

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ РУДООБРАЗУЮЩИХ ХРОМОВЫХ ШПИНЕЛЕЙ ЮЖНОГО УЧАСТКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЕ (МАССИВ РАЙ-ИЗ)

© 2017 г. П. Б. Ширяев, Н. В. Вахрушева

Химический состав рудообразующих шпинелей месторождения Центральное отражен в ряде публикаций [Строение..., 1990; Перевозчиков и др., 2005; Чашухин и др., 2007]. В работе “Строение, эволюция и минерогения...” [1990] показано, что шпинели месторождения относятся к высокохромистому, магнизальному типу с модалным содержанием Cr_2O_3 59–60%. Приведенные гистограммы характеризуют главным образом шпинели западной подзоны Северного участка месторождения Центральное (рис. 1). Гистограмма содержания Cr_2O_3 в шпинелях южной части месторождения построена на небольшой (не более 15 анализов) выборке. На ней проявлены две моды – 56–58 и 59–60% Cr_2O_3 [Строение..., 1990]. В работах использованы результаты химического анализа (“мокрой химии”) монофракций рудообразующих шпинелидов.

И.С. Чашухин с соавторами используют составы рудообразующих шпинелей массива Рай-Из как ин-

дикаторы условий формирования руд [2007]. С точки зрения авторов, руды месторождения являются метасоматическими (продуктами метаморфической дифференциации). Соотношения железистости и хромистости в рудообразующих шпинелях связаны прямой зависимостью, при этом составы наиболее железистых и хромистых шпинелей отвечают таковым аксессуарных шпинелей дунитов. По мнению авторов, это позволяет рассматривать дуниты в качестве эдуктов метаморфической дифференциации для райизских хромититов.

Взаимосвязь химического типа руд массива Рай-Из с геологическим положением оруденения (содержанием количества дунитовой составляющей в разрезе) показана в работе Б.В. Перевозчикова с соавторами [Строение..., 1990; Перевозчиков и др., 2005]. Согласно данным, полученным авторами, с дунитами ассоциируют хромититы, сложенные наиболее хромистыми шпинелидами (ко-

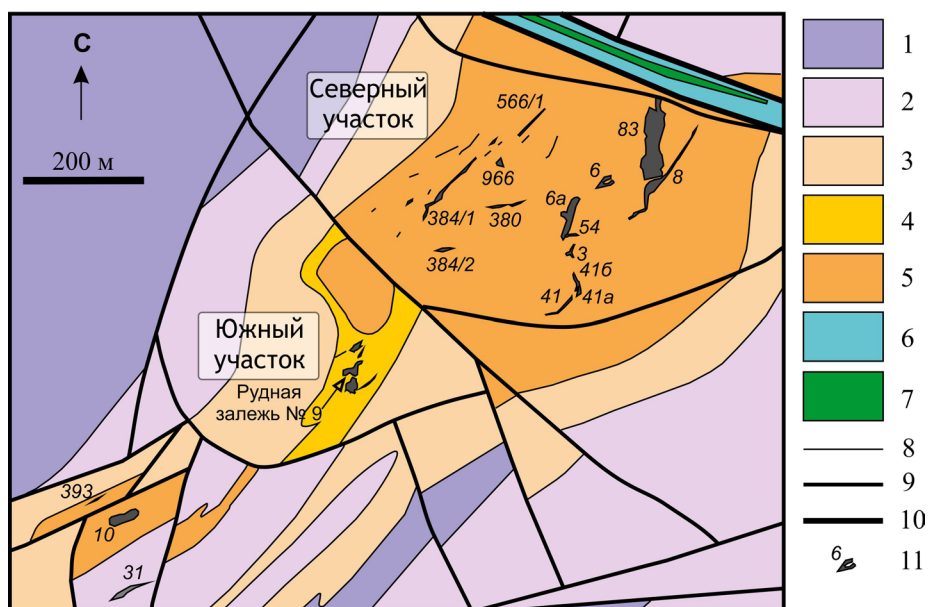


Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Центральное [по: Перевозчиков и др., 2005, с уточнениями].

