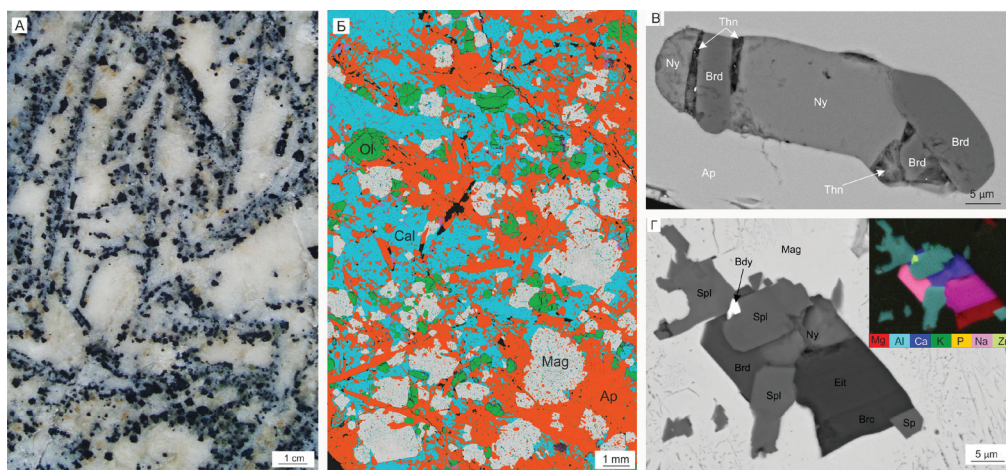


Рис. 3. Структурно-текстурные характеристики (А, Б) апатит-магнетитового карбонатита Гулинского комплекса и фазовый состав непрогретых включений в апатите (В) и магнетите (Г) из этого карбонатита. (А) макрофото образца, (Б) фазовая ЭДС-карта. Сокращения: Ol – оливин, Cal – кальцит, Mag – магнетит, Ap – апатит, Ny – ньеререйт $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$, Brd – брадлейит $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)\text{PO}_4$, Thn – тенардит Na_2SO_4 , Eit – эйтелит $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$, Spl – шпинель, Bdy – бадделейит, Brc – брусит.

Fig. 3. Textural features (A, B) of the apatite-magnetite carbonatite from the Guli complex and phase composition of apatite- and magnetite-hosted unheated inclusions (B, Г) from this carbonatite. Abbreviations: Ol – olivine, Cal – calcite, Mag – magnetite, Ap – apatite, Ny – nyerereite $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$, Brd – bradleyite $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)\text{PO}_4$, Thn – thenardite Na_2SO_4 , Eit – eitelite $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$, Spl – spinel, Bdy – baddeleyite, Brc – brucite.

