

УДК 548.4: 552.3

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИНТРУЗИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ УЛЬТРАОСНОВНОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ



В.А. Симонов^{1,2,3}, Ю.Р. Васильев^{1,2}, А.В. Котляров^{1,3}, Е.И. Николенко⁴

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁴Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

Исследования расплавных включений в хромшпинелидах и расчетное моделирование на основе их составов свидетельствуют о том, что ликвидусная кристаллизация оливинов начиналась при 1 545–1 460 °С, а хромитов – 1430–1370 °С. В дальнейшем процессы минералообразования в интрузивных камерах происходили в ходе эволюции состава магматических систем от пикритового до базальтового со снижением параметров формирования оливинов до 1240–1160 °С и хромшпинелидов до 1315–1275 °С.

Ключевые слова: Ультраосновная магматическая провинция, Сибирская платформа, расплавные включения в хромшпинелидах, физико-химические условия

Введение

Широкое развитие ультрабазитовых комплексов (включая гипербазиты платиноносных массивов и меймечиты) позволяет выделить на Сибирской платформе масштабную ультраосновную магматическую провинцию [Simonov et al., 2019]. В связи с этим важное значение приобретают исследования условий магматических систем, ответственных за формирование ультрабазитов, развитых в этом регионе. Хорошо известно, что для решения данных проблем большую помощь может оказать изучение расплавных включений в минералах. В случае Сибирской платформы представительная информация (на основе анализа включений) о параметрах кристаллизации наиболее высокотемпературных минералов в ультраосновных породах была получена главным образом для меймечитовых эффузивных серий [Соболев и др., 1991, 2009]. При этом многие вопросы, связанные с физико-химическими условиями формирования ультрабазитовых интрузивных комплексов Сибирской платформы, оставались открытыми.

В последнее время исследования расплавных включений в хромшпинелидах позволили выяснить основные параметры кристаллизации ряда ультраосновных массивов Сибирской платформы [Симонов и др., 2011, 2014, 2016, 2017; Simonov et al., 2019]. Работы в этом направлении продолжают с привлечением оригинальных данных по другим объектам и с применением современных методов обработки результатов изучения минералов и находящихся в них включений.

В целом основу статьи представляют данные, полученные при исследовании расплавных включений в хромшпинелидах, а также в ходе анализа сосуществующих оливинов и хромитов. В результате обработки этой информации с помощью современных расчетных программ установлены *PT*-параметры кристаллизации ультраосновных комплексов Сибирской платформы. При этом использованы главным образом оригинальные данные по включениям в хромшпинелидах из ультраосновных массивов (Гулинский, Кондерский, Инагли и Чад), а также из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы (рис. 1). Последние привлечены в связи с тем, что одним из наиболее вероятных источников для этих хромшпинелидов являются ультрабазитовые массивы типа Гулинского [Симонов и др., 2019].

Методы исследования

Основной объем информации о физико-химических условиях кристаллизации интрузивных комплексов ультраосновной провинции на Сибирской платформе был получен в результате исследования расплавных включений в хромшпинелидах. Важное значение для выяснения *PT*-параметров магматических систем имеют анализы составов хромитов-хозяинов и минералов, находящихся во включениях.

Экспериментальные работы с расплавными включениями проводились в лаборатории геодинамики и магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Анализы составов минералов и расплавных включений были выполнены в Центре

коллективного пользования «Многоэлементные и изотопные исследования СО РАН» (г. Новосибирск) и в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск).

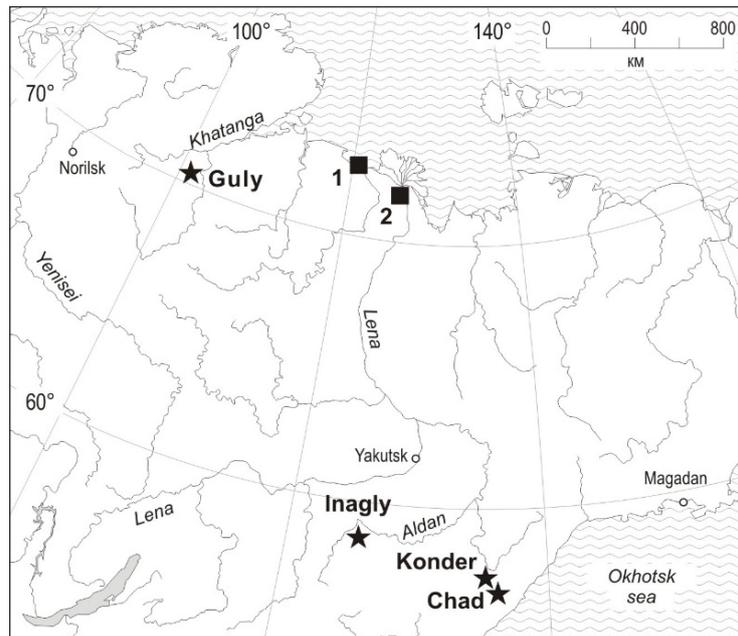


Рис. 1. Расположение исследованных объектов

Звезды – ультраосновные массивы. Квадраты – районы отбора проб хромшпинелидов с расплавленными включениями из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы (1 – участок около устья р. Оленек, 2 – участок в нижнем течении р. Лена)

