

УДК 548.4: 549.5

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-5

МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС УЛЬТРАБАЗИТОВ КУРТУШИБИНСКОГО ОФИОЛИТОВОГО ПОЯСА (ЗАПАДНЫЙ САЯН)

В.А. Симонов^{1,2,3}, А.И. Чернышов⁴, А.В. Котляров^{1,3}

¹ Институт геологии и минералогии СО РАН, пр. Академика Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090, Россия;
kotlyarov@igm.nsc.ru

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
ул. Пирогова 1, г. Новосибирск, 630090 Россия

³ Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008 Россия

⁴ Томский государственный университет, пр. Ленина 36, г. Томск, 634050 Россия

Статья поступила в редакцию 24.03.2022 г., принята к печати 19.04.2022 г.

MINERALOGY AND GENESIS OF ULTRAMAFIC ROCKS FROM THE KURTUSHIBA OPHIOLITE BELT (WESTERN SAYAN)

V.A. Simonov^{1,2,3}, A.I. Chernyshov⁴, A.V. Kotlyarov^{1,3}

¹ Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, pr. Akademika Koptugy 3, Novosibirsk, 630090, Russia;
kotlyarov@igm.nsc.ru

² Novosibirsk National Research State University, ul. Pirogova 1, Novosibirsk, 630090 Russia

³ Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya 18, Kazan, 420008 Russia

⁴ Tomsk State University, pr. Lenina 36, Tomsk, 634050 Russia

Received 24.03.2022, accepted 19.04.2022

Аннотация. Исследования минералов и расплавных включений в ультрабазитах Куртушибинского офиолитового пояса в Западном Саяне позволили установить условия минералообразования при их формировании. Рассмотрены особенности состава минералов в ультраосновных породах Иджимского, Калнинского и Эргакского массивов. Присутствие расплавных включений прямо указывает на магматогенное происхождение части хромшпинелидов из дунитов Иджимского массива. Важной является тесная ассоциация шпинелей из хромититов с магматогенными хромшпинелидами в одной группе, что свидетельствует о возможном формировании хромитового оруденения при участии расплавов. Изучение расплавных включений в минералах выявило эволюцию расплавов (пикриты – пикробазальты – базальты – андезибазальты) в процессе последовательной кристаллизации минералов в породах офиолитовой ассоциации Западного Саяна. Расчетное моделирование на основе данных по составам включений и оливинов свидетельствует о том, что кристаллизация оливина при формировании ультрабазитов куртушибинских офиолитов происходила при падении давления от 9.2 до 6.2 кбар и температуры от 1550 до 1430 °С из пикритовых расплавов, эволюционирующих до пикробазальтовых расплавов. При снижении давления до 3.8–2.3 кбар и температур пикробазальтовых расплавов (1240–1230 °С) образование оливина прекращалось и происходила кристаллизация клинопироксена из базальтовых магм при 2.7–1.9 кбар и около 1215 °С. На постмагматическом этапе пластические деформации ультрабазитов Западного Саяна происходили при снижении температуры от 850 до 640 °С, приводя к последовательной смене протогранулярных структур мезогранулярными и далее порфирокластовыми и порфиroleйстовыми.

Ключевые слова: условия кристаллизации минералов, ультрабазиты, офиолиты Западного Саяна, расплавные включения в хромшпинелидах.

Abstract. The studies of minerals and melt inclusions in ultramafic rocks of the Kurtushiba ophiolite belt (Western Sayan) allowed us to establish the conditions of mineral-forming processes during their formation. The features of the compositions of minerals of ultramafic rocks of the Idzhim, Kalny and Ergaki massifs are considered. The presence of melt inclusions directly indicates a magmatic origin of some Cr-spinels from dunites of the Idzhim massif. A close assemblage of Cr-spinels from chromitites with igneous Cr-spinels is important because of the possible formation of chromite ore from melts. The study of melt inclusions revealed the evolution of melts (picrites – picrobasalts – basalts – basaltic andesites) during the consecutive crystallization of minerals from the Western Sayan ophiolites. Computational modeling based on the compositions of melt inclusions and olivine indicates that olivine of ultramafic rocks of the Kurtushiba ophiolites crystallized at a decreasing pressure from 9.2 to 6.2 kbar and a decreasing temperature from 1550 to 1430 °C from picritic melts, which evolved to picrobasaltic melts. With a decrease in pressure to 3.8–2.3 kbar and temperature of picrobasaltic melts (1240–1230 °C), the formation of olivine terminated following by the crystallization of clinopyroxene from basaltic magmas at 2.7–1.9 kbar and about 1215 °C. The postmagmatic stage was characterized by plastic deformations of the Western Sayan ultramafic rocks at a decreasing temperature from 850 to 640 °C, which resulted in a successive change from protogranular to mesogranular structures and then to porphyroclastic and porphyroleitic structures.

Keywords: conditions of mineral crystallization, ultramafic rocks, ophiolites of the Western Sayan, melt inclusions in Cr-spinels.

Для цитирования: Симонов В.А., Чернышов А.И., Котляров А.В. Минералогия и генезис ультрабазитов Куртушибинского офиолитового пояса (Западный Саян). Минералогия, 8(2), 49–62. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-8-2-5

For citation: Simonov V.A., Chernyshov A.I., Kotlyarov A.V. Mineralogy and genesis of ultramafic rocks from the Kurtushiba ophiolite belt (Western Sayan) Mineralogy, 8(2), 49–62. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-8-2-5.

Введение

Впервые о присутствии в Западном Саяне ультрабазитов сообщалось в работе А.Г. Сивова и Г.В. Пинуса (1934) и в дальнейшем они рассматривались во многих публикациях (Пинус и др., 1958; Пинус, Колесник, 1966; Гончаренко, 1989; Петрология..., 1977; Кузнецов, 1980; Сибилев, 1980; Симонов, 1993; Чернышов и др., 2019). В Западном Саяне выделяются три офиолитовых пояса, содержащих ультрабазиты: Северо-Саянский, Борусский и Куртушибинский (рис. 1). Наиболее детально нами были рассмотрены ультраосновные породы из Иджимского, Калнинского и Эргакского массивов, входящие в состав Куртушибинского офиолитового пояса.

Отличительной чертой наших исследований является сочетание данных по составу минералов с результатами изучения расплавных включений в хромшпинелидах, позволившее не только рассмотреть минералогия ультрабазитов Западного Саяна, но и установить физико-химические условия минералообразования с помощью расчетного моделирования. В статье приводится значительный объем новой оригинальной информации, а также обобщены опубликованные данные.

Методы исследования

Изучены образцы, собранные авторами во время многочисленных экспедиционных работ в Западном Саяне, начиная с 1975 г. Особенности минералогии и физико-химических параметров кристаллизации ультрабазитов из Куртушибинского офиолитового пояса в Западном Саяне установлены с помощью анализа первичных минералов (оливинов, хромшпинелидов, ортопироксенов, клинопироксенов) и экспериментальных исследований расплавных включений в хромшпинелидах.

Расплавные включения изучены в Институте геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). В связи с тем, что изучаемые хромшпинелиды практически непрозрачны и непосредственные наблюдения за включениями в процессе нагрева в них проводить невозможно, была разработана особая методика экспериментов и создана специальная микротермокамера на основе силитового нагревателя. Проба (около 50–100 зерен хромшпинелидов размером 0.25–1.00 мм) помещалась в миниконтейнер и нагревалась в микрокамере при визуальном контроле под стереомикроскопом. Эксперименты при высоких температурах проводились на основе имеющихся методик иссле-

дования расплавных включений (Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994) с учетом невысокой вязкости расплавов и сведения к минимуму возможности растворения матрицы хромита-хозяина: нагрев до 1000–1100 °С (8–10 мин), постепенный нагрев до 1250–1275 °С (до 10 мин), закалка при резком удалении миниконтейнера с пробой из микротермокамеры на холодную металлическую пластину. В дальнейшем прогретые зерна хромита полировались. Найденные в отраженном свете с помощью микроскопа включения анализировались в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) и ИГМ СО РАН на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro. Пределы обнаружения (мас. %) компонентов этим методом следующие: SiO_2 – 0.007, TiO_2 – 0.032, Al_2O_3 – 0.011, Cr_2O_3 – 0.019, FeO – 0.019, MnO – 0.034, MgO – 0.011, CaO – 0.008, Na_2O – 0.017, K_2O – 0.009, Cl – 0.017, P_2O_5 – 0.011. Стандартами при анализе на микрозонде служили ортоклаз (OR), альбит (AB), диопсид (DI), базальтовое стекло (GL).