1–4 – породы дунит-гарцбургитового комплекса с разным содержанием дунитовой составляющей, %: 1 – <10, 2 – 10–30, 3 – 30–50, 4 – 50–70; 5 – дуниты; 6 – серпентиниты; 7 – диабазы; 8 – геологические границы; 9, 10 – тектонические нарушения 1-го и 2-го ранга соответственно; 11 – тела хромовых руд и их номера.

личество катионов Cr в элементарной ячейке рудообразующего шпинелида в расчете на 24 катиона 11–13 ф. е.), а с гарцбургитами – наиболее глиноземистыми (5.5–9.5 ф. е. Cr).

Описанные результаты получены на стадии поисково-оценочных работ на месторождении в 70–80-х гг. XX в., когда многие вопросы геологического строения рудовмещающего комплекса, морфологии рудных тел оставались открытыми.

Материалы для настоящей статьи получены при документировании и опробовании рудных тел в карьерах и штольне месторождения Центральное в период его активной эксплуатации в 2005–2012 гг. Целью исследования было изучение взаимосвязи геологического положения тел хромовых руд с составом рудообразующих шпинелей и оливинов, а также с P - T - fO_2 условиями их формирования.

Рассмотрены хромовые руды южного участка месторождения (см. рис. 1) – рудная залежь № 9, рудные тела № 10 и 31. Петрографический состав ультрамафитов, в которых локализованы рудные тела, различен: рудное тело № 10 залегает в теле пегматоидных слабо серпентинизированных дунитов протяженностью 200 м и мощностью около 100 м; рудные тела залежи № 9 и рудное тело № 31 локализованы в породах дунит-гарцбургитового комплекса. Содержание дунитовой составляющей в рудовмещающем комплексе р. т. № 31 составляет 30–50%, рудной залежи № 9 – 50–70%. Нормативные гарцбургиты представлены метаультрамафитами – энстатит-оливиновыми и амфибол-энстатит-оливиновыми породами.

Составы рудообразующих шпинелей в ходе настоящего исследования определяли микрондовым анализом на установке CAMECA SX-100 (ГЕОХИ РАН, аналитик Н.Н. Кононкова).

Для изучения особенностей состава рудообразующих шпинелей построены гистограммы содержания основных компонентов – Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и MgO. На гистограмме содержания Cr_2O_3 для шпинелей южного участка месторождения проявлена бимодальность с модальными значениями – 59.5 и 61.5 мас. % (рис. 2). В связи с этим по содержанию Cr_2O_3 выделены две группы хромовых шпинелей: первая содержит 57.0–60.5 мас. % Cr_2O_3 , вторая – 60.5–64.0. В первую попала большая часть шпинелей из р. т. № 10 и часть шпинелей рудной залежи № 9, во вторую – большинство шпинелей р. т. № 31, а также часть проб из рудной залежи № 9. В обеих группах преобладают шпинели с содержанием Al_2O_3 7.0–12.0%. При этом в шпинелях первой группы содержание компонента – 8.0–12.0 мас. %, второй – 7.0–11.0. Очевидно, что более высокое содержание Cr_2O_3 и Al_2O_3 в шпинелях второй группы должно сопровождаться более низкой концентрацией Fe_2O_3 , что и наблюдается в изученных минералах (см. рис. 2). Содержание окиси и закиси железа определялось как при

помощи мессбауэровской спектроскопии, так и из расчета на основании стехиометрического соотношения двух- и трехвалентных катионов в структуре шпинели. Диапазон содержаний Fe_2O_3 для шпинелей первой группы 2.8–6.0 мас. % (в одной пробе 8.5%), второй – 1.2–4.5 мас. %. Содержание MgO в шпинелях обеих групп находится в диапазоне 11.0–15.0 мас. %, однако среди шпинелей первой группы доминируют составы с 13.0–14.0 мас. %, а второй – 14.0–15.0 мас. % MgO.

Оливины, ассоциирующие с рудообразующими хромовыми шпинелями первой и второй групп, различаются железистостью ($Fa = Fe/(Fe + Mg)$, ф. е.) (рис. 3). В парагенезисе с наиболее хромистыми шпинелями (второй группы) находятся наименее железистые оливины ($Fa = 2.0$ –3.0%), а со шпинелями первой группы (менее хромистыми) ассоциирует оливин с $Fa = 2.8$ –4.2%.