Fig. 1. Location of the investigated objects

Stars are ultramafic massifs. Squares – sampling areas of Cr-spinels with melt inclusions from Triassic deposits of the North-East of the Siberian platform (1 – area near the Olenek river mouth, 2 – area in the lower flow of the Lena River)

При исследовании включений в хромшпинелидах, учитывая практически полную непрозрачность минерала, была применена особая методика экспериментов с использованием микрокамеры на основе силицевого нагревателя [Симонов и др., 2011, 2017]. Зерна хромшпинелидов помещались в графитовый микроконтейнер. В ходе высокотемпературных опытов создавались восстановительные условия в результате реакции воздушного кислорода с графитом, что позволило сохранить хромшпинелиды (и включения) несмотря на экстремальные условия экспериментов. В целом использовалась следующая схема опытов: нагрев до 1000–1100 °С (8–10 мин), постепенный нагрев до 1330–1340 °С (10 мин), закалка в воде для получения гомогенного стекла во включениях.

Составы включений и хромшпинелидов-хозяинов изучались на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro (ИГМ СО РАН). Пределы обнаружения (мас. %) компонентов этим методом следующие: SiO₂ – 0,007; TiO₂ – 0,032; Al₂O₃ – 0,011; Cr₂O₃ – 0,019; FeO – 0,019; MnO – 0,034; MgO – 0,011; CaO – 0,008; Na₂O – 0,017; K₂O – 0,009; Cl – 0,017; P₂O₅ – 0,011. Стандартами при анализе на микрозонде служили: ортоклаз (OR), альбит (AB), диопсид (DI), гранат (O-145), базальтовое стекло (GL).

Значительный объем информации по составам стекол прогретых в ходе экспериментов расплавленных включений и содержащихся в них минералов получен в ИГМ СО РАН на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU [(Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd)] при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1,5 нА и живом времени набора спектров 20 с. При данных условиях анализа погрешность определения основных компонентов (C ≥ 10–15 мас. %) не превышает 1 отн. %. Погрешность определения компонентов с концентрациями 1–10 мас. % лежит в диапазоне 2–6 отн. % и обычно не превышает 10 отн. %. При концентрациях вблизи предела обнаружения (0,2–0,3 мас. %) погрешность может достигать величины 20 отн. % [Лаврентьев и др., 2015].

Фазы во включениях и хромшпинелиды-хозяины анализировались также с помощью рентгеноспектрального микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe по методикам, описанным в работах [Лаврентьев и др., 2005; Королук и др., 2008].

Физико-химические параметры кристаллизации интрузивных комплексов ультраосновной магматической провинции на Сибирской платформе были

установлены с помощью расчетного моделирования на основе данных по расплавленным включениям в хромшпинелидах с использованием программ PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] и PLUTON [Лавренчук, 2004]. Температуры образования оливинов также были оценены с помощью минералогических (Ol-Sp) геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] на основе данных по составам микрокристалликов оливина в расплавленных включениях и хромшпинелида-хозяина.

Результаты расчетов с использованием составов оливинов и хромшпинелидов были протестированы в сравнении с *PT*-параметрами, полученными на основе данных по расплавленным включениям в хромшпинелидах с помощью программ PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004].

Расплавленные включения в хромшпинелидах

Детальные исследования проб хромшпинелидов, отобранных в различных регионах Сибирской платформы, позволили найти расплавленные включения и провести с ними экспериментальные работы не только в случае ультраосновных массивов, но и при изучении триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы.

Первичные расплавленные включения (10–60 мкм) располагаются равномерно в зернах хромшпинелидов. Реже они формируют полосы и зоны роста, параллельные граням кристаллов. Формы включений обычно округлые, равновесные с вмещающим хромитом и часто имеют заметную огранку. В первоначальном состоянии включения в негретых хромшпинелидах содержат множество преимущественно силикатных кристалликов (среди которых преобладают оливин и клинопироксен), а также иногда от-

дельные деформированные флюидные фазы (рис. 2, А). После высокотемпературных экспериментов и закалки включения обычно становятся гомогенными – двухфазовыми (стекло + газовый пузырек) или однофазовыми (стекло). Это говорит о том, что содержимое включений было полностью расплавлено. В то же время часть кристалликов оливина, несмотря на высокие температуры опытов (до 1330–1340 °С), сохраняется в виде недоплавленных реликтов в гомогенном стекле и в прогретых включениях присутствуют стекло, кристаллические и флюидные фазы (рис. 2, В). В других случаях, несмотря на быструю закалку, из расплава внутри включений успевают образоваться ограненные кристаллики преимущественно оливина и клинопироксена. В целом, присутствие данных включений прямо свидетельствует об участии расплавов при формировании пород, содержащих изученные хромшпинелиды.

Анализ содержимого расплавленных включений в хромшпинелидах позволил выяснить особенности составов расплавов, ответственных за формирование интрузивных комплексов ультраосновной магматической провинции на Сибирской платформе.

