

УДК 552.321.6+553.46

Д.Е. Савельев¹, Д.К. Макатов², В.С. Портнов²

¹Институт геологии УФИЦ РАН, г.Уфа;

²Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ХРОМИТИТАХ ЗАЛЕЖИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ-VII (КЕМПИРСАЙСКИЙ МАССИВ, КАЗАХСТАН)

Описаны минеральные включения в зернах рудообразующих хромшпинелидов из залежи Геофизическое-VI, расположенной в северном окончании Джарлыбутацкого рудного узла, который является самым крупным в мире по объемам хромитового оруденения в ассоциациях офиолитового типа. Показано, что состав включений (оливин, серпентин, хлорит, паргасит, МПГ, сульфиды Fe, Ni, Co) обладает большим многообразием по сравнению с минералогией вмещающих ультрамафитов (оливин, ортопироксен, серпентин). Минералы металлов платиновой группы (МПГ) представлены преимущественно дисульфидами тугоплавкой триады, реже – твердыми растворами Ir-Os-Ru состава. Все выделения МПГ встречены внутри зерен хромита, часто образуют сростки с хлоритом. Предложен механизм твердофазного захвата включений в результате деформационно-индуцированного распада пироксенов лерцолитов и сегрегации примесных элементов в хромшпинелидах в условиях высокотемпературно-пластического течения и рекристаллизации.

Ключевые слова: хромиты, Кемпирсайский массив, офиолиты.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2022.219

Введение. Кемпирсайский массив является одним из крупнейших на Урале и вмещает уникальные месторождения хромовых руд – самые крупные из известных в комплексах офиолитового типа, которые по запасам уступают только хромититовым горизонтам Бушвельда. Месторождения офиолитов часто относят к так называемым «подиформным залежам» (podiform chromitite) из-за того, что они характеризуются нерегулярной морфологией и зачастую по форме подобны стручкам и всегда обрамлены дунитовой оболочкой (dunite envelope). Эти особенности резко противопоставляют их выдержанным по простиранию слоям-рифам в платформенных расслоенных интрузиях.

Отличительной характеристикой большинства подиформных месторождений является значительное проявление вторичных процессов, которые затрагивают преимущественно вмещающие породы (дуниты, гарцбургиты, лерцолиты), зачастую полностью превращая их в

серпентиниты, реже – хлоритолиты. Месторождения Главного рудного поля Кемпирсайского массива не являются исключением: хромититы обычно обрамляются аподунитовыми серпентинитами, которые затем сменяются апоперидотитовыми, содержащими обильные баститовые псевдоморфозы по пироксенам. Относительно свежие блоки перцолитов и гарцбургитов встречаются спорадически только в скважинах на глубинах от 300 до 1000 м и глубже. Вместе с тем, необходимо отметить, что серпентинизация ультрамафитов обычно ограничена низкотемпературной стадией образования петельчатого серпентина и практически всегда акцессорные и рудообразующие хромшпинелиды имеют хорошую сохранность и почти не претерпели вторичных изменений.

Генезис хромититов офиолитовой ассоциации до настоящего времени представляет предмет дискуссии. В современной литературе наиболее часто их интерпретацию чаще всего связывают с реакцией расплав+рестит [7 и др.], реже – с флюидно-метасоматическим замещением [1, 8 и др.] либо твёрдофазной дифференциацией [4].

Зерна хромита часто содержат твёрдые включения, которые весьма многообразны по составу. Наряду с типичными для ультраосновных пород включениями (оливин, пироксены, серпентин, хлорит, МПП, аварит), довольно часто встречаются так называемые «экзотические» – паргасит, флогопит, хлорит, углеродсодержащие фазы [5, 8]. В последнее время все чаще наличие подобных включений заставляет исследователей делать выводы об имевших место флюидно-гидротермальных процессах в генезисе оруденения.

Результаты. Нами было изучено несколько образцов из керна разведочных скважин, пробуренных через основную залежь месторождения Геофизическое-VII. Руды представлены преимущественно густовкрапленными (70–85% зерен хромита) среднезернистыми (0,5–2 мм) хромититами, реже встречаются массивные (>85%) крупнозернистые (> 2 мм) либо средневкрапленные (40–70%) мелко-среднезернистые (0,1–1 мм) разновидности.

Во всех изученных образцах в зернах хромита выявлены минеральные включения (табл.1), причем их содержание возрастает от средневкрапленных мелкозернистых руд к массивным. В густовкрапленных и массивных рудах включения распределены неравномерно: подавляющая часть зерен (80%) либо лишена включений, либо в них встречаются очень мелкие включения размером первые микрометры. Примерно 10–15% зерен содержат единичные довольно крупные включения оливина, который в настоящее время полностью замещен серпентином, и только 2–5% зерен характеризуются обильными включениями других

фаз, среди которых чаще всего встречается паргасит, реже – флогопит (размер от первых мкм до 50 мкм). Остальные включения (сульфиды Ni, аварунит, МПГ) являются редкими и размеры их варьируют от доли микрометра до 10–25 мкм. Ниже мы подробнее остановимся на характеристике минералов включений.