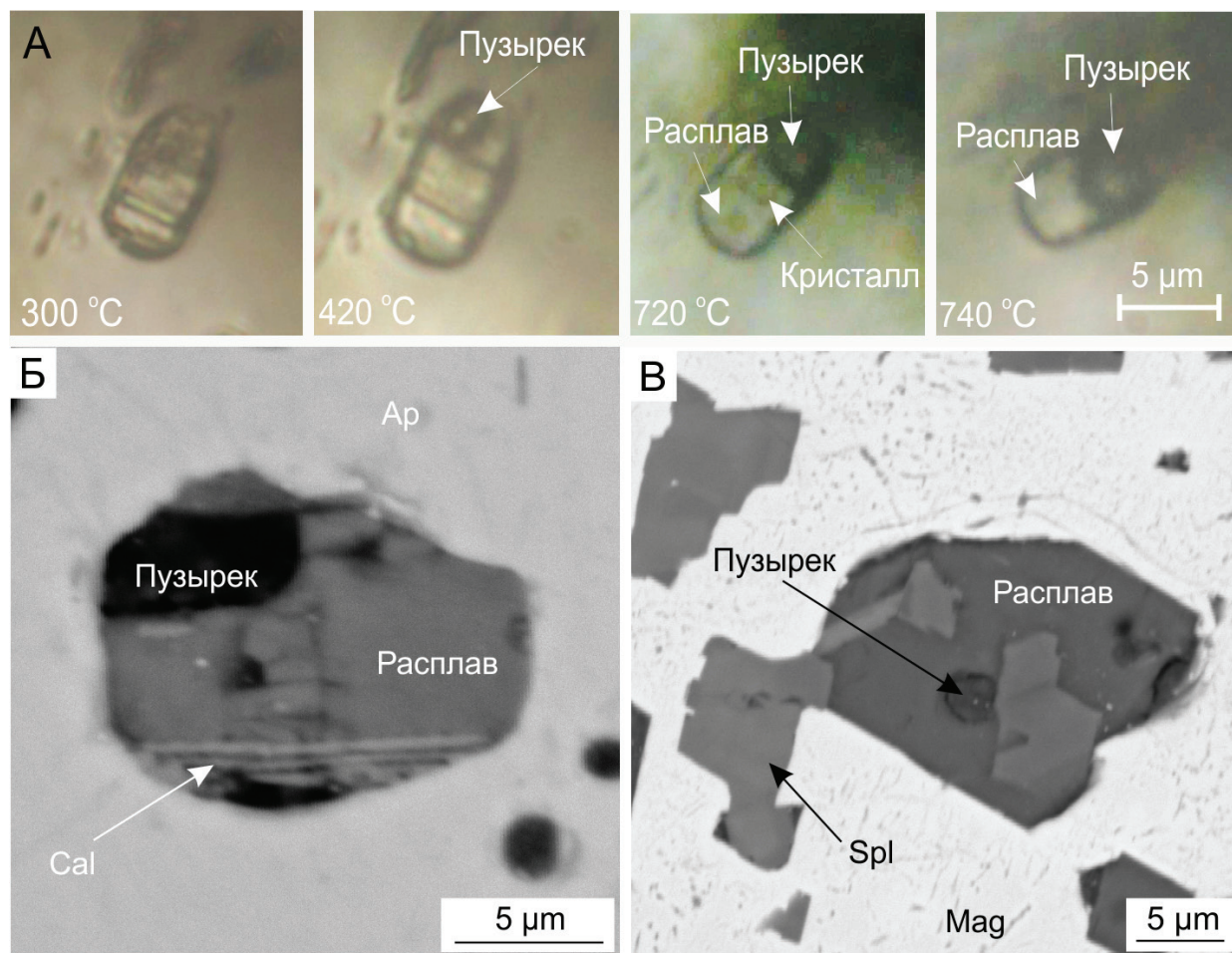


Рис. 4. Оптические фотографии включения в апатите при наблюдаемом прогреве (А), BSE-фотографии прогретых, закаленных и вскрытых включений в апатите (Б) и магнетите (В) карбоната Гулинского комплекса.
Fig. 4. Optical photomicrographs of an apatite-hosted inclusion at the observed heating experiment (A), BSE-photos of the heated-quenched and exposed inclusions hosted by apatite (B) and magnetite (B) from the Guli carbonate.

ния встречаются в большом количестве в крупных идиоморфных кристаллах апатита (апатит-1) и магнетите. В более мелких шестоватых кристалликах апатита (апатит-2), гипидиоморфных по отношению к магнетиту, включений нет. Морфология магнетита и ориентировка в нем структур распада (шпинель) показывает, что включения скорее всего захватились на этапе позднего «слипания» более мелких кристалликов магнетита. Таким образом, изученные включения в апатите образовывались на более раннем этапе (предположительно, ликвидусной кристаллизации), чем в магнетите (посткумулусный этап).

Включения в апатите состоят преимущественно из щелочных карбонатов с подчиненным количеством сульфатов и фосфатов; пропорции минералов достаточно выдержаны от включения к включению (рис. 3 В). Включения в магнетите состоят из шпинели, брусита, нередко доломита и щелочной ассоциации, подобной включениям в апатите (рис. 3 Г). Прогрев под наблюдением включений в апатите показал, что их гомогенизация в расплав и газовый пузырек происходит при 720–750 °С, тугоплавких фаз не остается (рис. 4 А, Б). Ступенчатый прогрев включений в магнетите показал, что при Т 600–700 °С происходит частичная гомогенизация, а шпинель вообще не претерпевает плавления вплоть до 1000 °С (рис. 4 В). Составы полученных карбонатных расплавов образуют тренд от более кальциевых к более щелочным (рис. 5), заполняющий промежуток между субщелочными кальциевыми включениями в минералах карбонатитового вулкана Керимаси (Guzmicz et al., 2011) и лавами Олдоиньо Ленгаи. Таким образом, сделан вывод, что включения в апатите являются захваченным расплавом, а в магнетите – представляли смесь из расплава и кристаллов шпинели.

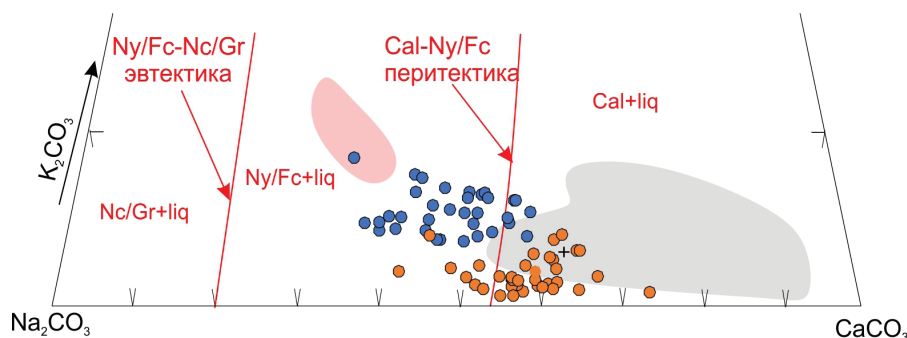


Рис. 5. Составы гомогенных карбонатных агрегатов (экспериментально-полученных расплавов) из включений в апатите (оранжевые маркеры) и магнетите (синие маркеры) из карбонатита Гулинского комплекса на диаграмме Na_2CO_3 - K_2CO_3 - CaCO_3 с границами фазовых равновесий (по Weidendorfer et al., 2017). Сокращения: Fc – фейрчайлдит $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$, Gr – грегорит $(\text{Na},\text{K})_2\text{CO}_3$, liq – жидкость (расплав). Розовое поле – натрокарбонатиты Олдоиньо Ленгаи (данные GeoRoc), серое поле – составы щелочно-карбонатных включений в минералах карбонатитов Керимаси (Guzmicz et al., 2011).

Fig. 5. Compositions of the homogenous carbonate aggregates (quenched experimentally-obtained melts) from inclusions hosted by apatite (orange points) and magnetite (blue points) from the Guli carbonatite plotted on the Na_2CO_3 - K_2CO_3 - CaCO_3 ternary diagram with phase equilibria boundaries (after Weidendorfer et al., 2017). Abbreviations: Fc – fairchildite, Gr – gregoryite, Liq- liquid (melt). Pink field – Oldoinyo Lengai carbonatites (GeoRoc data), grey field – compositions of alkali-carbonate inclusions hosted by minerals of the Kerimasi carbonatites (Guzmicz et al., 2011).