Для хромититов, в силикатной части которых присутствовал оливин, выполнен расчет температуры оливин-шпинелевого равновесия и фугитивности кислорода (fO_2). Использованы термометр и оксигармометр Больхауза–Берри–Грина [Ballhaus et al., 1991]. Для шпинелей и оливинов первой группы установлены температуры 570–850°C и фугитивность кислорода на 1.5–3.0 ед. выше буфера FMQ, для второй группы температуры оливин-шпинелевого равновесия изменяются в более узком диапазоне – 590–710°C при $fO_2 + 2...+3$ ед. относительно FMQ (рис. 4). Как видно, основным различием хромититов разных групп является диапазон значений T и fO_2 , который для первой группы (менее высокохромистых, залегающих в дунитовых телах) выше. Для одного из образцов этой группы установлена максимально высокая температура оливин-шпинелевого равновесия – 850°C. Однако в целом T - fO_2 условия образования руд обеих групп близки.

Сопоставлены составы рудообразующих и акцессорных шпинелей. Для этого использовали диаграммы $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg) - Cr/(Cr + Al)$ в шпинели и $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg) - Cr/(Cr + Al + Fe^{3+} + Ti)$. Последняя предложена в работе А.А. Маракушева с соавторами [2004], где на нее были нанесены составы акцессорных шпинелей из ультрабазитов, образовавшихся в разных P - T условиях – от пироповых алмазоносных перидотитов до пород полосчатого комплекса, а также шпинелей из включений в алмазах, акцессорные и рудообразующие шпинели Кемпирсайского массива. С точки зрения авторов, близость составов последних к шпинелям из включений в алмазах указывает на глубинный, высокобарический генезис оруденения Кемпирсайского массива. С увеличением давления и температуры образования шпинелей возрастают их хромистость и магнезиальность [Маракушев и др., 2004].

Рудообразующие хромовые шпинели первой группы образуют на диаграмме $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg) - Cr/(Cr + Al)$ единый тренд с акцессорными шпинели