Состав стекол расплавных включений проанализирован в ИГМ СО РАН на СЭМ LEO 1430 VP и 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. Погрешность определения основных компонентов ($C \geq 10$ –15 мас. %) не превышает 1 отн. %. Погрешность определения компонентов 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).

Особенности физико-химических условий формирования минералов из ультрабазитов Куртушибинских офиолитов рассмотрены с помощью расчетного моделирования на основе составов расплавных включений и минералов с использованием программ COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004) и WinPLtb (Yavuz, Yildirim, 2018). Применение минералогических термобарометров (Fabries, 1979) позволило получить дополнительную информацию о физико-химических параметрах кристаллизации минералов из ультрабазитов Западного Саяна.

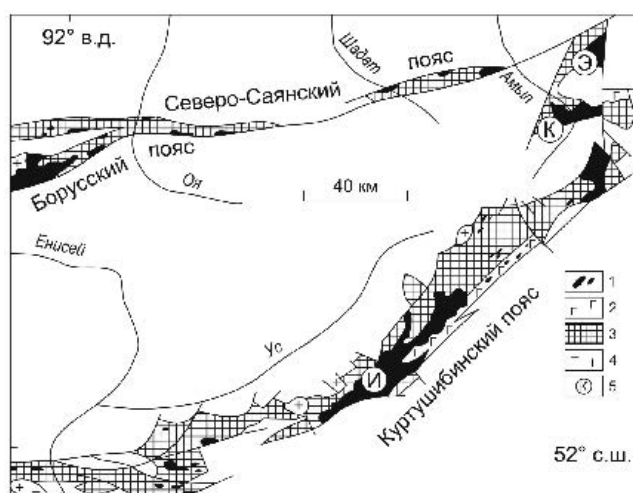


Рис. 1. Схема расположения офиолитовых поясов в Западном Саяне, составлена с использованием материалов из работ (Сибилев, 1980; Чернышов, Юричев, 2013).

1 – ультрабазиты; 2 – габброиды, дайковый комплекс; 3 – диабазовая толща, углисто-кремнистые сланцы (чингинская и нижнемонокская свиты); 4 – посторогенные граниты; 5 – ультрабазитовые массивы (И – Иджимский, К – Калнинский, Э – Эргакский).

Fig. 1. Schematic location of ophiolite belts in Western Sayany, composed using materials from (Sibilev, 1980; Chernyshov, Yurichev, 2013).

1 – ultramafic rocks; 2 – gabbroids, dike complex; 3 – diabase sequence, carbonaceous-siliceous shales (Chinga and Nizhnii Monok formations); 4 – postorogenic granites; 5 – ultramafic massifs (И – Idzhim, К – Kalny, Э – Ergak).

Геолого-петрологические особенности Куртушибинских офиолитов

В состав офиолитов Западного Саяна входит ряд ультрабазитовых массивов, среди которых выделяются Иджимский, Калнинский и Эргакский (рис. 1). Строение и состав полного разреза офиолитов детально исследованы нами в Иджимском массиве на участке р. Левый Коярд (рис. 1, 2). Здесь из керна скважин были отобраны образцы дунитов с хромшпинелидами. Также использовались данные по минералам из Калнинского и Эргакского ультраосновных массивов.

В состав Куртушибинских офиолитов входят следующие комплексы пород (Петрология..., 1977; Кузнецов, 1980; Сибилев, 1980; Симонов, 1993):

1. Основание разреза слагают гарцбургиты и дуниты с жилами вебстеритов и измененных габброидов. Мощность более 3 км.



Рис. 2. Схема геологического строения Куртушибинских офиолитов (Иджимский массив, участок р. Левый Коярд), составлена авторами.

1 – дуниты, гарцбургиты; 2 – серпентиниты; 3 – метаэффузивы, углисто-кремнистые сланцы (чингинская свита); 4 – переходный расслоенный дунит (серпентинит)-верлит-клинопироксенитовый комплекс; 5 – габброиды; 6 – дайковый диабазовый комплекс; 7 – эффузивно-осадочная толща офиолитов; 8 – примерные границы; 9 – разломы.

Fig. 2. Scheme of geological structure of the Kurtushiba ophiolites (Idzhim massif, area of the Levy Koyard River), composed by the authors.

1 – dunite, harzburgite; 2 – serpentinite; 3 – metaeffusive rocks, carbonaceous-siliceous shales (Chinga Formation); 4 – transitional layered dunite (serpentine)-wehrlite-clinopyroxenite complex; 5 – gabbroids; 6 – dike diabase complex; 7 – effusive-sedimentary sequence of ophiolites; 8 – approximate boundaries; 9 – faults.

2. Переходный расслоенный дунит (серпентинит)-верлит-клинопироксенитовый комплекс (0.2–0.3 км). В нижней части преобладают верлиты, верхняя часть имеет габбро-клинопироксенитовый состав.

3. Габбро и габбродиабазы. Мощность 1–1.5 км. Массивные среднезернистые габбро содержат крупнокристаллические габбро- и клинопироксенит-пегматиты, блоки серпентинизированных перидотитов и беспорядочно ориентированные диабазовые дайки.

4. Дайковый комплекс (1.5–2 км). В верховьях р. Левый Коярд выделяется серия параллельных диабазовых даек типа «дайка в дайке». Крупные дайки – прямолинейные, более мелкие – с изгибами. Характерны тонкие скрины мелкозернистого габбро, имеющего собственные зоны закалки и фактически являющегося «верхним габбро».

5. В эффузивно-осадочной толще офиолитов выделяются базальтовые порфириты и пирокластиты основного состава, а также туфопесчаники, алевролиты и т. п.

Состав минералов из ультрабазитов Куртушибинских офиолитов

В образцах ультрабазитов Куртушибинских офиолитов проанализированы оливины, хромшпинелиды, ортопироксены и клинопироксены.

Оливины из дунитов и гарцбургитов на диаграммах MnO–Fo и NiO–Fo частично располагаются в поле минералов из гарцбургитов Срединно-Атлантического хребта (САХ), также как и оливины из ультрабазитов Чаган-Узунского массива (Горный Алтай) и Оспинского массива (Восточный Саян). Оливины с повышенными значениями форстеритового компонента отличаются от океанических минералов, полностью совпадая с данными по минералам Восточного Саяна (рис. 3). В целом, видны общие черты рассмотренных офиолитов, которые содержат оливины с океаническими характеристиками.

Хромшпинелиды на диаграмме Cr#–Mg# отчетливо разбиваются на две группы. В состав пер-

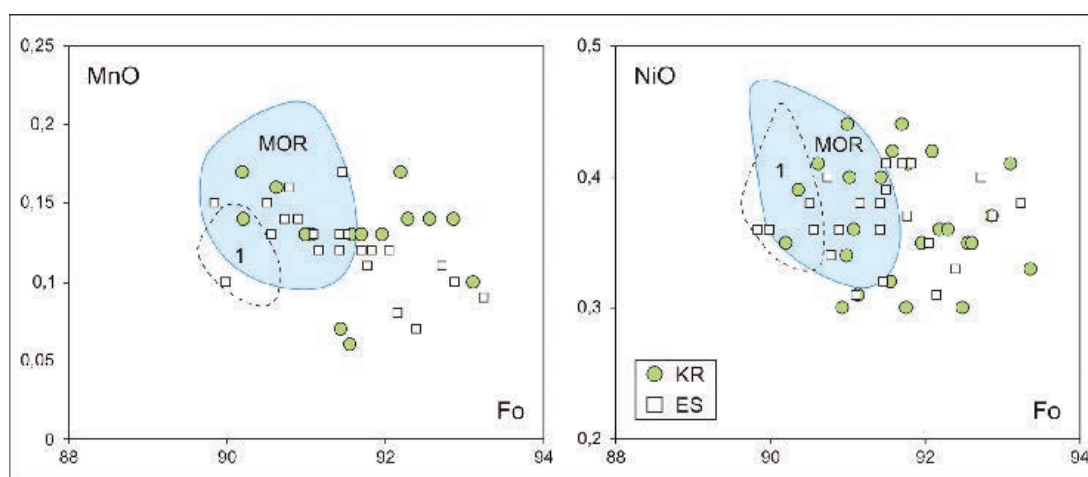


Рис. 3. Состав оливинов из ультрабазитов Куртушибинских офиолитов (KR) и дунитов и гарцбургитов Оспинского массива (Восточный Саян) (ES) на диаграммах MnO–Fo и NiO–Fo. Построено на основе оригинальных данных и материалов из работ (Гончаренко, 1989; Симонов и др., 1999; Анциферова, 2006; Рыбакова, 2019).