Генетические построения и сравнение с различными экспериментальными и природными данными (Chayka et al., 2021) позволили сделать вывод о том, что карбонатиты Гулинского комплекса образовались из субщелочного кальциокарбонатитового расплава, который в ходе кристаллизации эволюционировал с накоплением щелочей и переходом перитектики «кальцит-ниеререит» и, в итоге, почти достиг составов натрокарбонатитов Олдоиньо Ленгаи (рис. 5). Преобразование исходной K-Na-содержащей ассоциации породы в кальциокарбонатит произошло в результате либо аутометасоматоза и выноса щелочей на позднемагматическом этапе (фенитизация), либо за счет низкотемпературного выщелачивания.

Пример 2: ультрамафиты комплексов Гули, Одихинча и Бор-Урах

Были исследованы дуниты Гулинского комплекса (рис. 6 А), оливиниты и рудные перовскит-магнетитовые оливиниты комплекса Одихинча (рис. 6 Б) и флогопит-пироксеновые оливиниты комплекса Бор-Урах. В дунитах Гули оливин содержит первичные (рис. 6 В) и вторичные включения (рис. 6 Г), в остальных ультрамафитах – только вторичные (рис. 6 Д). Хромит дунитов Гули содержит включения, интерпретированные как предположительно первичные, однако данных о пространственном расположении их внутри зерен недостаточно, чтоб утверждать это наверняка. Магнетит и перовскит из оливинитов содержат первичные многофазные включения (рис. 6 Е).

Состав включений весьма контрастен. Включения в оливине Гулинских дунитов состоят из мафических силикатов и щелочного стекла (рис. 7 А), в хромите – из нефелина, флогопита, апатита, перовскита, часто содержат Cu-Ni-Fe сульфиды, в которых систематически отмечаются микровключения минералов Ir и Ru (рис. 7 Б, В). Включения в минералах оливинитов Одихинчи и Бор-Уряха имеют силикатно-карбонатный состав (рис. 7 Г–Е). Среди силикатов преобладают флогопит или тетраферрифлогопит, гумит/клиногумит, щелочные амфиболы, среди карбонатов – шортит, ниеререит и брадлеит. Кроме этого, встречаются щелочные сульфиды: джерфишерит и минералы ряда мурунскит-расвумит. Более подробно состав включений описан в (Chayka et al., 2023 – in press).

В ходе экспериментов по прогреву-закалке, включения в оливине из дунитов Гули гомогенизируются в стекло с пузырьком (1200°C) и сульфидными микроглобулами (рис. 7 Ж). Состав стекла соответствует меланефелиниту и нефелиниту (рис. 8 А). Прогрев включений в хромите из дунитов Гули (вплоть до 1300°C), как правило, не приводит к полной гомогенизации, остае-

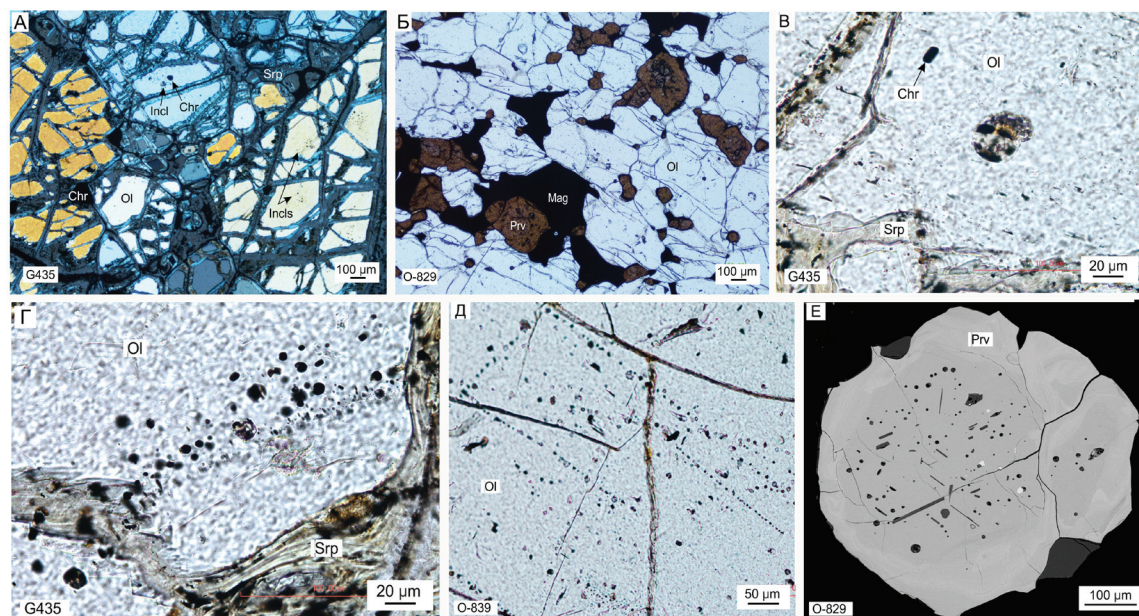


Рис. 6. Породообразующие минералы и включения в них в ультрамифитах Маймеча-Котуйской провинции. (А) дунит Гули (никколи X); (Б) перовскит-магнетитовый оливинит Одихинчи; (В) первичное включение в оливине, Гули; (Г) вторичные включений в оливине, Гули; (Д) вторичные включения в оливине, Одихинча; (Е) первичные зонально-ориентированные включения в перовските, Одихинча, BSE-фото.