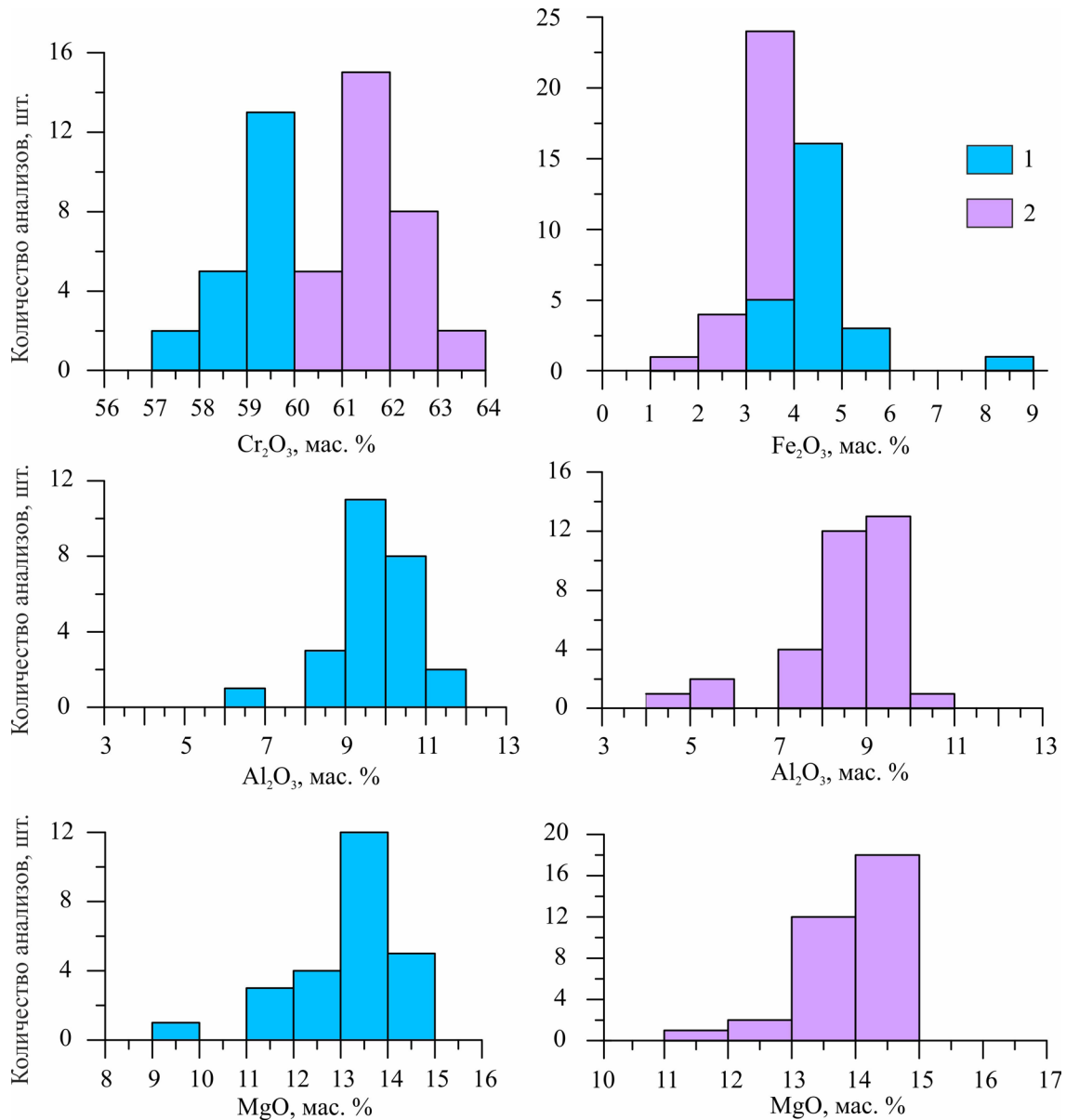


Рис. 2. Гистограммы содержания основных элементов в рудообразующих шпинелях южного участка месторождения Центральное.

1 – шпинели с содержанием Cr₂O₃ < 60%; 2 – Cr₂O₃ > 60%.

нелями дунитов, амфибол-оливиновых, амфибол-энстатит-оливиновых и энстатит-оливиновых пород, тогда как более высокохромистые шпинелиды второй группы формируют другой тренд с большим углом наклона к оси абсцисс (рис. 5). Согласованное увеличение хромистости и железистости в шпинелях первой группы и акцессорных шпинелях рудомещающих метаультрамафитов объясняется одинаковым поведением в минерале катионов Mg и Al. Их количество в шпинели снижается в условиях метаморфизма на фоне увеличения содержания магнетитовой компоненты, что приводит к возникновению хроммагнетита. Подобное преобразо-

вание невозможно без синметаморфической рекристаллизации (полной или частичной) минерала.

Диаграмма Fe²⁺/(Fe²⁺ + Mg)–Cr/(Cr + Al + Fe³⁺ + Ti) дает представление о поведении в шпинели катионов хрома при изменении соотношения Fe и Mg в тетраэдрах. С увеличением давления, при котором образуется шпинель, возрастают ее хромистость и магнезиальность [Маракушев и др., 2004]. Рудообразующие шпинели дают в этих координатах два тренда, которые характеризуют одновременное увеличение количества хрома и железистости минерала. Исследованные шпинелиды соответствуют рудообразующим шпинелям Кемпирсайско-

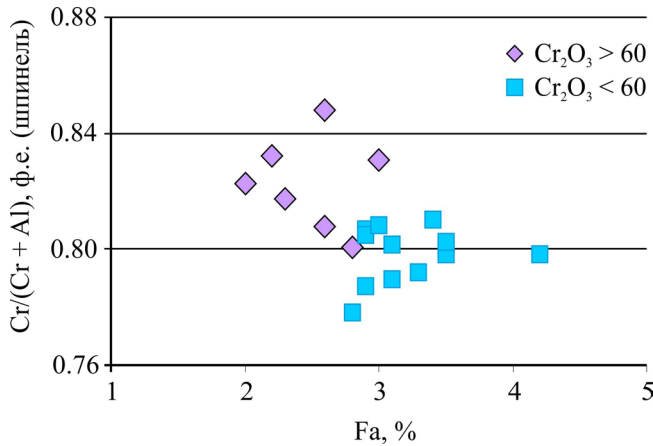


Рис. 3. Соотношение хромистости рудообразующей шпинели и железистости оливина, находящегося с ней в парагенезисе.