Поля составов оливинов из гарцбургитов: MOR – САХ и 1 – Чаган-Узунского массива (Горный Алтай). Fo – форстеритовый компонент.

Fig. 3. Composition of olivines from ultramafic rocks of the Kurtushiba ophiolites (KR) and harzburgites of the Ospinsky massif (East Sayany) (ES) on MnO–Fo and NiO–Fo diagrams. Based on original data and materials from (Goncharenko, 1989; Simonov et al., 1999; Antsiferova, 2006; Rybakova, 2019).

Compositional fields of olivines from harzburgites of: MOR – MAR and 1 – Chagan-Uzun massif (Gorny Altai). Fo – forsterite component.

вой (№ 1 на рис. 4) входят хромиты с расплавленными включениями и минералы из хромититов, образующие изометричное поле с повышенными значениями хромистости и магнетиальности. Для другой группы характерен прямолинейный тренд роста значений $\text{Cr}\#$ на фоне падения значений $\text{Mg}\#$ и переходом от океанических характеристик к островодужным. В начале тренда располагаются, в основном, хромшпинелиды из гарцбургитов, а в конце – преобладают более хромистые и менее магнетиальные хромиты из дунитов (рис. 4).

Тесная ассоциация магматогенных хромшпинелидов (табл. 1) в одной группе с минералами из хромититов свидетельствует о том, что в формировании хромитового оруденения Куртушибинских офиолитов могли участвовать расплавы.

Во второй группе хромшпинелиды разделяются на относительно низкохромистые (располагающиеся в океаническом поле и тесно ассоциирующие с хромитами из гарцбургитов офиолитов Горного Алтая) и с повышенными значениями $\text{Cr}\#$ (находящиеся в поле перидотитов фундамента островных дуг и глубоководных желобов), что свидетельствует о развитии палеогеодинамической ситуации от срединно-океанического хребта к островодужной системе.

Ортопироксены на диаграммах $\text{Cr}\#$ – $\text{Mg}\#$ и Al_2O_3 – $\text{Mg}\#$ разделяются на две группы. Пироксены с повышенной хромистостью и пониженным содержанием Al_2O_3 близки по составу к ортопироксенам из островодужных ультрабазитов. Другая группа пироксенов с минимальными значениями $\text{Cr}\#$ и максимумом содержания Al_2O_3 наиболее близка ортопироксенам гарцбургитов САХ. Подобное разделение отмечается и для ортопироксенов из гарцбургитов офиолитов Горного Алтая, при этом для пироксенов из офиолитов Восточного Саяна характерны исключительно островодужные характеристики (рис. 5).

Клинопироксены по соотношению миналов (En-Wo-Fs) принадлежат к диопсиду. На диаграмме TiO_2 – FeO они располагаются в поле клинопироксенов из ультраосновных пород САХ (рис. 6). По соотношению $\text{Cr}\#$ – $\text{Mg}\#$ клинопироксены также разбиваются на две группы, и наблюдается переход от океанических характеристик к островодужным (рис. 6). Повышенными значениями хромистости обладают клинопироксены, формирующие микрокристаллы в хромшпинелидах, в отличие от пироксенов из основной массы ультрабазитов.

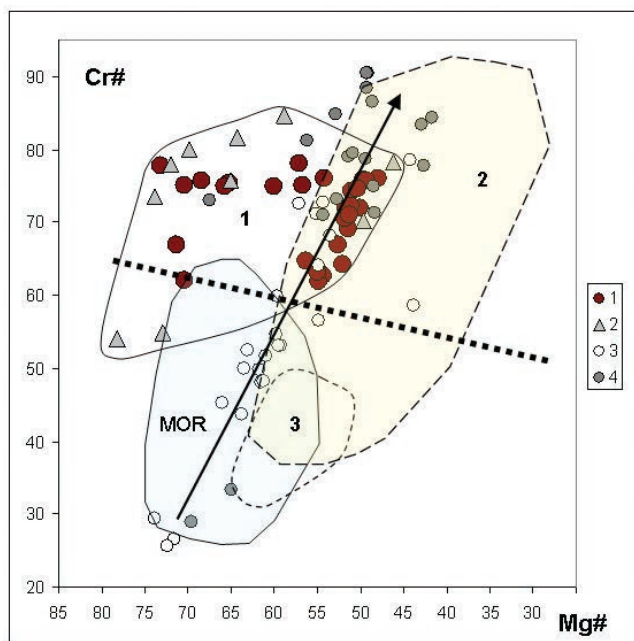


Рис. 4. Состав хромшпинелидов из ультрабазитов Куртушибинских офиолитов на диаграмме Cr#–Mg#. Построено на основе оригинальных данных и материалов из работ (Гончаренко, 1989; Паланджан, 1992; Симонов и др., 1999, 2009; Чернышов, Юричев, 2013; Рыбакова, 2019).

1–4 – хромшпинелиды Куртушибинских офиолитов: с расплавленными включениями из дунитов (1), без расплавленных включений из хромититов (2), гарцбургитов (3) и дунитов (4). Поля составов хромшпинелидов: с расплавленными включениями из дунитов + хромиты из хромититов Куртушибинских офиолитов (1), перидотитов (гарцбургиты) фундамента островных дуг и глубоководных желобов (2), гарцбургитов Чаган-Узунского массива (Горный Алтай, 3), ультрабазитов зоны разлома 15°20' СХА (MOR). Тренды: сплошная линия – хромшпинелиды без расплавленных включений из дунитов и гарцбургитов Куртушибинских офиолитов; точечная линия – хромшпинелиды с расплавленными включениями из дунитов Карашатского массива (Южная Тува) и перидотитов зоны разлома 15°20' СХА. Здесь и далее: $Cr\# = Cr \cdot 100 / (Cr + Al)$, $Mg\# = Mg \cdot 100 / (Mg + Fe^{2+})$.

Fig. 4. Composition of Cr spinels from ultramafic rocks of the Kurtushiba ophiolites on Cr#–Mg# diagram. Based on original data and materials from (Goncharenko, 1989; Palandzhyan, 1992; Simonov et al., 1999, 2009; Chernyshov, Yurichev, 2013; Rybakova, 2019).

1–4 – Cr-spinels from the Kurtushiba ophiolites: with melt inclusions from dunite (1), without melt inclusions from chromitite (2), harzburgite (3) and dunite (4). Compositional fields of Cr-spinels: with melt inclusions from dunite + chromite from chromitite of the Kurtushiba ophiolites (1), peridotite (harzburgite) of the basement of island arcs and deep-water trenches (2), harzburgite of the Chagan-Uzun massif (Gorny Altai, 3), ultramafic rocks of the 15°20' N

Fracture Zone, MAR (MOR). Trends: solid line – Cr-spinels without melt inclusions from dunite and harzburgite of the Kurtushiba ophiolites; dotted line – Cr-spinels with melt inclusions from dunite of the Karashat massif (South Tuva) and from peridotite of the 15°20' N Fracture Zone, MAR. Hereinafter: $Cr\# = Cr \cdot 100 / (Cr + Al)$, $Mg\# = Mg \cdot 100 / (Mg + Fe^{2+})$.

Расплавные включения в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов

Расплавные включения (20–50 мкм) в зернах хромшпинелидов располагаются равномерно и являются первичными. Форма включений округлая, равновесная, обычно с признаками негативной огранки. Основной объем в прогретых включениях (после высокотемпературных экспериментов и закалки) занимает однородное стекло, часто с круглыми газовыми пузырьками (рис. 7). Иногда присутствуют микрокристаллиты амфибола и магнетита. Эти данные свидетельствуют о гомогенизации в процессах полного расплавления содержимого включений и, соответственно, закаленное стекло содержит прямую информацию о составе расплава, из которого кристаллизовался хромшпинелид.