Fig. 6. Rock-forming minerals and inclusions, hosted by them, from the ultramafics of the Maymecha-Kotuy province. (A) Guli dunite (analyzer in), (B) perovskite-magnetite olivinite, Odikhincha, (B) primary olivine-hosted inclusion, Guli dunite; (Г) secondary olivine-hosted inclusions, Guli dunite; (Д) - secondary olivine-hosted inclusions, Odikhincha olivinite; (E) – primary, zonally aligned, inclusions in perovskite, Odikhincha olivinite, BSE-photo.

ся нефелин. Состав стекол отвечает либо нефелиниту, либо соответствует смеси между нефелинитовым расплавом и гетерогенно захваченными нефелином и перовскитом. Прогрев включений в минералах оливинитов Одихинчи и Бор-Уряха приводит к их повсеместной декрепитации. Сохранившиеся включения представлены щелочно-карбонатитовым агрегатом (резко охлажденный расплав), часто с сульфидной глобулой (рис. 7 К, Л). В одном из включений наблюдалась силикатно-карбонатно-сульфидная несмесимость (рис. 7 М). Состав карбонатной составляющей соответствует щелочному карбонатиту, близкому к включениям, описанным в апатите и магнетите карбонатита Гулинского комплекса (см. выше) (рис. 8 Б).

Интерпретация полученных данных (Chayka et al., 2023 – in press) позволила предположить, что изученные включения, помимо нескольких первичных в оливине Гулинского дунита, представляют собой захваченные интеркумулусные расплавы и кристаллические фазы, заполнявшие интерстиции в ультрамифитовом прото-кумуляте. Эти расплавы были весьма дифференцированными (нефелинитовые и щелочно-карбонатитовые) и, по-видимому, отжимались из кумулята так, что в ряде случаев следов их присутствия почти не осталось. По данным зондовых анализов, в этих расплавах накапливалось существенное количество редких элементов, вплоть до околорудных концентраций: в нефелинитовых дифференциатах накапливались Th, U, Nb и Ta, карбонатитовых – легкие редкоземельные элементы (рис. 8 В), а сульфидно-карбонатная «эмульсия» содержала в пересчете на вал количества Cu и Ni, соответствующие таковым для рудных карбонатитов комплекса Палабора (рис. 8 Г). Таким образом, изучение включений в этом случае еще раз подтвердило, что в ходе дифференциации щелочно-ультраосновных расплавов, в дифференциатах накапливаются редкие рудообразующие элементы. Кроме того, факт обогащения ими интерстициальных расплавов при формировании ультрамифитов, даёт основание предполагать важную роль этих расплавов в образовании минерализации, связанной с жильными телами в ультрамифитах щелочно-ультраосновных комплексов (напр. перовскитовые руды комплекса Африканда, редкоэлементные руды комплекса Санг-Вэлли, Индия) (Sadiq et al., 2014; Kalashnikov et al., 2016).