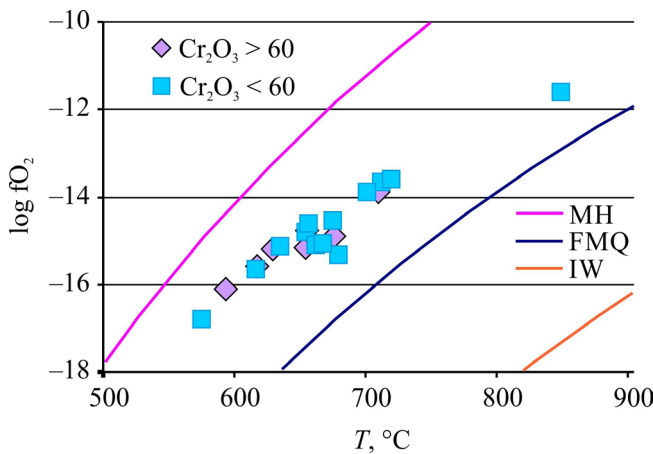


Рис. 4. Диаграмма T - $\log f(\text{O}_2)$ для хромититов южного участка месторождения Центральное.

го массива (рис. 6). Наиболее хромистые шпинели второй группы частично попадают в область составов включений шпинели в алмазах.

Для акцессорных шпинелей характерна обратная пропорциональность между железистостью и количеством хрома в октаэдрах. Разный наклон линии тренда для акцессорных и рудообразующих шпинелей исключает возможность того, что хромититы испытали наложенный метаморфизм.

Как в рудообразующих шпинелях, так и в акцессорных наблюдается обеднение шпинелевым компонентом, которое в первом случае компенсируется увеличением содержания феррихромита, а во втором – магнетита. Основным фактором, определяющим химический состав минерала, в обоих случаях является метаморфизм, разный тип изоморфизма связан с неодинаковыми условиями образования шпинелей, в первую очередь разным давлением (более высоким для руд) и фугитивностью кислорода (более высокой для пород).

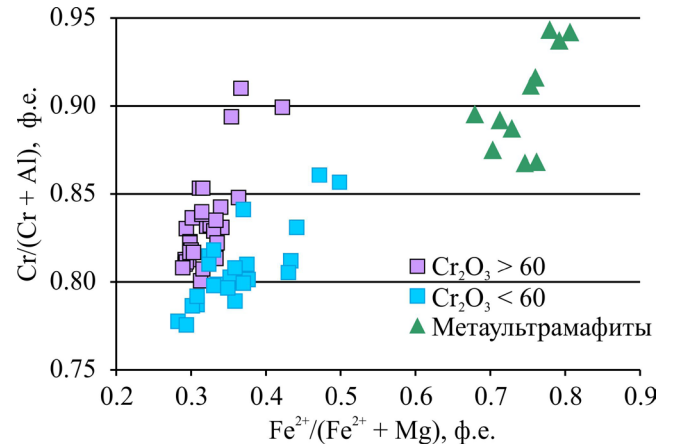


Рис. 5. Диаграмма соотношения $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ – $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ в рудообразующих и акцессорных шпинелях.