По соотношению (Na₂O + K₂O) – SiO₂ в составе включений хорошо видно, что формирование всех рассмотренных объектов происходило при участии щелочных магм. При этом данные разбиваются на две группы. Повышенными значениями щелочности обладают расплавы платиноносных ультраосновных массивов юга Сибирской платформы (Кондерский, Инагли). Включения в хромшпинелидах северной части Сибирской платформы (Гулинский массив и триасовые отложения Северо-Востока Сибирской платформы) содержат меньше щелочей и формируют фактически единое поле (GN) вблизи границы серий, в котором располагается также большая часть данных по Чадскому массиву (рис. 3).

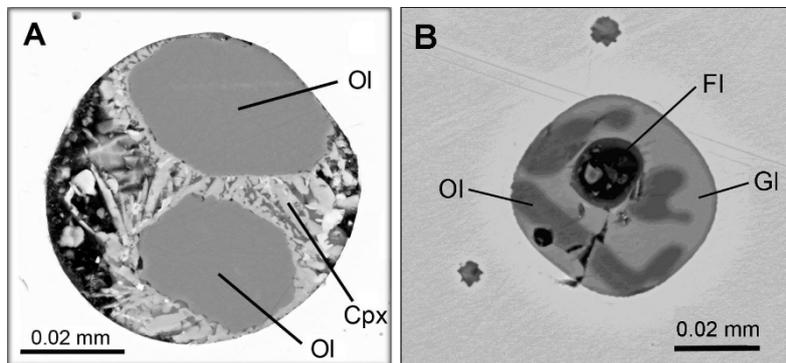


Рис. 2. Расплавленные включения в хромшпинелидах

А – из Гулинского массива. В – из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы. Gl – закалочное стекло; Ol – оливин; Cpx – клинопироксен; Fl – местоположение флюидных фаз

Fig. 2. Melt inclusions in Cr-spinels

A – from the Guli massif. B – from Triassic deposits of the North-East of the Siberian platform. Gl – quenched glass; Ol – olivine; Cpx – clinopyroxene; Fl – location of fluid phases

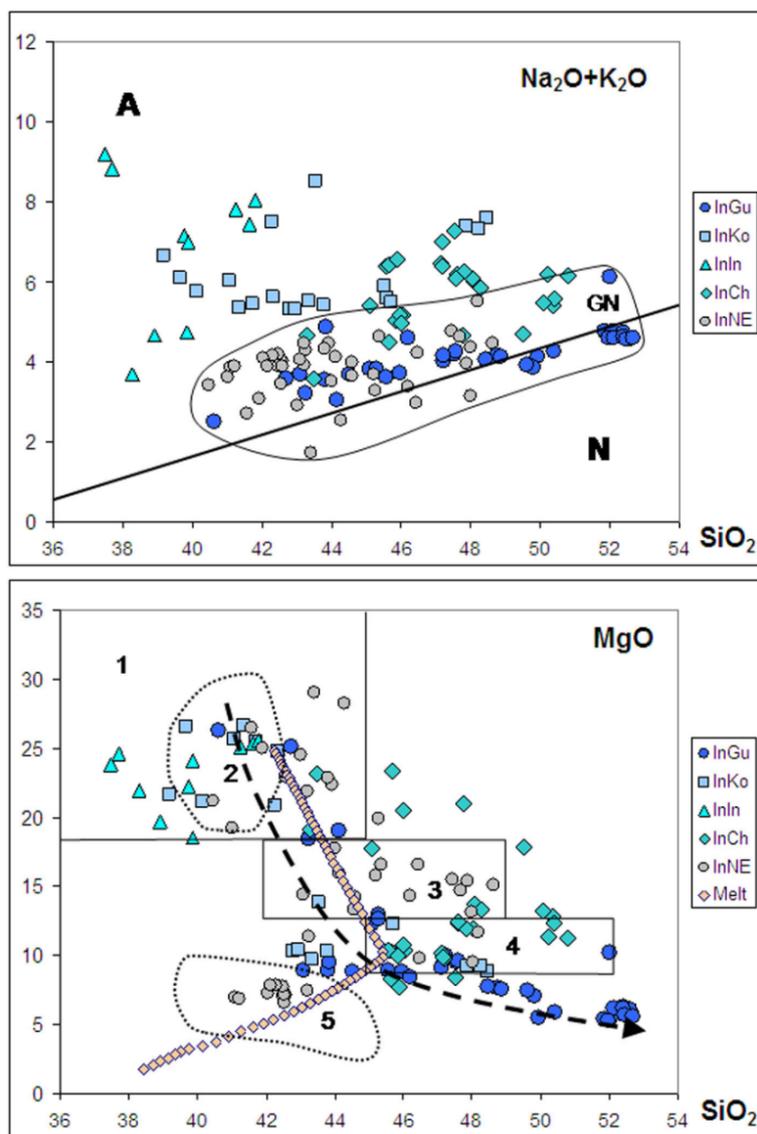


Рис. 3. Диаграммы $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ и $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ (мас. %) для расплавных включений в хромшпинелидах