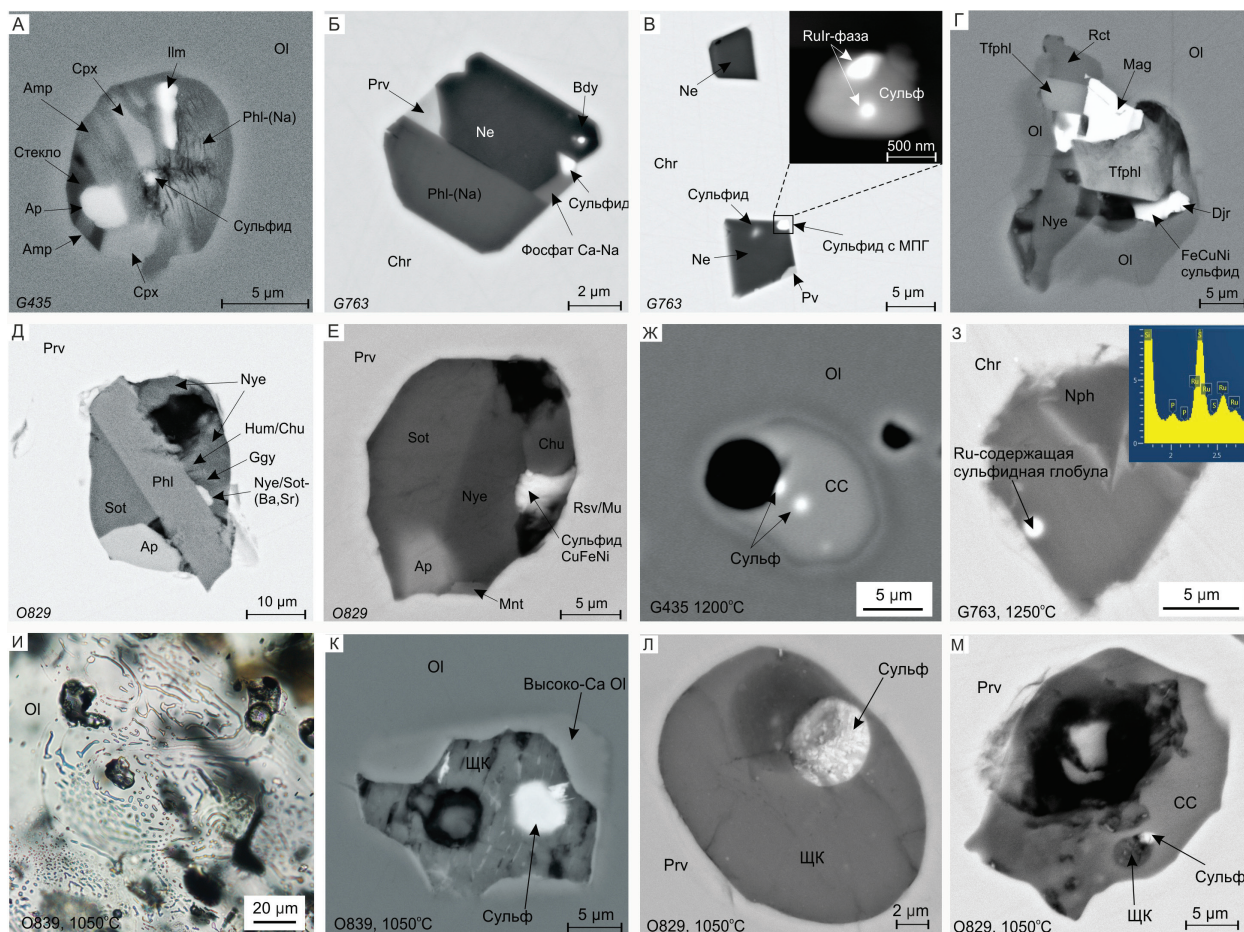


Рис. 7. Многофазные включения в минералах ультрамафитов Маймеча-Котуйской провинции до прогрева (А–Е) и после прогрева и закалки (Ж–М). (И) – фото в проходящем свете, остальные – BSE-фотографии. (А) первичное включение в оливине, дунит Гули, (Б, В) включения в хромите, дунит Гули; (Г) вторичное включение в оливине, оливинит Одихинчи; (Д, Е) первичные включения в перовските, оливинит Одихинчи. (Ж) включение в оливине, дунит Гули; (З) включение в хромите и ЭДС-спектр сульфидной глобулы, (И) массовая декрепитация включений в оливине, оливинит Одихинчи; (К) включение в оливине, оливинит Одихинчи; (Л, М) первичные включения в перовските, оливинит Одихинчи. Сокращения – см. предыдущие рисунки и Cpx – клинопироксен, Amp – Ca-Na амфибол, Phl-(Na) – высоко-Na флогопит, Ne – нефелин, Prv – перовскит, Chr – хромит, Tfphl – тетраферрифлогопит, Rct – рихтерит, Djr – джерфшерит $K_6(Fe,Cu,Ni)_{25}S_{26}Cl$, Sot – шортит $Na_2Ca_2(CO_3)_3$, Hum/Chu – минерал ряда гумит-клиногумит, Ggy – грегорит, Nye/Sot-(Ba,Sr) – Ba-Sr-содержащие шортит и ниеререйт, Rsv/Mu – минерал ряда расвумит-мурунскит $K_2(Cu,Fe)_4S_4 - KFe_2S_3$, ЩК – агрегат щелочных карбонатов, CC – силикатное стекло.

Fig. 7. Unheated (A–E) and heated-quenched (Ж–М) multiphase inclusions hosted by minerals of the Maymecha-Kotuy ultramafites. Panel (И) is an optical transmitted light photo, the rest are BSE-photos. (A) primary olivine-hosted inclusions, Guli dunite; (Б, В) – chromite-hosted inclusions, Guli dunite, (Г) – secondary olivine-hosted inclusion, Odikhinchina olivinite; (Д, Е) – primary perovskite-hosted inclusions, Odikhinchina olivinite, (Ж) – olivine-hosted inclusion, Guli dunite (З) – chromite-hosted inclusion and EDS-spectrum of the sulfide globule, Guli dunite (И) – ubiquitous decrepitation of the olivine-hosted inclusions, Odikhinchina olivinite; (К) – olivine-hosted inclusion, Odikhinchina olivinite, (Л, М) – perovskite-hosted inclusions, Odikhinchina olivinite. Abbreviations – see the previous figures and Cpx – clinopyroxene, Amp – Ca-Na amphibole, Phl-(Na) – high-Na phlogopite, Ne – nepheline, Prv – perovskite, Chr – chromite, Tfphl – tetraferriphlogopite, Rct – richterite, Djr – djerfisherite $K_6(Fe,Cu,Ni)_{25}S_{26}Cl$, Sot – shortite $Na_2Ca_2(CO_3)_3$, Hum/Chu – mineral of the gumite-clinogumite series, Ggy – gregoryite, Nye/Sot-(Ba,Sr) – Ba-Sr-containing nyerereite and shortite, Rsv/Mu – mineral of the rasvumite-murunskite series $K_2(Cu,Fe)_4S_4 - KFe_2S_3$, ЩК – alkaline carbonate aggregate, CC – silicate glass.