Состав стекол прогретых расплавных включений в хромшпинелидах приведен в таблице 2. Стекла прогретых и закаленных расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов по содержанию SiO_2 (41–54 мас. %) соответствуют серии (ультрамафиты – габбро – диабазовые дайки), породы которой представлены на участке р. Левый Коярд. На диаграмме $MgO-SiO_2$ включения показывают эволюцию состава: пикриты – пикробазальты – базальты – андезибазальты. Тренды включений в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов и Карашатских офиолитов (Южная Тува) практически совпадают, проходя через поле включений в шпинелях из океанических ультрабазитов (рис. 8).

Выделяется три группы включений с 1) максимальным содержанием MgO (29–19 мас. %) и минимальным – SiO_2 (41–46 мас. %), 2) промежуточным содержанием MgO (15–6 мас. %) и SiO_2 (45–49 мас. %) и 3) минимальным содержанием MgO (6–3 мас. %) и максимальным – SiO_2 (50–54 мас. %), ассоциирующих с пикритами (и включениями из океанических ультрабазитов), габброидами, базальтами и андезибазальтами, соответственно (рис. 8).

Таблица 1

Представительные анализы хромшпинелидов с расплавленными включениями из дунитов
Куртушибинских офиолитов (мас. %)

Table 1

Representative analyses of Cr-spinels with melt inclusions from dunites of the Kurtushiba ophiolites (wt. %)

№ п/п	№ ан.	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Сумма
1	3	н.о.	49.54	19.48	19.30	н.о.	11.68	100.00
2	4	н.о.	53.23	15.97	20.01	н.о.	10.79	100.00
3	11.2	н.о.	54.75	14.33	20.15	н.о.	10.77	100.00
4	11.3	н.о.	50.38	18.46	19.13	н.о.	12.04	100.01
5	11.4	н.о.	53.61	14.98	20.59	н.о.	10.82	100.00
6	11.5	н.о.	51.56	17.16	20.19	н.о.	11.10	100.01
7	1.1	н.о.	57.99	13.03	16.39	н.о.	12.59	100.00
8	1.2	н.о.	56.87	12.71	18.59	н.о.	11.82	99.99
9	1.3	н.о.	57.56	12.18	19.05	н.о.	11.21	100.00
10	1.4	н.о.	59.25	11.20	17.72	н.о.	11.83	100.00
11	1	н.о.	55.79	12.98	20.47	н.о.	10.52	99.76
12	2	н.о.	49.50	18.42	20.87	н.о.	11.03	99.82
13	3	н.о.	54.66	14.33	20.34	0.39	10.27	99.99
14	3а	н.о.	54.34	14.03	20.61	0.60	10.43	100.01
15	3а2	н.о.	53.53	14.65	20.72	0.35	10.56	99.81
16	82	0.01	55.46	11.95	16.70	0.39	14.14	98.65
17	83	0.02	48.95	20.07	14.98	0.34	15.30	99.66
18	84	0.02	51.05	16.94	15.69	0.44	15.21	99.35
19	85	0.01	56.00	12.23	16.90	0.36	13.47	98.97
20	86	0.01	58.15	11.15	14.03	0.31	15.21	98.86
21	87	0.00	57.23	12.82	15.27	0.24	13.68	99.24
22	88	0.01	57.90	12.86	13.62	0.25	14.78	99.42
23	46	0.03	55.29	11.70	23.76	0.00	9.87	100.65
24	48	0.03	56.45	12.16	21.06	0.03	10.08	99.81
25	50	0.05	48.61	20.14	19.68	0.00	11.83	100.31
26	51	0.06	49.05	19.26	19.44	0.00	11.72	99.53
27	53	0.04	55.60	12.74	20.78	0.03	10.31	99.50

Примечание. н.о. – ниже предела обнаружения.

Note. н.о. – below detection limit.

Характер изменения состава включений на диаграмме CaO–MgO близок к расчетному тренду модельных составов пород Карашатского массива (рис. 9). Информация, представленная на этом рисунке, подтверждает разделение расплавленных включений в хромшпинелидах на группы: первая с максимальным содержанием MgO располагается в поле ультрамафитов; вторая с максимальным содержанием CaO приурочена к габбро; третья группа с минимальным содержанием CaO тесно связана с диабазовыми дайками.

Также были установлены закалочные включения с аномально высоким содержанием CaO (21.50–21.85 мас. %, табл. 2), близким к составу клинопироксена. По содержанию большинства остальных компонентов эти включения заметно от-

личаются от данных по клинопироксенам, хорошо согласуясь с информацией по стеклам прогретых расплавленных включений в хромшпинелидах Куртушибинских офиолитов (табл. 2).

Вариационные диаграммы показывают соответствие трендов состава включений последовательности пород Куртушибинских офиолитов: ультрамафиты – габбро – диабазовые дайки (рис. 8, 9, 10). Составы включений в океанических хромшпинелидах обычно располагаются в начале трендов включений в офиолитовых хромитах. Необходимо отметить, что составы включений из хромшпинелидов Куртушибинских и Карашатского офиолитов близки, но в некоторых случаях заметно отличаются: в частности, для FeO (рис. 8, 9, 10).

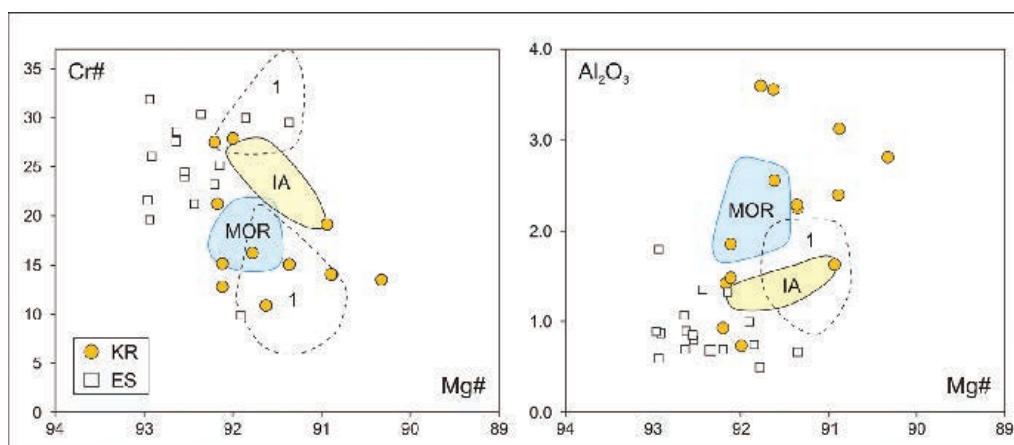


Рис. 5. Состав ортопироксенов из ультрабазитов Куртушибинских офиолитов (KR) и гарцбургитов Оспинского массива (Восточный Саян) (ES) на диаграммах Cr#–Mg# и Al_2O_3 –Mg#. Построено на основе оригинальных данных и материалов из работ (Савельева, 1987; Гончаренко, 1989; Симонов и др., 1999; Анциферова, 2006; Рыбакова, 2019).

Ортопироксены из гарцбургитов: 1 – Чаган-Узунского массива (Горный Алтай), MOR – САХ, IA – островодужных желобов Тихого океана.

Fig. 5. Composition of orthopyroxenes from ultramafic rocks of Kurtushiba ophiolites (KR) and harzburgite of the Ospa massif (Eastern Sayany) (ES) on Cr#–Mg# and Al_2O_3 –Mg# diagrams. Based on original data and materials from (Savel'eva, 1987; Goncharenko, 1989; Simonov et al., 1999; Antsiferova, 2006; Rybakova, 2019).

Orthopyroxenes from harzburgite of: 1 – Chagan-Uzun massif (Gorny Altai), MOR – MAR, IA – island-arc trenches of the Pacific Ocean.