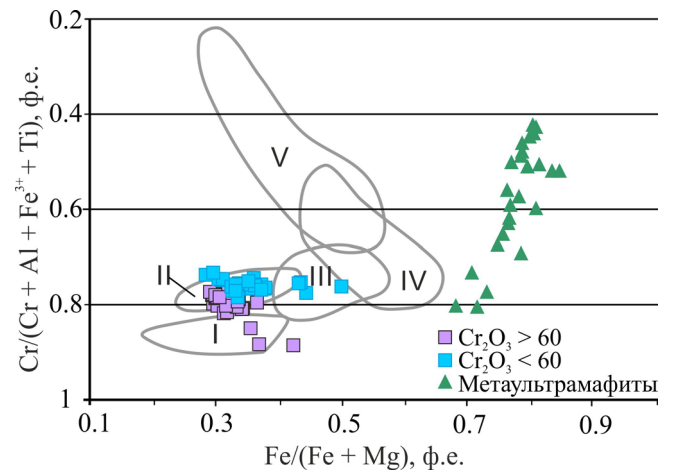


Рис. 6. Диаграмма $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ – $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti})$ в рудообразующих и акцессорных шпинелях.

Поля составов [Маракушев и др., 2004]: I – включения шпинели в алмазах; II – рудообразующие шпинели Кемпирсайского массива, локализованные в дунитовых телах; III – акцессорные шпинели дунитов хромитонесущих дунитовых тел; IV – акцессорные шпинели дунитов дунит-гарцбургитового комплекса; V – акцессорные шпинели гарцбургитов дунит-гарцбургитового комплекса.

Анализ распределения содержаний основных химических элементов в хромовых шпинелях по разрезам рудных тел показал, что их внутренние части сложены наиболее высокохромистыми разновидностями рудного минерала (рис. 7). При этом в рудном теле № 9, залегающем в породах дунит-гарцбургитового комплекса, наблюдается более широкое распространение шпинелей второй группы, чем в рудном теле № 10, локализованном в небольшом дунитовом теле. В р. т. № 10 шпинели второй группы встречены только в узкой зоне в центральной части. Составы шпинелей первой группы

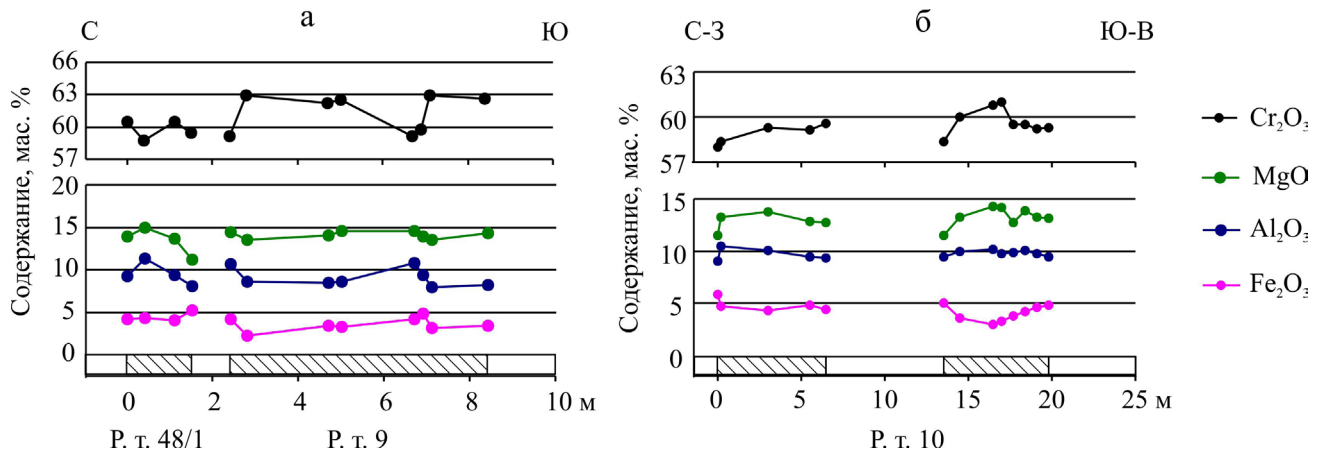


Рис. 7. Вариации составов рудообразующих хромовых шпинелей по разрезам через рудные тела № 9 и 48/1 (а) и № 10 (б).

близки к таковым северного участка, где вмещающими породами в основном являются дуниты.