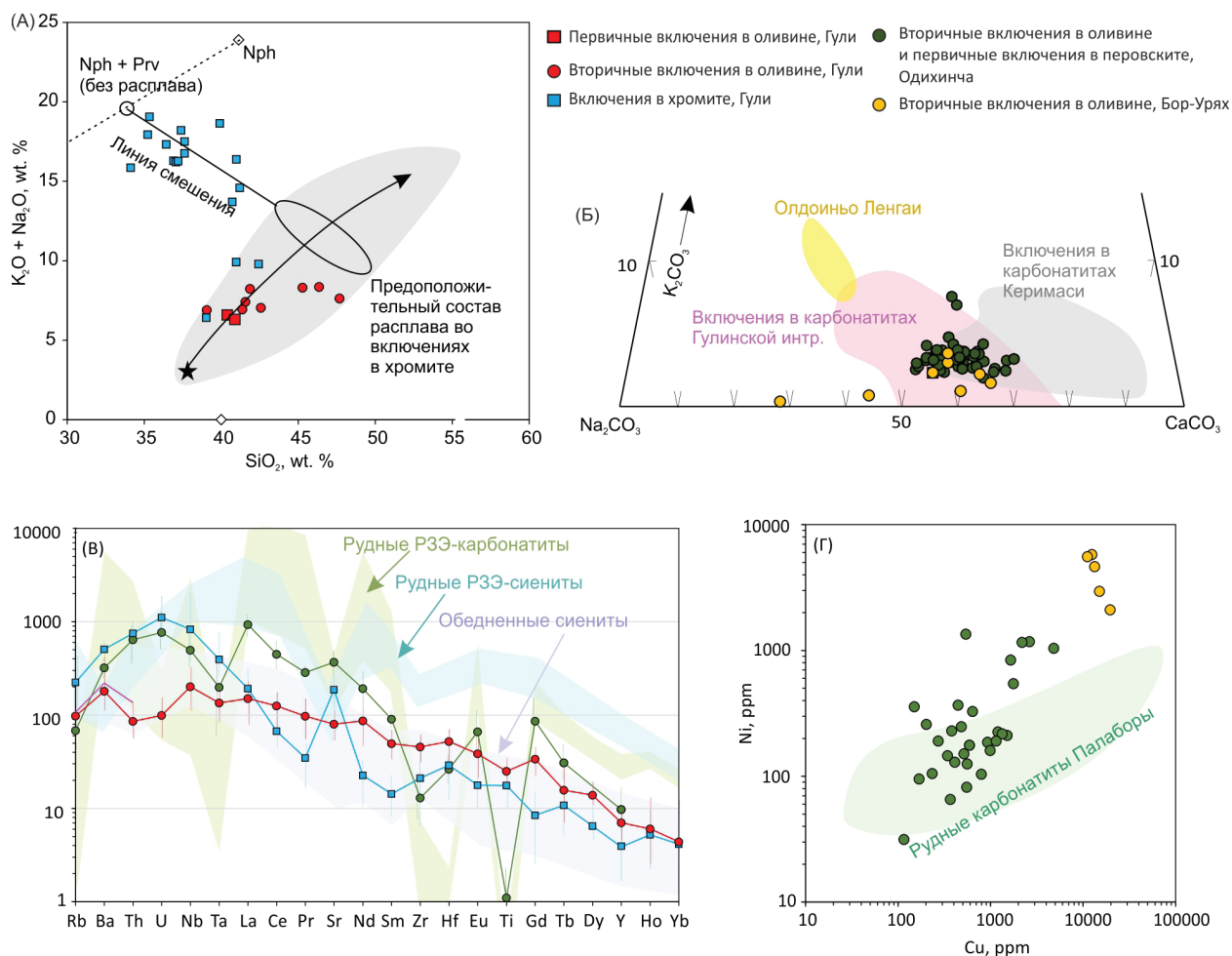


Рис. 8. Характеристики составов прогретых и закаленных включений в минералах ультрамафитов Маймеча-Котуйской провинции. (А) – составы силикатных стекол включений в оливине и хромите из дунитов Гулинского комплекса на диаграмме $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; выделена область природных дифференциатов меланефелинитовых расплавов (серая) (данные GeoRoc) и усредненный тренд их дифференциации, нанесена линия смешения между нефелинитовым расплавом (область, обведенная эллипсом) и захваченными в виде твердых фаз нефелина и перовскита, содержащая составы стекол прогретых включений в хромите; (Б) – составы щелочно-карбонатных расплавов в прогретых включениях из минералов ультрамафитов Бор-Уряха и Одихинчи; полями выделены области других природных щелочно-карбонатитовых составов (см. рис. 5); (В) – РМ-нормированные усредненные редкоземельные спектры для стекол силикатных включений в минералах Гулинских дунитов и карбонатных агрегатов (быстро охлажденные расплавы) в минералах ультрамафитов Одихинчи в сравнении с полями составов рудных РЗЭ-карбонатитов, рудных РЗЭ-сиенитов и обедненных сиенитов щелочно-ультраосновных комплексов мира (Arazamastsev et al., 2001; Downes et al., 2005; Doroshkevich et al., 2019); (Г) – рассчитанные валовые содержания Cu и Ni в сульфидно-карбонатных включениях в минералах ультрамафитов Бор-Уряха и Одихинчи в сравнении с рудными карбонатитами комплекса Палабора (Le Bras et al., 2021).

Fig. 8. Chemical features of the heated and quenched inclusions hosted by minerals of the Maymecha-Kotuy ultramafics. (A) – binary $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ plot with the compositions of the quenching glasses of the olivine- and chromite-hosted inclusions from the Guli dunites; outlined by grey is the area of natural differentiates of melanephelinitic melts and their average differentiation trend (an arrow); a mixing line between nephelinitic melts and a mixture of nepheline and perovskite crystals, containing the compositions of glasses of the chromite-hosted inclusions is shown by a dashed line; (Б) – compositions of the alkali carbonate melts in the heated and quenched inclusions hosted by minerals of the Bor-Uryakh and Odikhincha ultramafics; shaded are fields of the other natural alkali carbonate melts (see Fig. 5); (В) – PM-normalized average spider-diagrams for the glasses of heated and quenched silicate inclusions (Guli dunites) and carbonate aggregates (formerly melts) of the inclusions hosted by minerals of the Odikhincha ultramafics, compared with the compositional fields of the REE-ore carbonatites, REE-ore syenites and barren syenites of the alkali-ultramafic complexes worldwide; (Г) – calculated bulk contents of Ni and Cu in the sulfide-carbonate inclusions hosted by minerals of the Bor-Uryakh and Odikhincha ultramafics compared to the Phalaborwa ore carbonatites.