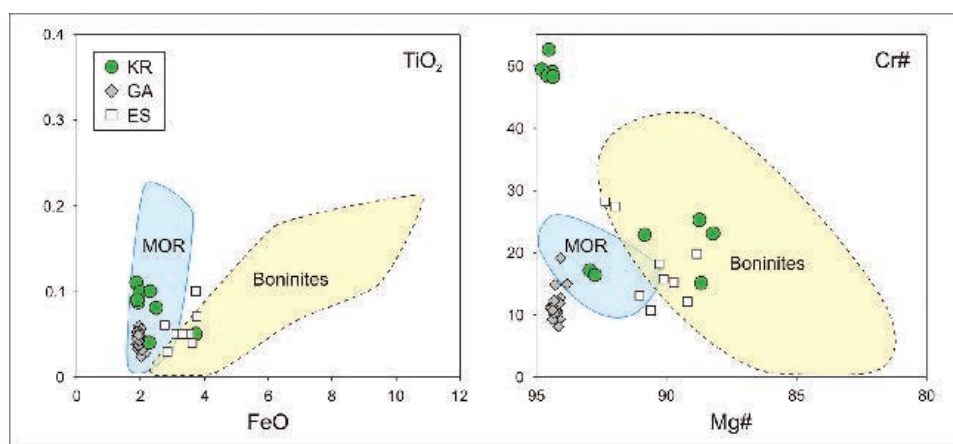


Рис. 6. Состав клинопироксенов из ультрабазитов Куртушибинских офиолитов (KR), пироксенитов Чаган-Узунского массива (Горный Алтай, GA) и пироксенитов и верлитов Оспинского массива (Восточный Саян, ES) на диаграммах TiO_2 –FeO и Cr#–Mg#. Построено на основе оригинальных данных и материалов из работ (Гончаренко, 1989; Симонов и др., 1994, 1999, 2009; Анциферова, 2006; Brunelly et al., 2006; Kotlyarov et al., 2018).

Клинопироксены из ультрабазитов САХ (MOR) и бонинитов Курайских офиолитов (Горный Алтай) (Boninites).

Fig. 6. Composition of clinopyroxenes from ultramafic rocks of the Kurtushiba ophiolites (KR), pyroxenites of the Chagan-Uzun massif (Gorny Altai, GA) and pyroxenites and wehrlites of the Ospa massif (Eastern Sayany, ES). Based on original data and materials from (Goncharenko, 1989; Simonov et al., 1994, 1999, 2009; Antsiferova, 2006; Brunally et al., 2006; Kotlyarov et al., 2018).

Clinopyroxenes from MAR ultramafic rocks (MOR) and boninites of the Kurai ophiolites (Gorny Altai) (Boninites).

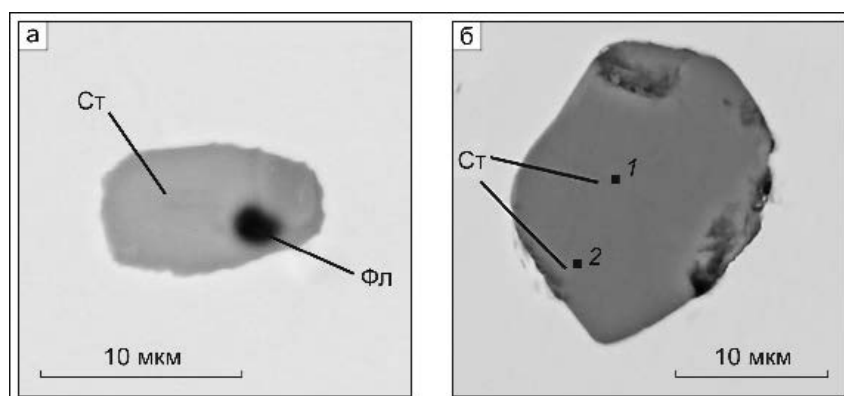


Рис. 7. Расплавные включения в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов после высокотемпературных экспериментов в микротермокамере и закалки.

СТ – закалочное стекло. Фл – флюидный пузырек. СЭМ-фото. 1, 2 – точки анализов гомогенного стекла.

Fig. 7. Melt inclusions in Cr-spinels from dunite of the Kurtushiba ophiolites after high-temperature experiments in microchamber and quenching.

СТ – quenched glass. Фл – fluid bubble. SEM images. 1, 2 – points of analysis of homogeneous glass.

Таблица 2

Представительные анализы гомогенных стекол прогретых расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов (мас. %)

Table 2

Representative analyses of homogeneous glasses of heated melt inclusions in Cr-spinels from dunites of the Kurtushiba ophiolites (wt %)

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	37*	52.12	0.12	8.63	1.30	16.23	0.10	8.23	11.08	0.25	0.15	98.20
2	38	51.20	0.11	8.83	1.28	16.81	0.09	10.59	11.14	0.31	0.13	100.49
3	39	53.27	0.11	9.46	1.27	13.79	0.09	9.99	11.76	0.27	0.19	100.20
4	3	47.63	н.о.	13.92	1.47	9.17	н.о.	9.06	14.32	4.19	0.24	100.00
5	4	42.18	н.о.	6.93	2.37	11.71	н.о.	29.13	7.69	н.о.	н.о.	100.01
6	11, 3	48.98	н.о.	16.69	1.74	6.78	н.о.	7.61	13.46	4.40	0.35	100.01
7	11, 3	44.34	н.о.	11.35	2.84	5.99	н.о.	19.26	11.87	2.14	0.20	97.99
8	4	53.25	0.11	12.60	0.77	6.52	0.07	5.40	21.85	0.32	0.15	101.05
9	5*	52.35	0.13	12.83	0.80	6.46	0.05	5.45	21.88	0.34	0.15	100.43
10	7*	52.38	0.11	13.06	1.52	7.23	0.06	5.31	21.50	0.29	0.01	101.46
11	32	51.31	0.10	18.28	1.37	4.54	0.04	4.69	18.43	0.19	0.19	99.13
12	33	51.05	0.09	18.02	1.18	4.50	0.03	5.67	18.42	0.22	0.19	99.36
13	34	50.99	0.09	18.07	1.33	4.48	0.03	4.65	18.17	0.23	0.17	98.20
14	100	46.82	0.12	13.66	1.22	5.75	0.15	11.76	16.98	3.42	0.67	100.55
15	102	43.74	0.07	10.90	1.29	6.45	0.21	21.14	11.41	1.68	0.40	97.29
16	10	52.80	0.13	21.84	1.09	3.40	0.04	4.75	16.63	0.23	0.87	101.78
17	104	46.95	0.11	13.06	1.49	7.14	0.14	10.29	16.35	3.77	0.49	99.79
18	105	44.63	0.05	11.78	1.87	12.24	0.24	9.60	14.62	4.82	0.48	100.33
19	1	50.13	0.00	13.46	2.15	10.94	0.00	6.05	14.19	2.09	0.73	99.74
20	2	50.88	0.22	15.31	2.26	10.00	0.00	3.81	13.46	2.74	1.01	99.69
21	4	49.88	0.00	14.76	1.88	11.24	0.00	4.73	14.16	2.46	0.89	100.00

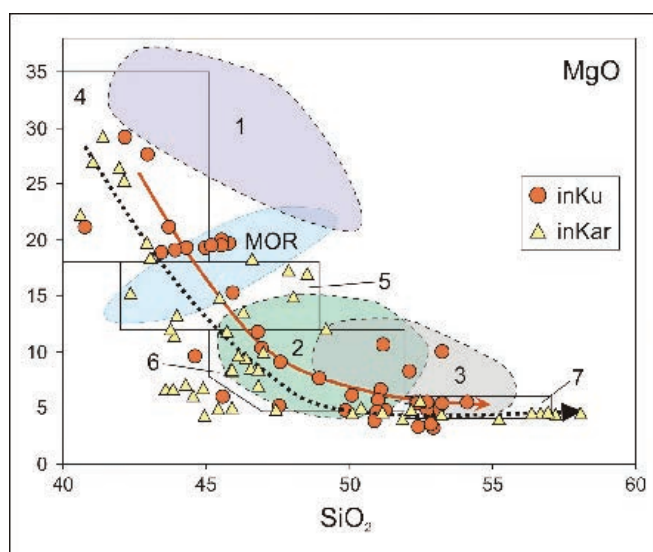


Рис. 8. Состав расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов (InKu) и Карашатского массива (InKar) на диаграмме MgO-SiO_2 . Построено на основе оригинальных данных и материалов из работ (Петрология..., 1977; Магматические..., 1983; Петрографический..., 2009; Симонов и др., 2009).