Расплавные включения в хромшпинелидах из ультраосновных массивов (Гулинский – InGu, Кондерский – InKo, Инагли – InIn, Чад – InCh) и из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы (InNE). GN – поле составов расплавных включений в хромшпинелидах Гулинского массива и Северо-Востока Сибирской платформы. Серии пород: щелочные (A) и нормальной щелочности (N). Melt – изменение состава пикритового расплава согласно результатам расчетного моделирования с помощью программы PLUTON [Лавренчук, 2004] на основе данных по высокомагнезиальным расплавным включениям в хромшпинелидах из дунитов Гулинского массива. Здесь и на рис. 4: Поля составов пород: 1 – пикриты; 2 – пикритовые порфириты Маймеча-Котуйского района; 3 – пикробазальты; 4 – оливиновые базальты; 5 – щелочные породы Гулинского массива. Пунктирная линия – тренд изменения составов расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Карашатского массива (офиолиты Южной Тувы). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием информации из работ [Васильев, Золотухин, 1975; Магматические горные породы, 1983; Петрографический кодекс..., 2009; Симонов и др., 2009]

Fig. 3. Diagrams $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ and $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ (wt. %) for melt inclusions in Cr-spinels

Melt inclusions in Cr-spinels from ultramafic massifs (Guli – InGu, Konder – InKo, Inagli – InIn, Chad – InCh) and from Triassic deposits of the North-East of the Siberian platform (InNE). GN – the compositional field of melt inclusions in Cr-spinels of the Guli massif and of the North-East of the Siberian platform. Rock series: alkaline (A) and normal alkalinity (N). Melt – change in the composition of picrite melt according to the results of computational modeling using the PLUTON program [Lavrenchuk, 2004] based on the data on high-Mg melt inclusions in Cr-spinels from dunites of the Guli massif. Here and in the fig. 4: Fields of rock compositions: 1 – picrites; 2 – picrite porphyrites of the Maimecha-Kotuy region; 3 – picrobasalts; 4 – olivine basalts; 5 – alkaline rocks of the Guli massif. The dotted line is the trend of changes in the composition of melt inclusions in Cr-spinels from the dunites of the Karashat massif (ophiolites of the South Tuva). The figure is based on original data using information from [Vasiliev, Zolotukhin, 1975; Igneous rocks, 1983; Petrographic Code..., 2009; Simonov et al., 2009]

На диаграмме MgO – SiO₂ составы расплавных включений в хромшпинелидах из ультраосновных комплексов Сибирской платформы образуют в общем единое направление эволюции магматических систем (с падением магния на фоне роста кремнезема) от пикритов к базальтам, практически совпадающее с трендом расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов расслоенного дунит-верлит-пироксенитового комплекса Карашатского массива (офиолиты Южной Тувы) [Симонов и др., 2009]. При этом для включений из хромитов Гу-

линского и Кондерского массивов, а также из хромшпинелидов триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы в области пикробазальтов и оливинных базальтов наблюдается реверсивное направление (со снижением SiO₂) к щелочным породам, соответствующее тренду развития магматических систем Гулинского массива, рассчитанному нами с помощью программы PLUTON [Лавренчук, 2004] на основе данных по высокомагнезиальным расплавным включениям в хромшпинелидах из дунитов (рис. 3).

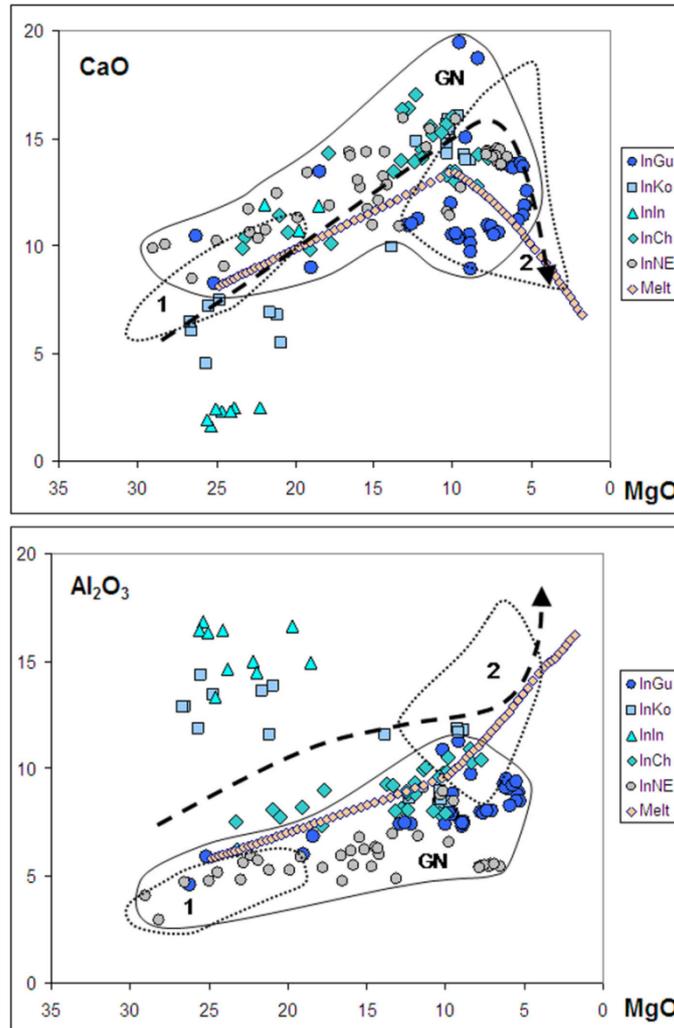


Рис. 4. Диаграммы Al₂O₃ – MgO и CaO – MgO для расплавных включений в хромшпинелидах, мас. %