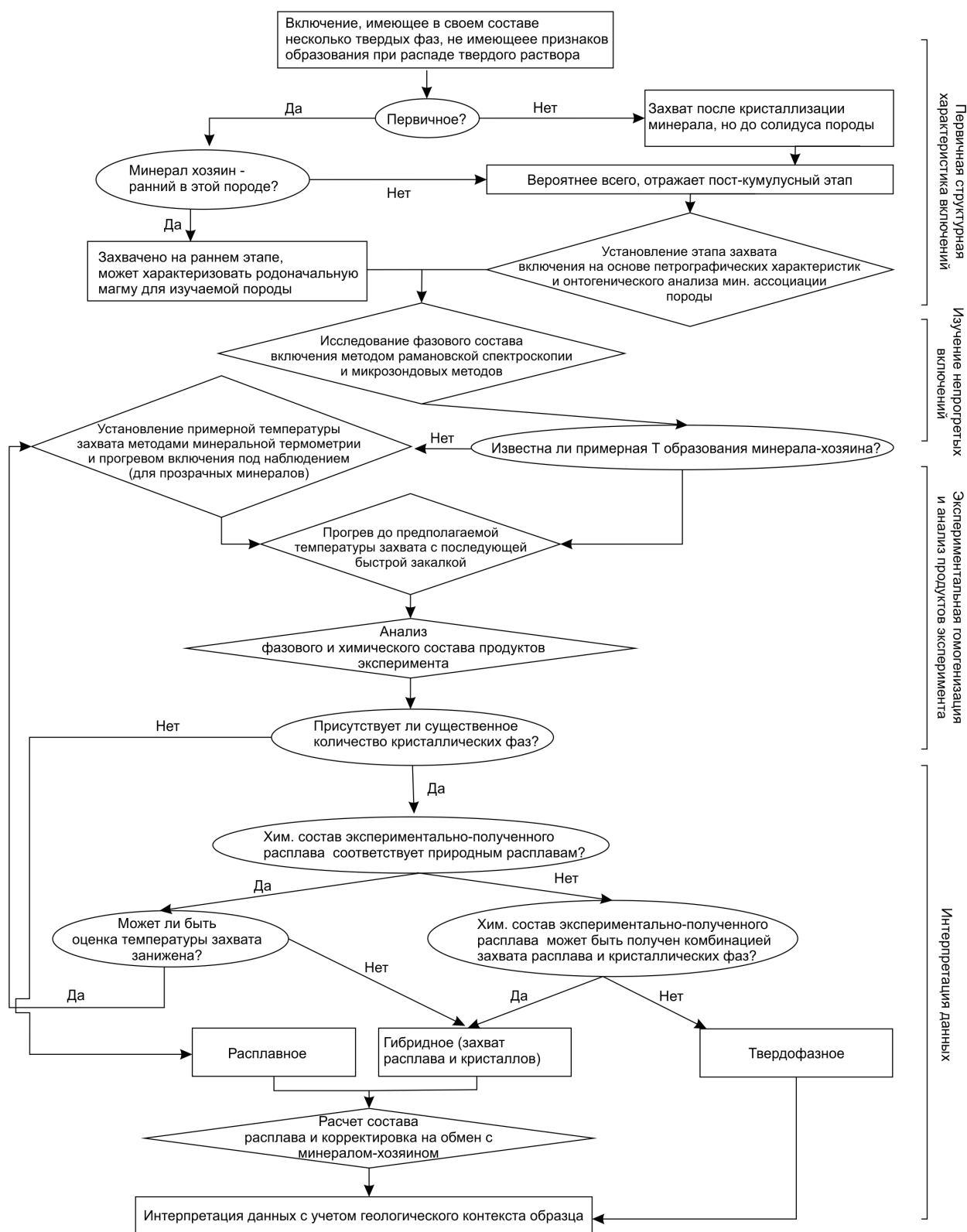


Рис. 9. Обобщенная блок-схема, описывающая последовательность при исследовании включений в минералах интрузивных пород. Ромбы – аналитические и интерпретационные процедуры, овалы – ключевые вопросы, прямоугольники – данные и результаты.

Fig. 9. A generalized flow-chart, describing the study of multiphase inclusions, hosted by minerals of the intrusive rocks. Rhombs – analytical and interpretation actions, ellipses – key questions, rectangles – data and the results.

Заключение

Приведенные примеры исследования включений в минералах интрузивных пород показывают информативность данного подхода. Включения в этом случае представляют не только (и не столько) исходные расплавы, но также реликты среды и ассоциаций, существовавших на определенной стадии формирования пород. Учитывая многостадийность и длительность образования плутонических пород и интрузивных комплексов, эта информация является важной для петрологических реконструкций. Однако, при интерпретации данных по включениям требуется учитывать много факторов и ограничений, игнорирование которых может привести к неправильным заключениям. Наконец, генетические построения, основанные на изучении «микрогеологии» включений, должны согласовываться с «макрогеологией»: контекстом формирования пород и интрузивных комплексов в целом. Основываясь на проделанных работах, мы предлагаем общую схему исследования включений при работе с интрузивными горными породами (рис. 9).