В рудной залежи № 9 шпинели первой группы встречаются в эндоконтактах рудных тел, шлирах хромовой шпинели в околорудных дунитах и редковкрапленных разностях хромовых руд.

При метаморфизме (диафторезе) в зернах шпинели возникает зональность, которая характеризуется возрастанием количества катионов Cr и Fe^{3+} к их краю на фоне снижения количества Al [Строев..., 1991; Ширяев, Вахрушева, 2016; и др.]. Следовательно, при наложенном метаморфизме состав шпинелей к контактам рудных тел должен изменяться аналогичным образом. В р. т. № 9 наблюдается иная картина – к контактам рудных тел хромистость шпинелей понижается. Значит, такое изменение состава минерала связано не с наложенными процессами, а с изменением параметров (в первую очередь давления) внутри рудообразующей системы. При подобной интерпретации можно полагать, что шпинели первой группы маркируют зоны разгрузки внутри рудных тел и вдоль их контактов, а также слагают рудные тела, сформировавшиеся в условиях более низких давлений. Первое предположение подтверждается тем, что на месторождении Центральное вдоль контактов рудных тел развиты зоны хрупких деформаций как хромититов, так и вмещающих пород.

Таким образом, на южном участке месторождения устанавливаются два подтипа высокохромистых магнезиальных хромовых руд. Первый, развитый преимущественно в дунитах и породах дунит-гарцбургитового комплекса с дунитовой составляющей более 70%, характеризуется более низким содержанием Cr_2O_3 и MgO и более высоким – Fe_2O_3 и Al_2O_3 в рудообразующей хромовой шпинели. В парагенезисе с рудообразующим минералом находится более железистый оливин. В рудных телах, залегающих среди пород дунит-гарцбургитового ком-

плекса, руды этого подтипа тяготеют к контактам и зонам трещиноватости.

Второй тип хромититов встречается главным образом в породах дунит-гарцбургитового комплекса с содержанием дунитовой составляющей от 30 до 70%. Для него характерны шпинели с максимально высоким содержанием Cr_2O_3 и MgO, низким – Al_2O_3 и Fe_2O_3 , с которыми ассоциируют наименее железистые оливины. $T-fO_2$ условия образования шпинелей обоих типов близки ($T = 570-850^\circ C$; $dlog fO_2 (FMQ) = +1.5...+3.0$ ед.).

По аналогии с рудообразующими шпинелями Кемпирсайского массива [Маракушев и др., 2004] можно предполагать, что формирование хромититов месторождения Центральное шло в условиях высоких давлений. Наиболее хромистые шпинели слагают внутренние части рудных тел, а менее хромистые – фиксируют зоны разгрузки (декомпрессии), сопряженные с зонами хрупких деформаций. Основным фактором, определяющим химический состав аксессуарных и рудообразующих шпинелей месторождения Центральное, являются локальные градиенты давления в процессе рудообразования.

Исследования проведены при поддержке Программы Президиума РАН "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны РФ".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Маракушев А.А., Панях Н.А., Горбачев Н.С., Зотов И.А. Минералого-геохимическая специфика гигантских месторождений хрома и платиновых металлов и проблема глубинности их мантийных источников // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ОНЗ РАН, 2004. С. 137–159.
- Перевозчиков Б.В., Кениг В.В., Лукин А.А., Овечкин А.М. Хромиты массива Рай-Из на Полярном Урале (Рос-

- сия) // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47, № 3. С. 230–248.
- Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из / отв. ред. В.Н. Пучков, Д.С. Штейнберг. Свердловск: УрО АН СССР, 1990.
- Чащухин И.С., Вотяков С.Л., Щапова Ю.Л. Кристаллохимия хромшпинели и окситермобарометрия ультрамафитов складчатых областей. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. 310 с.
- Ширяев П.Б., Вахрушева Н.В. Химическая зональность шпинелей и оливинов из хромититов и вмещающих ультрамафитов месторождения Центральное, массива Рай-Из // Вестн. Урал. отд. Рос. минералогического о-ва. 2016. № 13. С. 145–155.
- Ballhaus C., Berry R., Green D. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // Contrib. Mineral. Petrol. 1991. No. 107. P. 27–40.