Поля составов пород: 1 – пикритовые порфириды Маймеча-Котуйского района; 2 – щелочные породы Гулинского массива. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием информации из работ [Васильев, Золотухин, 1975; Симонов и др., 2009]

Fig. 4. Diagrams Al₂O₃ – MgO and CaO – MgO for melt inclusions in Cr-spinels, wt. %

Fields of rock compositions: 1 – picrite porphyrites of the Maimecha-Kotuy region; 2 – alkaline rocks of the Guli massif. The figure is based on original data using information from [Vasiliev, Zolotukhin, 1975; Simonov et al., 2009]

На вариационных диаграммах, показывающих зависимость содержания петрохимических компонентов от количества MgO, можно отметить общую закономерность распределения элементов во включениях в

хромшпинелидах из Гулинского и Чадского массивов, а также из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы, близкую в целом к расчетным данным по эволюции магматизма Гулинского массива

и к тренду расплавных включений в хромшпинелидах из Карашатского массива (офиолиты Южной Тувы). При этом отчетливо выделяются включения в хромитах из массива Инагли, содержащие минимум кальция и максимум алюминия при высокой (до 26 мас. % MgO) магнезиальности. Промежуточную позицию занимают включения в хромшпинелидах из Кондерского массива, располагающиеся вблизи тренда включений из офиолитов Южной Тувы, но при этом часть из них (с повышенным до 27 мас. % MgO) обладают значительными содержаниями алюминия, тесно ассоциируя с включениями в хромитах массива Инагли (рис. 4).

В целом экспериментальные исследования и анализ составов включений в хромшпинелидах позволили выяснить особенности формирования ультраосновных комплексов на Сибирской платформе.

Прежде всего, наличие первичных расплавных включений в минералах прямо свидетельствует о кристаллизации рассмотренных ассоциаций из магматических расплавов. Анализ составов включений показал, что это были щелочные расплавы, первоначально соответствующие высокомагнезиальным ультраосновным магмам, последующая эволюция которых происходила при снижении содержания магния на фоне роста кремнезема от пикритов к базальтам. При этом направление эволюции практически совпадает с трендом расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов расслоенного интрузивного дунит-верлит-пироксенитового комплекса офиолитов Южной Тувы.

Таким образом, расплавные включения фактически отражают эволюцию исходных ультраосновных магматических систем с образованием оливиновых кумулятов в интрузивных камерах на Сибирской платформе. Причем это относится не только к четко обозначенным гипербазитовым массивам, но и к ультраосновным комплексам, послужившим источниками для хромшпинелидов из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы.

Представительные данные по составам расплавных включений (135 анализов) в хромшпинелидах свидетельствуют об отличии магматических систем, формировавших ультраосновные комплексы на севере и юге Сибирской платформы. В первом случае включения в хромитах из Гулинского массива и из триасовых отложений Северо-Востока образуют фактически единую группу, хорошо согласующуюся с расчетным трендом магматических систем Гулинского массива с реверсивным направлением (при снижении SiO₂) к щелочным породам. Включения в хромшпинелидах из гипербазитовых массивов юга Сибирской платформы содержат заметно больше щелочей и при соблюдении общей эволюции, близкой к тренду включений в хромшпинелидах из офиолитов Южной Тувы, обладают относительно аномальными содержаниями SiO₂, Al₂O₃ и CaO.

PT-параметры кристаллизации ультраосновных интрузивных комплексов

Результаты проведенных исследований расплавных включений в хромшпинелидах и составов минералов позволили выяснить с помощью программ (COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004], PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], PLUTON [Лавренчук, 2004]) и минералогических геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] физико-химические условия формирования интрузивных комплексов ультраосновной провинции на Сибирской платформе.

В случае ультраосновных дунит содержащих комплексов на Сибирской платформе в ходе расчетного моделирования с помощью программ PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и PLUTON [Лавренчук, 2004] на основе данных по составу включений в хромшпинелидах были определены максимальные температуры кристаллизации минералов из Гулинского (оливин – 1520–1420 °С, хромит – 1410–1370 °С), Кондерского (оливин – 1545–1430 °С, хромит – 1420–1380 °С), Инаглинского (оливин – 1530–1430 °С, хромит – до 1430 °С) и Чадского (оливин – 1460–1420 °С, хромит – 1430–1330 °С) массивов [Симонов и др., 2017; Simonov et al., 2019]. Близкие температуры кристаллизации хромшпинелидов получены для триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы на основе данных по составам наиболее магнезиальных прогретых расплавных включений с помощью программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] – 1425–1395 °С [Симонов и др., 2019]. При этом кристаллизация оливинов из данных расплавов, как установлено с помощью программы COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004], происходила в интервале температур 1480–1160 °С.