Здесь и на рис. 10, поля пород: 1–3 – Куртушибинские офиолиты: 1 – пироксениты, 2 – габбро, 3 – диабазовые дайки; 4 – пикриты; 5 – пикробазальты; 6 – базальты; 7 – андезитобазальты. MOR – расплавные включения в хромшпинелидах из ультрабазитов САХ. Тренды расплавных включений в хромшпинелидах Куртушибинских офиолитов (сплошная линия) и Карашатского массива (точечная линия).

Fig. 8. Composition of melt inclusions in Cr-spinels from dunites of the Kurtushiba ophiolites (InKu) and Karashat massif (InKar) on MgO-SiO_2 diagram. Based on original data and materials from (Petrology..., 1977; Igneous..., 1983; Petrographic..., 2009; Simonov et al., 2009).

Here and in Fig. 10, compositional fields of rocks: 1–3 – Kurtushiba ophiolites: 1 – pyroxenites, 2 – gabbro, 3 – diabase dikes; 4 – picrite; 5 – picrobasalt; 6 – basalt; 7 – basaltic andesite. MOR – melt inclusions in Cr-spinels from MAR ultramafic rocks. Trends of melt inclusions in Cr-spinels: Kurtushiba ophiolites (solid line) and Karashat massif (dotted line).

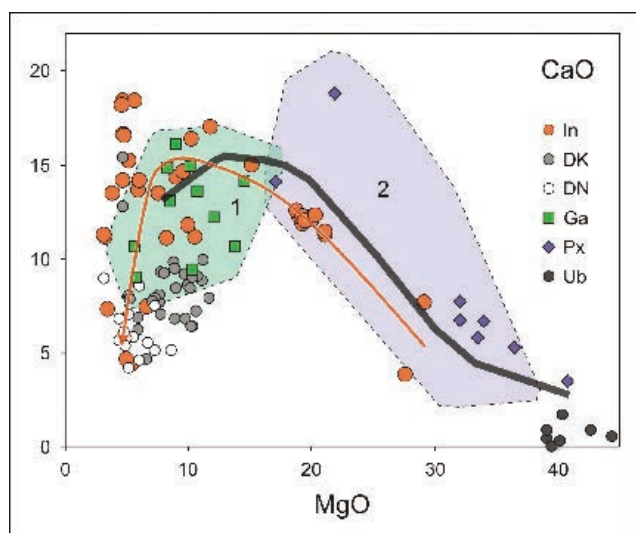


Рис. 9. Состав пород и расплавных включений из различных офиолитов на диаграмме CaO-MgO . Построено на основе оригинальных данных и материалов из работ (Петрология..., 1977; Симонов, 1993; Симонов и др., 1999; Куренков и др., 2002; Шелепаев, 2006).

In – расплавные включения в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов. Дайки из Куртушибинских (DK) и Северо-Саянских (DN) офиолитов. Габбро (Ga), пироксениты, верлиты (Px), дуниты, гарцбургиты (Ub) Куртушибинских офиолитов. Поля: 1, 2 – габбро (1) и клинопироксениты + верлиты (2) Карашатского офиолитового массива (Южная Тува). Черная линия – расчетный тренд модельных составов пород Карашатского массива. Коричневая линия – тренд расплавных включений в хромшпинелидах Куртушибинских офиолитов.

Fig. 9. Composition of rocks and melt inclusions from various ophiolites on CaO-MgO diagram. Based on original data and materials from (Petrology..., 1977; Simonov, 1993; Simonov et al., 1999; Kurenkov et al., 2002; Shelepaev, 2006).

In – melt inclusions in Cr-spinel from dunite of the Kurtushiba ophiolites. Dikes from the Kurtushiba (DK) and Northern Sayan (DN) ophiolites. Gabbro (Ga), pyroxenite, wehrlite (Px), dunite, harzburgite (Ub) of the Kurtushiba ophiolites. Fields: 1, 2 – gabbro (1) and clinopyroxenite + wehrlite (2) of the Karashat ophiolite massif (South Tuva). Black line – calculated trend of the model composition of rocks of the Karashat massif. Brown line – trend of melt inclusions in Cr-spinels from the Kurtushiba ophiolites.

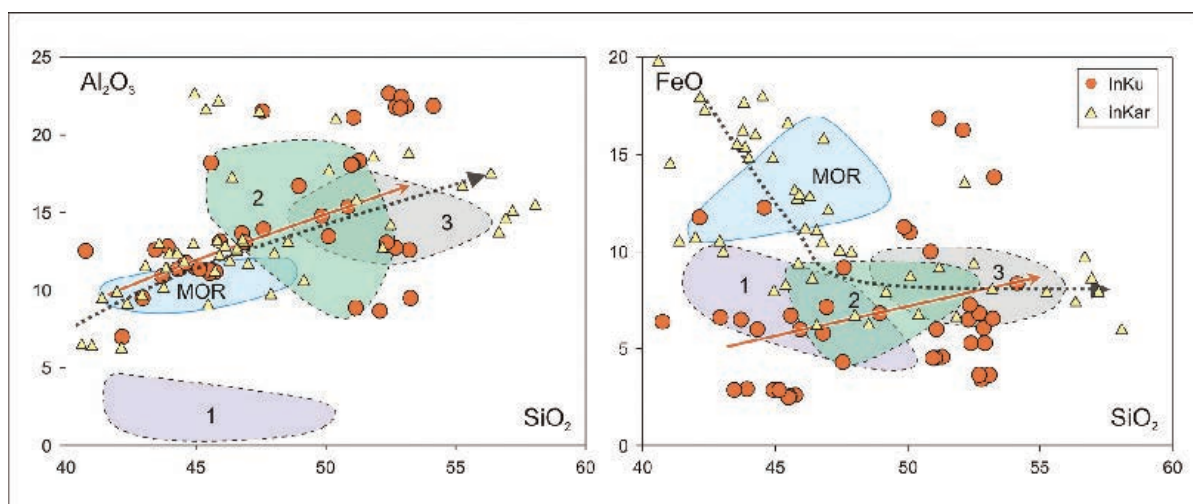


Рис. 10. Состав расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов (InKu) и Карашатского массива (InKar) на диаграммах Al_2O_3 – SiO_2 и FeO – SiO_2 . Построено на основе оригинальных данных и материалов из работы (Петрология..., 1977).

Fig. 10. Composition of melt inclusions in Cr-spinels from the Kurtushiba ophiolites (InKu) and Karashat massif (InKar) on Al_2O_3 – SiO_2 and FeO – SiO_2 diagrams. Based on original data and materials from (Petrology..., 1977).

Обсуждение результатов

На основе данных по первичным минералам (оливины, хромшпинелиды, ортопироксены, клинопироксены) и расплавным включениям в хромшпинелидах установлены параметры минералообразующих процессов при формировании ультрабазитов из Куртушибинских офиолитов в Западном Саяне.

Прежде всего, присутствие расплавных включений в хромшпинелидах является прямым доказательством магматогенного происхождения части дунитов, принадлежащих, наиболее вероятно, к переходному расслоенному комплексу Куртушибинских офиолитов. При этом хромиты с включениями образуют компактную группу с повышенными значениями хромистости и магнезиальности в отличие от обычных хромшпинелидов, для которых характерен отчетливый прямолинейный тренд роста значений $\text{Cr}\#$ на фоне падения значений $\text{Mg}\#$. Важной является тесная ассоциация шпинелей из хромититов с магматогенными хромшпинелидами в одной группе, что свидетельствует о возможном формировании хромитового оруденения Куртушибинских офиолитов при участии расплавов.

Исследования расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов показали, что они отражают эволюцию расплавов (пикриты – пикробазальты – базальты – андезибазальты) в процессах последовательной кристалли-

зации офиолитовых пород от ультрамафитов через габбро к диабазовым дайкам.