Экспериментальные работы, SIMS и LA-ICP-MS анализы выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №21-17-00122 <https://rscf.ru/en/project/21-17-00122/>). SEM-EDS анализы при исследовании ультрамафитов выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №19-77-10004, продление <https://rscf.ru/en/project/22-77-41005/>). Работа в ИЭМ РАН проводилась в рамках темы НИР FMUF-2022-0004.

Литература

1. Васильев Ю.Р., Золотухин В.В. Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск: Наука, 1975. 270 с.
2. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере Маймеча-Котуйского комплекса Полярной Сибири). Л.: Недра, 1975. 260 с.
3. Смирнов С.З., Томас В.Г., Каменецкий В.С., Козьменко О.А. Водно-силикатные жидкости в системе редкометалльный гранит– Na_2O – SiO_2 – H_2O как концентраторы рудных компонентов при высоких давлениях и температуре // Петрология. 2017. Т. 25. № 6. С. 646–58.
4. Arzamastsev A., Glaznev V., Arzamastseva L., Bea F., Montero P. Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions // Russian Journal of Earth Sciences. 2001. V. 3(1). P. 1–32.
5. Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Vladikin N.V., Kontonikas-Charos A., Prokopyev I.R., Stepanov S.Y., Krasheninnikov S.P. Origin of alkali-rich volcanic and alkali-poor intrusive carbonatites from a common parental magma // Scientific reports. 2021. V. 11(1). P. 17627. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97014-y>.
6. Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Malitch K.N., Vasil'ev Yu. R., Zelenski M.E., Abersteiner A., Kuzmin I.A. Behavior of critical metals in cumulates of alkaline ultramafic magmas in the Siberian large igneous province: insights from melt inclusions in minerals // Ore Geology Reviews. 2023. (in print).
7. Chen W., Kamenetsky V.S., Simonetti A. Evidence for the alkaline nature of parental carbonatite melts at Oka complex in Canada // Nature Communications. 2013. V. 4. P. 2687. DOI: 10.1038/ncomms3687.
8. Doroshkevich A.G., Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: Sources, evolution and relation to the Triassic Siberian LIP // Lithos. 2019. V. 332. P. 245–260.
9. Downes H., Balaganskaya E., Beard A., Liferovich R., Demaiffe D. Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: a review // Lithos. 2005. V. 85. P. 48–75.
10. Guzmics T., Mitchell R.H., Szabó C., Berkesi M., Milke R., Abart R. Carbonatite melt inclusions in coexisting magnetite, apatite and monticellite in Kerimasi calciocarbonatite, Tanzania: melt evolution and petrogenesis // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2011. V. 161 (2). P. 177–196.
11. Hulbert L., Von Gruenewaldt G. Textural and compositional features of chromite in the lower and critical zones of the Bushveld Complex south of Potgietersrus // Economic Geology. 1985. V. 80. P. 872–895.
12. Kalashnikov A., Konopleva N., Pakhomovsky Y.A., Ivanyuk G.Y. Rare earth deposits of the Murmansk region, Russia—a review // Economic Geology. 2016. V. 111(7). P. 1529–1559.
13. Kamenetsky V.S., Van Achterbergh E., Ryan C.G., Naumov V.B., Mernagh T.P., Davidson, P. Extreme chemical heterogeneity of granite-derived hydrothermal fluids: An example from inclusions in a single crystal of miarolitic quartz // Geology. 2002. V. 30(5). P. 459–462.
14. Kesler S.E., Bodnar R.J., Mernagh T.P. Role of fluid and melt inclusion studies in geologic research // Geofluids. 2013. V. 13. P. 398–404.

15. Kogarko L., Plant D., Henderson C., Kjarsgaard B. Na-rich carbonate inclusions in perovskite and calzirtite from the Guli intrusive Ca-carbonatite, polar Siberia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1991. V. 109. P. 124–129.
16. Le Bras L.Y., Bolhar R., Bybee G.M., Nex P.A., Guy B.M., Moyana T., Lourens P. Platinum-group and trace elements in Cu-sulfides from the Loolekop pipe, Phalaborwa: implications for ore-forming processes // *Mineralium Deposita*. 2021. V. 56 (1). P. 161–177.
17. Pushkarev E., Kamenetsky V., Morozova A., Khiller V., Glavatskykh S., Rodemann T. Ontogeny of ore Cr-spinel and composition of inclusions as indicators of the pneumatolytic–hydrothermal origin of PGM-bearing chromitites from Kondyor massif, the Aldan Shield // *Geology of ore deposits*. 2015. V. 57 (5). P. 352–380.
18. Sadiq M., Ranjith A., Umrao R.K. REE mineralization in the carbonatites of the Sung Valley ultramafic-alkaline-carbonatite complex, Meghalaya, India // *Central European Journal of Geosciences*. 2014. V. 6 (4). P. 457–475.
19. Spandler C., Mavrogenes J., Arculus R. Origin of chromitites in layered intrusions: Evidence from chromite-hosted melt inclusions from the Stillwater Complex // *Geology*. 2005. V. 33(11). P. 893–896.
20. Weidendorfer D., Schmidt M.W., Mattsson H.B. A common origin of carbonatite magmas // *Geology*. 2017. V. 45 (6). P. 507–510.