В последнее время использование данных по составам расплавных включений в хромшпинелидах при расчетном моделировании с помощью программ COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] и PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] дало возможность уточнить PT-параметры формирования магматических пород, являющихся источниками рассмотренных хромитов из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы. Прежде всего, были определены температуры кристаллизации хромшпинелидов – 1315–1275 °С. Для оливинов из включений в хромшпинелидах оценены давления и температуры процессов кристаллизации: 4,5–4,1 кбар, 1240–1220 °С. Необходимо отметить, что эти параметры заметно ниже расчетных данных, полученных нами ранее [Симонов и др., 2019] на основе составов наиболее магнезиальных включений и показывающих, соответственно, максимально возможные характеристики.

Анализ составов микрокристалликов оливина в расплавных включениях и хромшпинелидов-хозяинов позволил рассчитать с помощью Ol-Sp геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] температуры минералообразующих процессов в магматических системах, сформировавших хромиты из триасовых отложений Северо-Востока Сибирской платформы. Были выяснены следующие температуры образования оливинов – 1520–1165 °С. Эти данные хорошо согласуются с результатами моделирования по программе COMAGMAT температурного режима кристаллизации оливина на основе составов наиболее магнезиальных включений: 1480–1160 °С.

В целом, расчетное моделирование на основе данных по составам расплавных включений в акцессорных хромшпинелидах с использованием современных программ и минералогических термометров позволило установить высокие температуры образования минералов из ультраосновных интрузивных комплексов Сибирской платформы. В частности, ликвидусная кристаллизация оливинов начиналась при 1545–1460 °С, а хромитов – при 1430–1370 °С. В дальнейшем процессы минералообразования в интрузивных камерах происходили в ходе эволюции магматических систем со снижением параметров формирования оливинов до 1240–1160 °С, а хромшпинелидов до 1315–1275 °С.

Выводы

1. Проведенные исследования позволили установить присутствие первичных расплавных включений в акцессорных хромшпинелидах из ультрабазитовых комплексов Сибирской платформы, что прямо свидетельствует о формировании рассмотренных ассоциаций при участии магматических систем.

2. Анализ состава включений показал, что минералы ультрабазитовых комплексов Сибирской платформы кристаллизовались из щелочных рас-

плавов, первоначально соответствующих высокомагнезиальным ультраосновным магмам, последующая эволюция которых происходила при снижении содержания магния (от пикритов к базальтам) с образованием оливиновых кумулятов в интрузивных камерах.

3. Представительные данные по составам расплавных включений в хромшпинелидах свидетельствуют об отличии магматических систем, сформировавших ультраосновные комплексы на севере (Гулинский массив и триасовые отложения Северо-Востока) и юге (массивы Кондер, Инагли, Чад) Сибирской платформы. В первом случае включения образуют единую группу, хорошо согласующуюся с расчетным трендом магматических систем Гулинского массива. Во втором – включения содержат заметно больше щелочей и обладают относительно аномальными содержаниями SiO₂, Al₂O₃ и CaO.

4. Расчетное моделирование на основе данных по составам расплавных включений в хромшпинелидах из ультрабазитовых комплексов Сибирской платформы с использованием современных программ (PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004], PLUTON [Лавренчук, 2004]) и минералогических термометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] свидетельствует о том, что ликвидусная кристаллизация оливинов начиналась при 1545–1460 °С, а хромитов – при 1430–1370 °С. В дальнейшем процессы минералообразования в интрузивных камерах происходили в ходе эволюции магматических систем со снижением параметров формирования оливинов до 1240–1160 °С и хромшпинелидов до 1315–1275 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 14.Y26.31.0029), гранта РФФИ 18-45-140027.

ЛИТЕРАТУРА

- Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М. : Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. 362 с.
- Васильев Ю.Р., Золотухин В.В. Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск : Наука, 1975. 272 с.
- Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 3. С. 221–225.
- Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Королюк В.Н., Логвинова А.М. Электронно-зондовое определение примесей цинка и никеля в хромшпинелидах для целей геотермометрии перидотитов // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 7. С. 741–745.
- Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 8. С. 1473–1482.
- Лавренчук А.В. Программа для расчета внутрикамерной дифференциации основной магмы «PLUTON» // Тезисы докладов Второй Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск, 2004. С. 105–106.
- Магматические горные породы. М. : Наука, 1983. Т. 1. 766 с.
- Петрографический кодекс России. СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 194 с.
- Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С. Петрогенезис дунитов Гулинского ультраосновного массива (север Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 12. С. 2153–2177.
- Симонов В.А., Котляров А.В., Николенко Е.И., Королюк В.Н. Расплавные включения в хромшпинелидах: источник прямой информации об условиях формирования базит-ультрабазитовых магматических систем Северо-Востока Сибирской

платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2019. Вып. 17. С. 240–242.

Симонов В.А., Приходько В.С., Васильев Ю.Р., Котляров А.В. Физико-химические условия кристаллизации пород ультраосновных массивов Сибирской платформы // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36, № 6. С. 56–79.

Симонов В.А., Приходько В.С., Ковязин С.В. Условия формирования платиноносных ультраосновных массивов Юго-Востока Сибирской платформы // Петрология. 2011. Т. 19, № 6. С. 579–598.

Симонов В.А., Приходько В.С., Ступаков С.И., Котляров А.В. Петрогенезис дунитов Чадского массива, Сибирская платформа (данные по расплавленным включениям в хромшпинелидах) // Материалы XVI Всероссийской конференции по термобарогеохимии. Иркутск : Изд-во Института географии СО РАН, 2014. С. 102–103.