С помощью программы COMAGMAT (Ariskin, Varmina, 2004) на основе состава расплавных включений в хромшпинелидах проведено расчетное моделирование кристаллизации расплава в ходе декомпрессионных процессов. В начале (прежде всего, для оценки реально возможного давления) рассматривалась равновесная декомпрессионная кристаллизация с широкими вариациями значений давления от 10 до 2 кбар, буфере QFM и $dP/dF = 0.1$ моль. Состав исходной магмы принят по расплавному включению с содержанием MgO 29.13 мас. % (табл. 2), располагающемуся в пикритовом поле в начале тренда расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Куртушибинских офиолитов (рис. 8). Начальное содержание H_2O задавалось согласно результатам непосредственных анализов расплавных включений – 0.1 мас. %.

На основе сравнения расчетных и эмпирических составов оливинов из дунитов Куртушибинских офиолитов ($\text{Fo} = 90\text{--}93$) оценены давление и температура кристаллизации изученных оливинов: 9.2–6.2 кбар и 1550–1430 °C. Эти параметры характеризуют процессы образования мономинеральных оливиновых дунитов из пикритовых расплавов, которые в дальнейшем эволюционируют со снижением содержания MgO .

На рис. 8 значительная часть включений располагается на границе пикритов с пикробазаль-

тами при содержании MgO около 19 мас. %. Соответственно, было логично рассчитать условия кристаллизации расплавов такого состава в программе COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004) при декомпрессии (6–1 кбар), буфере QFM, $dP/dF = 0.1$ моль и содержании H_2O 0.15 мас. %. Состав исходной магмы принят по расплавному включению с содержанием MgO 19.26 мас. % (табл. 2), располагающемуся в группе на границе между пикритами и пикробазальтами (рис. 8). В итоге выяснено, что при снижении температур и давлений (до 1240–1230 °C и 3.1–2.3 кбар) образование оливина прекращается и идет кристаллизация клинопироксена и плагиоклаза в габброидной системе.

Составы клинопироксенов и расплавных включений в хромшпинелидах позволяют рассчитать *PT*-параметры кристаллизации пироксенов Куртушибинских офиолитов с помощью программы WinPLtb (Yavuz, Yildirim, 2018). В качестве исходного был принят состав расплавного включения с содержанием MgO 19.26 мас. % (табл. 2), который был использован и при моделировании в программе COMAGMAT. Полученные параметры (1230 °C, 3.8–2.5 кбар), практически совпадают с результатами моделирования в программе COMAGMAT. Расчеты в программе WinPLtb по расплавному включению «габброидного» состава (SiO_2 46.82 мас. %, MgO 11.76 мас. %) позволили установить кристаллизацию клинопироксенов при 1215 °C и 2.7–1.9 кбар.

Последующая история развития ультрабазитов Куртушибинских офиолитов на постмагматическом этапе связана с процессами пластических деформаций ультраосновных пород (Гончаренко, 1989; Чернышов, Юричев, 2013; Чернышов и др., 2016; 2018; Рыбакова, 2019), параметры которых были рассчитаны с помощью геотермометра Фабри (Fabries, 1979). Преимущество этого геотермометра состоит в том, что он отражает перераспределение Fe и Mg в парагенезисе оливин-хромшпинелид на различных стадиях эволюции ультраосновных массивов и регистрирует термальные уровни динамического равновесия, связанные с эволюцией ультрабазитов.

Расчеты показали, что относительно высокотемпературными образованиями в ультрабазитовых комплексах Куртушибинских офиолитов являются хромититы (около 1000 °C), что согласуется с их возможным магматогенным происхождением, установленным нами по тесной ассоциации с хромшпинелидами, содержащими расплавные включения (рис. 4).

Среди пластически деформированных ультрабазитов Куртушибинских офиолитов повышенными температурами (850–770 °C) оливин-хромитового равновесия обладают ультраосновные породы с протогранулярными и мезогранулярными структурами. Отмечается уменьшение температур от протогранулярных к мезогранулярным ультрабазитам, которые отражают смену высокотемпературных систем трансляционного скольжения от (010)[100] к {0kl}[100]. Для ультрабазитов с порфирокластовыми и порфиroleйстовыми структурами характерен значительный диапазон вариаций температурных равновесий от 800 до 640 °C, что обусловлено неравновесностью проявления пластического течения, осуществляемого как трансляционным скольжением по системам {0kl}[100] и (110)[001], так и синтектонической рекристаллизацией в условиях комбинации осевых и сдвиговых деформаций при увеличении скорости, возрастающей роли стресса и снижения температур.

Основные выводы

1. Данные по расплавленным включениям являются прямым доказательством магматогенного происхождения части хромшпинелидов из ультрабазитов Куртушибинского офиолитового пояса в Западном Саяне. Важным является тесная ассоциация шпинелей из хромититов с магматогенными хромшпинелидами, что свидетельствует о возможном формировании хромитового оруденения при участии расплавов.

2. Расплавные включения в хромшпинелидах разделяются на три группы: связанную с ультрамафитами (с максимальными содержаниями MgO), приуроченную к габбро (с максимальными содержаниями CaO) и тесно ассоциирующую с дайками (с максимальными содержаниями SiO_2). Эти группы отражают эволюцию расплавов (пикриты – пикробазальты – базальты – андезибазальты) в процессах последовательной кристаллизации минералов ультрабазит-базитовых пород из Куртушибинских офиолитов.

3. Расчетное моделирование на основе составов расплавных включений в хромшпинелидах показало, что кристаллизация оливина при формирования ультрабазитов Куртушибинского офиолитового пояса происходила при снижении давления от 9.2 до 6.2 кбар и температур от 1550 до 1430 °C из пикритовых расплавов, эволюционирующих до пикробазальтовых расплавов.

4. При снижении давления и температуры пикробазальтовых расплавов (до 3.8–2.3 кбар и 1240–1230 °С, соответственно) образование оливины прекращалось и происходила кристаллизация клинопироксена из базальтовых магм при давлении 2.7–1.9 кбар и температуре около 1215 °С.

5. На постмагматическом этапе процессы пластических деформаций ультрабазитов Куртушибинских офиолитов происходили при снижении температуры от 850 до 640 °С, приводя к последовательной смене протогранулярных структур мезогранулярными и далее порфирокластовыми и порфиroleйстовыми.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и договора № 14.Y26.31.0029.

Литература

- Анциферова Т.Н. (2006) Петролого-минералогические особенности гипербазитов Оспинского массива (Восточный Саян). *Дисс. канд. геол.-мин. наук*. Улан-Удэ, 172 с.
- Гончаренко А.И. (1989) Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск, ТГУ, 404 с.
- Кузнецов П.П. (1980) Структурные особенности гипербазитовых поясов Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск, Наука, 97 с.
- Куренков С.А., Диденко А.Н., Симонов В.А. (2002) Геодинамика палеоспрединга. М., ГЕОС, 294 с.
- Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В. (2015) Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? *Геология и геофизика*, **56**(8), 1473–1482.
- Магматические горные породы. Т. 1 (1983) М., Наука, 768 с.
- Паланджан С.А. (1992) Типизация мантийных перидотитов по геодинамическим обстановкам формирования. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 104 с.
- Петрографический кодекс России. Издание третье. (2009) Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 200 с.
- Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна) (1977). Новосибирск, Наука, 220 с.
- Пинус Г.В., Колесник Ю.Н. (1966) Альпинотипные гипербазиты юга Сибири. М., Наука, 211 с.
- Пинус Г.В., Кузнецов В.А., Волохов И.М. (1958) Гипербазиты Алтае-Саянской складчатой области. М., Госгеолтехиздат, 295 с.
- Рыбакова А.В. (2019) Петрология хромитоносных ультрамафитов Калнинского и Эргакского массивов (северо-восток Западного Саяна). *Дисс. канд. геол.-мин. наук*. Томск, 151 с.
- Савельева Г.Н. (1987) Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М., Наука, 246 с.
- Сибилев А.К. (1980) Петрология и асбестонность офиолитов (на примере Иджимского массива в Западном Саяне). Новосибирск, Наука, 216 с.
- Сивов А.Г. Пинус Г.В. (1934) К вопросу о поисках асбеста и платины в бассейне р. Ус в Западном Саяне. *Вестник Западно-Сибирского геолого-гидрогеологического треста*, **2**, 74–75.
- Симонов В.А. (1993) Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ИИГМ СО РАН, 247 с.
- Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Буслов М.М. (1994) Бонинитовые серии в структурах Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, **35**(7–8), 182–199.
- Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А. (1999) Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск, СО РАН, ИИЦ ИИГМ, 224 с.
- Симонов В.А., Шелепаев Р.А., Котляров А.В. (2009) Физико-химические параметры формирования расслоенного габбро-гипербазитового комплекса в офиолитах Южной Тувы / Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Т.2. Екатеринбург, ИГТ УрО РАН. 195–198.
- Чернышов А.И., Юричев А.Н. (2013) Петроструктурная эволюция ультрамафитов Калнинского хромитоносного массива в Западном Саяне. *Геотектоника*, **4**, 31–46.
- Чернышов А.И., Кичеева А.В., Подлипский М.Ю. (2016) Петроструктурные неоднородности ультрамафитов Эргакского хромитоносного массива (Западный Саян). *Записки Российского минералогического общества*, **145**(5), 25–38.
- Чернышов А.И., Лоскутов И.Ю., Кичеева А.В., Подлипский М.Ю. (2018) Потенциальная хромитоносность ультрамафитов Эргакского массива, Северо-Восток Западного Саяна. *Руды и металлы*, **1**, 47–53.
- Чернышов А.И., Юричев А.Н., Кичеева А.В. (2019) Петрогеохимические особенности хромитоносных ультрамафитов Куртушибинского офиолитового пояса (Западный Саян). *Литосфера*, **19**(5), 687–703.
- Шелепаев Р.А. (2006) Эволюция базитового магматизма Западного Сангилена. *Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук*. Новосибирск, ИГМ СО РАН, 12 с.
- Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, **42** (Suppl. 1), S1-S157.
- Brunelli D., Seyler M., Cipriani A., Ottolini L., Bonatti E. (2006) Discontinuous melt extraction and weak refertilization of mantle peridotites at the Vema lithospheric section (Mid-Atlantic Ridge). *Journal of Petrology*, **47**(4), 745–771.