Симонов В.А., Шелепаев Р.А., Котляров А.В. Физико-химические параметры формирования расслоенного габбро-гипербазитового комплекса в офиолитах Южной Тувы // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения : материалы третьей Международной конференции. Екатеринбург : Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2009. Т. 2. С. 195–198.

Соболев А.В., Каменецкий В.С., Кононкова Н.Н. Новые данные по петрологии сибирских меймечитов // Геохимия. 1991. № 8. С. 1084–1095.

Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования Сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 12. С. 1293–1334.

Ariskin A.A., Varmina G.S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // Geochemistry International. 2004. V. 42 (Suppl. 1). P. S1–S157.

Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // Chemical Geology. 2014. V. 368. P. 1–10.

Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 29 July 2011. 2011. V 12, No. 7. Q07021.

Simonov V.A., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V., Prihodko V.S. Ultrabasic igneous province of the Siberian Platform: physical and chemical conditions of intrusive complexes formation // Large Igneous Provinces through earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues. Abstract volume of the 7 International Conference. Tomsk : CSTI Publishing house, 2019. P. 130–131.

Wan Z., Coogan L.A., Canil D. Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a Geothermometer // American Mineralogist. 2008. V. 93. P. 1142–1147.

Авторы:

Симонов Владимир Александрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; научный сотрудник, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия; научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета, Казань, Россия.

E-mail: simonov@igm.nsc.ru

Васильев Юрий Романович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; научный сотрудник, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: meimech@igm.nsc.ru

Котляров Алексей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета, Казань, Россия.

E-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

Николенко Евгений Игоревич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия.

E-mail: nevgeny@igm.nsc.ru

Geosphere Research, 2021, 4, 27–36. DOI: 10.17223/25421379/21/2

V.A. Simonov^{1,2,3}, Yu.R. Vasiliev^{1,2}, A.V. Kotlyarov^{1,3}, E.I. Nikolenko⁴

¹*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia*

³*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

⁴*Research Geological Enterprise AK "ALROSA", Mirny, Russia*

PHYSICOCHEMICAL CONDITIONS OF CRYSTALLIZATION OF INTRUSIVE COMPLEXES OF THE ULTRABASIC MAGMATIC PROVINCE ON THE SIBERIAN PLATFORM

The widespread distribution of ultramafic complexes makes it possible to distinguish a large-scale ultrabasic magmatic province on the Siberian platform. In this regard, studies of the conditions of magmatic systems responsible for the formation of ultrabasic rocks situated in this region are of great importance. It is well known that the study of melt inclusions can be of great help in solving these problems. The article is based on the data obtained during the study of melt inclusions in Cr-spinels, as well as on the analysis of coexisting olivines and chromites. As a result of processing this information with the help of modern computational programs, *PT*-parameters of crystallization of ultramafic complexes of the North-East of the Siberian platform were established. The original data on inclusions in Cr-spinels from ultramafic massifs (Guli, Konder, Inagli and Chad), as well as from Triassic deposits of the North-East of the Siberian platform, were used. The analysis of the inclusions showed that the minerals of the ultramafic complexes of the Siberian Platform crystallized from alkaline melts, initially corresponding to high-Mg ultrabasic magmas, the subsequent evolution of which

occurred with a decrease in the magnesium content (from picrites to basalts) with the formation of olivine cumulates in the intrusive chambers. Representative data on the composition of melt inclusions in Cr-spinels indicate that the magmatic systems that formed ultramafic complexes in the north (Guli massif and Triassic deposits of the North-East) and south (Konder, Inagli, Chad massifs) of the Siberian platform differ. In the first case, inclusions form a single group, which is in a good agreement with the calculated trend of the magmatic systems of the Guli massif. In the second, inclusions contain significantly more alkalis and have relatively abnormal contents of SiO₂, Al₂O₃ and CaO. Computational modeling based on data on the composition of melt inclusions in Cr-spinels from ultramafic complexes of the Siberian Platform using modern programs and mineralogical thermometers indicates that liquidus crystallization of olivines began at 1545–1460 °C and chromites at 1430–1370 °C. Subsequently, the processes of mineral formation in the intrusive chambers occurred during the evolution of magmatic systems with a decrease in the formation parameters of olivines to 1240–1160 °C and Cr-spinels to 1315–1275 °C.

Key words: Ultrabasic magmatic provinces, Siberian platform, melt inclusions in Cr-spinels, physicochemical conditions

References

- Ariskin A.A., Barmina G.S. *Modelirovanie fazovykh ravnovesii pri kristallizatsii basaltovykh magm* [Modeling phase equilibria during crystallization of basaltic magmas]. Moscow: Nauka, MAIK "Nauka / Interperiodika", 2000. 362 p. In Russian
- Vasiliev Yu.R., Zolotukhin V.V. *Petrologia ultrabazitov severa Sibirskoi platformy i nekotorye problemy ih genezisa* [Petrology of ultramafic rocks in the north of the Siberian platform and some problems of their genesis]. Novosibirsk: Publishing house Nauka, 1975. 272 p. In Russian
- Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N. JXA-8100 microanalyzer: accuracy of analysis of rock-forming minerals // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49 (3). pp. 165–168.
- Lavrentyev Yu.G., Usova L.V., Korolyuk V.N., Logvinova A.M. *Elektronno-zondovoe opredelenie primesei zinka i nikelya v hromshpinelidakh dlya tselei geotermometrii peridotitov* [Electron probe microanalysis of Cr-Spinel for zinc and nickel traces as applied to study of the geothermometry of peridotites] // *Russian Geology and Geophysics*. 2005. V. 46 (7). pp. 741–745. In Russian
- Lavrent'ev Y.G., Karmanov N.S., Usova L.V. Electron probe microanalysis of minerals: microanalyzer or scanning electron microscope? // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56 (8). pp. 1154–1161.
- Lavrenchuk A.V. *Programma dlya rascheta vnutrikamernoy differentsiatsii osnovnoy magmy «PLUTON»* [PLUTON software for calculating within chamber differentiation of mafic magmas], in: Abstracts, 2nd Siberian Int. Conf. Young Geosci. Novosibirsk: Gos. Univ. Novosibirsk, 2004. pp. 105–106. In Russian
- Magmaticheskie gornye porody* [Igneous rocks]. V. 1, Moscow: Nauka, 1983. 766 p. In Russian
- Petrograficheskii kodeks Rossii* [Petrographic Code of Russia]. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2009. 194 p. In Russian
- Simonov V.A., Vasil'ev Y.R., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S. Petrogenesis of dunites of the Guli ultrabasic massif (northern Siberian platform) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57 (12). pp. 1696–1715.
- Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Nikolenko E.I., Korolyuk V.N. *Rasplavnye vklucheniya v hromshpinelidakh: istochnik pryamoi informatsii ob usloviyakh formirovaniya basit-ultrabazitovykh magmaticheskikh system Severo-Vostoka Sibirskoi platformy* [Melt inclusions in Cr-spinels: a source of direct information on the conditions of basic-ultrabasic magmatic systems in the North-East of the Siberian platform] // *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)*. Issue 17. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2019. pp. 240–242. In Russian
- Simonov V.A., Prikhod'ko V.S., Kovyazin S.V. Genesis of platiniferous massifs in the southeastern Siberian Platform // *Petrology*. 2011. V. 19 (6). pp. 549–567.
- Simonov V.A., Prikhod'ko V.S., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V. Physicochemical Conditions of Crystallization of Rocks from Ultrabasic Massifs of the Siberian Platform // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2017. V. 11 (6). pp. 447–468.
- Simonov V.A., Prikhodko V.S., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V. *Petrogenesis dunitov Chadskogo massiva, Sibirskaya planforma (dannye po rasplavnym vklucheniyam v hromshpinelidakh)* [Petrogenesis of dunites of the Chad massif, Siberian platform (data on melt inclusions in Cr-spinels)] // *Materials of the XVI All-Russian conference on thermobarogeochimistry*. Irkutsk: Publishing house of the Institute of Geography SB RAS. 2014. pp. 102–103. In Russian
- Simonov V.A., Shelepaev R.A., Kotlyarov A.V. *Fiziko-khimicheskiye parametry formirovaniya rassloyennogo gabbro-giperbazitovogo kompleksa v ofiolitakh YUzhnoy Tuvy* [Physicochemical parameters of the formation of a layered gabbro-hyperbasite complex in ophiolites of South Tuva] // in: Abstracts, 3rd Int. Conf. Mafic-ultramafic complexes of folded regions and related deposits. Vol. 2. UrO RAN, Yekaterinburg, 2009. pp. 195–198. In Russian
- Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Kononkova N.N. *Novye dannye po petrologii sibirskikh meimechitov* [New data on the petrology of Siberian meimechites] // *Geokhimiya*. 1991. N 8. pp. 1084–1095. In Russian
- Sobolev A.V., Kuzmin D.V., Sobolev S.V., Petrunin A.G., Malitch K.N. Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. V. 50 (12). pp. 999–1033.
- Ariskin A.A., Barmina G.S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // *Geochemistry International*. 2004. V. 42 (Suppl. 1). pp. S1–S157.
- Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chemical Geology*. 2014. V. 368. pp. 1–10
- Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. *Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes* // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 29 July 2011. 2011. V. 12. N 7. Q07021.
- Simonov V.A., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V., Prikhodko V.S. Ultrabasic igneous province of the Siberian Platform: physical and chemical conditions of intrusive complexes formation // *Large Igneous Provinces through earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues*. Abstract volume of the 7 International conferences. Tomsk: CSTI Publishing house, 2019. pp. 130–131.
- Wan Z., Coogan L.A., Canil D. Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a Geothermometer // *American Mineralogist*. 2008. V. 93. pp. 1142–1147.

Author's:

Simonov Vladimir A., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Researcher, Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia; scientific researcher, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: simonov@igm.nsc.ru.

Vasiliev Yury A., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; scientific researcher, Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: meimech@igm.nsc.ru

Kotlyarov Alexey V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Researcher, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

Nikolenko Eugeny I., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Research Geological Enterprise AK "ALROSA" (PAO), Mirny, Russia.

E-mail: nevgeny@igm.nsc.ru