Fabries J. (1979) Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **69**(4), 329–336.

Kotlyarov A.V., Simonov V.A., Safonova I.Yu. (2018) Boninites as a criterion for the geodynamic development of magmatic systems in paleosubduction zones in Gorny Altai. *Geodynamics & Tectonophysics*, **9**(1), 39–58.

Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. (1994) Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga trench: Constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, **35**, 1183–1211.

Yavuz F., Yildirim D.K. (2018) Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, **87**, 149–172.

References

Antsiferova T.N. (2006) [Petrological-mineralogical features of ultramafic rocks of the Ospa massif (East Sayan)]. *Dissertatsiya kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk*. Ulan-Ude, 172 p. (in Russian)

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

Brunelli D., Seyler M., Cipriani A., Ottolini L., Bonatti E. (2006) Discontinuous melt extraction and weak refertilization of mantle peridotites at the Vema lithospheric section (Mid-Atlantic Ridge). *Journal of Petrology*, **47**(4), 745–771.

Chernyshov A.I., Yurichev A.N. (2013) Petrostructural evolution of ultramafic rocks of the Kalny chromite-bearing massif, Western Sayan]. *Geotectonics*, **47**(4), 266–278.

Chernyshov A.I., Kicheeva A.V., Podlipsiy M.Yu. (2016) [Petrostructural heterogeneities of ultramafic rocks of the Ergak chromite-bearing massif (West Sayan)]. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **145**(5), 25–38. (in Russian)

Chernyshov A.I., Loskutov I.Yu., Kicheeva A.V., Podlipsky M.Yu. (2018) [Chromite potential of ultramafic rocks from the Ergak massif, northeast of West Sayan]. *Rudy i metally [Ores and Metals]*, **1**, 47–53. (in Russian)

Chernyshov A.I., Yurichev A.N., Kicheeva A.V. (2019) [Petrogeochemical characteristics of Cr-bearing ultramafic rocks of the Kurtushibinsky ophiolite belt (Western Sayan)]. *Litosfera [Lithosphere]*, **19**(5), 687–703. (in Russian)

Fabries J. (1979) Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **69**(4), 329–336.

Goncharenko A.I. (1989) [Deformation and petrostructural evolution of Alpine-type ultramafic rocks]. Tomsk, TGU, 404 p. (in Russian)

[Igneous rocks. Vol. 1] (1983). Moscow, Nauka, 768 p. (in Russian)

Kotlyarov A.V., Simonov V.A., Safonova I.Yu. (2018) Boninites as a criterion for the geodynamic development of magmatic systems in paleosubduction zones in Gorny Altai. *Geodynamics & Tectonophysics*, **9**(1), 39–58.

Kurenkov S.A., Didenko A.N., Simonov V.A. (2002) [Geodynamics of paleosubduction]. Moscow, GEOS, 294 p. (in Russian)

Kuznetsov P.P. (1980) [Structural features of ultramafic belts of the Altai-Sayan fold region]. Novosibirsk, Nauka, 97 p. (in Russian)

Lavrent'ev Y.G., Karmanov N.S., Usova, L.V. (2015). Electron probe microanalysis of minerals: Microanalyzer or scanning electron microscope? *Russian Geology and Geophysics*, **56**(8), 1154–1161.

Palandzhyan S.A. (1992) [Types of mantle peridotites by geodynamic settings]. Magadan, SVKNII DVO RAN, 104 p. (in Russian)

[Petrographic code of Russia: igneous, metamorphic, metasomatic and impact rocks] (2009) St. Petersburg, VSEGEI, 200 p. (in Russian)

[Petrology and metamorphism of ancient ophiolites: example of the Polar Urals and West Sayan] (1977) Novosibirsk, Nauka, 220 p. (in Russian)

Pinus G.V., Kolesnik Yu.N. (1966) [Alpine-type ultramafic rocks of South Siberia]. Moscow, Nauka, 211 p. (in Russian)

Pinus G.V., Kuznetsov V.A., Volokhov I.M. (1958). [Ultramafic rocks of the Altai-Sayan fold area]. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 295 p. (in Russian)

Rybakova A.V. (2019) [Petrology of chromite-bearing ultramafic rocks of the Kalny and Ergak massifs (northeast of the Western Sayan)]. *Dissertatsiya kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk [Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences]*. Tomsk, 151 p. (in Russian)

Savel'eva G.N. (1987) [Gabbro-ultramafic complexes of ophiolites of the Urals and their analogs in the present-day oceanic crust]. Moscow, Nauka, 246 p. (in Russian)

Shelepaev R.A. (2006) [Evolution of basic magmatism in West Sangilen]. Avtoreferat dissertatsii kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk [Abstract of the Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences]. Novosibirsk, 12 p. (in Russian)

Sibilev A.K. (1980) [Petrology and asbestos-bearing potential of ophiolites]. Novosibirsk, Nauka, 216 p. (in Russian)

Simonov V.A. (1993) [Petrogenesis of ophiolites: thermobarogeochemical studies]. Novosibirsk, OIGGM SO RAN, 247 p. (in Russian)

Simonov V.A., Dobretsov N.L., Buslov M.M. (1994) [Boninite series in structures of Paleoasian Ocean]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, **35**(7–8), 182–199 (in Russian)

- Simonov V.A., Kolobov V.Yu., Peive A.A.** (1999) [Petrology and geochemistry of geodynamic processes in Central Atlantic]. Novosibirsk, SO RAN, NITS OIGGM, 224 p. (in Russian)
- Simonov V.A., Shelepaev R.A., Kotlyarov A.V.** (2009) [Physicochemical parameters of the formation of a layered gabbro-ultramafic complex in ophiolites of South Tuva]. In: *Ul'trabazit-bazitovyye komplekсы skladchatykh oblastey i svyazannyye s nimi mestorozhdeniya [Mafic-ultramafic complexes of fold regions and related deposits]*. Yekaterinburg, IGG UB RAS, vol. 2, 195–198. (in Russian)
- Sivov A.G., Pinus G.V.** (1934) [Searching for asbestos and platinum in the basin of the Us River in West Sayan]. *Vestnik Zapadno-Sibirskogo geologo-gidrogeologicheskogo tresta [Bulletin of West Siberian Geological-Hydrogeological Trust]*, 2, 74–75. (in Russian)
- Sobolev A.V., Danyushevsky L.V.** (1994) Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga trench: Constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, 35, 1183–1211.
- Yavuz F., Yildirim D.K.** (2018) Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, 87, 149–172.