Таблица 1
Минералогия включений в хромитах залежи Геофизической-VII

№ п/п	Минерал	Формула	распространение
1	хромшпинелид	$(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)_2O_4$	+++++
2	серпентин	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$	++++
3	Mg-хлорит (клинохлор)	$Mg_5Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8$	+++
4	паргасит	$NaCa_2(Mg,Al)(Si_6Al_3)O_{22}(OH)_2$	+++
5	оливин	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	++
6	пентландит	$(Fe,Ni)_9S_8$	++
7	хизлевудит	Ni_3S_2	++
8	Со-пентландит	$(Co,Fe,Ni)_9S_8$	+
9	лаурит	$(Ru,Os,Ir)S_2$	++
10	эрликманит	$(Os,Ru,Ir)S_2$	++
11	гексаферрум	$(Ru,Os,Ir,Fe...)$	+
12	сульфоарсенид ЭПГ (?)	$(Ir,Ru,Rh,Cu...)AsS$	+
13	сульфид иридия	IrS_2	+

Примечание: +++++ - главный минерал (>50%), ++++ - второстепенный минерал (10-50%), +++ - типичный аксессуарный минерал, ++ - редкий минерал, + - единичные находки

Оливин в зернах хромита сохраняется преимущественно в виде мелких (10–50 мкм) округлых включений (рис. 1а), которые расположены вдали от трещин, обычно интенсивно развитых в хромитах и разделяющих рудные зерна на отдельные фрагменты. По составу оливин является высокомагнезиальным (Fe_{95-98}) и содержит значительные количества никеля (0.5–0.7 мас.%).

Амфиболы являются наиболее многочисленными первичными включениями в зернах хромита, их размер варьирует от первых мкм до 25–30 мкм, а форма – от таблитчатых (рис. 1б) до призматических и шестоватых (рис. 1в). Состав весьма выдержанный и соответствует паргаситу с высокими содержаниями Na (1–3 мас.%) и Cr (0.8–2.5 мас.%), в большинстве зерен фиксируется примесь калия: обычно 0.05–0.2 мас.%, в единичных случаях до 1.07 мас.%.

Сульфиды и арсениды системы Ni-Fe-Co-Cu представлены мелкими выделениями как внутри зерен хромита, так и в трещинах, заполненных серпентином. Размер включений изменяется от первых

микрометров до 15-25 мкм. Наиболее многочисленны выделения представлены хизлеводитом и пентландитом, в единичных случаях отмечаются кобальт-пентландит и никелин. В некоторых выделениях пентландита выявлены довольно высокие содержания мышьяка и тончайшие выделения платиноидов (рис. 1г).

Минералы платиновой группы (МПГ) обнаружены исключительно внутри зерен хромита и обычно имеют очень малые размеры – от долей мкм до 3-5 мкм (рис. 1д, 1е). Большая часть выделений по составу относится к дисульфидам ряда лаурит-эрликманит с общей формулой $(Ru,Os,Ir)S_2$ и переменными отношениями между элементами платиновой группы. В составе некоторых выделений значительно преобладает иридий и их формула приближается к IrS_2 . Часть выделений представлена сульфоарсенидами ЭПГ, близкими к составу ирарсита.

В некоторых зернах хромита выявлены твердые растворы платиноидов состава Ru-Os-Ir-Fe (гексаферрум). В некоторых случаях выделения МПГ ассоциируют с хлоритом (рис. 1е). Из других ЭПГ в составе сульфидов ряда лаурит-эрликманит отмечается постоянная примесь родия в количестве до 3 мас.%, в сульфоарсенидах иридия его концентрация увеличивается до 5–6 мас.%. В единичных зернах МПГ отмечается примесь платины в количестве 1–2 мас.%, также выявлено 1 выделение самородной меди, содержащей 7 мас.% Pt. Палладий в изученных минералах не установлен.

Обсуждение результатов и выводы. Набор минералов во включениях в изученных зернах хромита месторождения Геофизическое VII в целом сходен с изученными ранее на других офиолитовых объектах. Однако интерпретация их генезиса является неоднозначной. Наиболее просто объяснить присутствие округлых зерен оливина в хромшпинелидах, поскольку оливин близкого состава присутствует в окружающих дунитах и гарцбургитах. Захват оливина мог происходить при кристаллизации хромита либо из просачивающихся сквозь рестит расплавов [7], либо в ходе синдеформационного роста [2].

Более трудным вопросом является частое присутствие включений паргасита, который вряд ли мог кристаллизоваться на ранних стадиях совместно с хромитом из базальтовых или бонинитовых расплавов. Некоторые исследователи полагают, что наличие включений гидроксилсодержащих минералов в хромите доказывает флюидно-метасоматический генезис хромититов [8]. Вместе с тем, ранее нами было показано на многочисленных примерах совместное присутствие тончайших выделений хромшпинелида и паргасита внутри неизмененных кристаллов оливина и ортопироксена из лерцолитов массивов Крака и Нурали [2, 3].

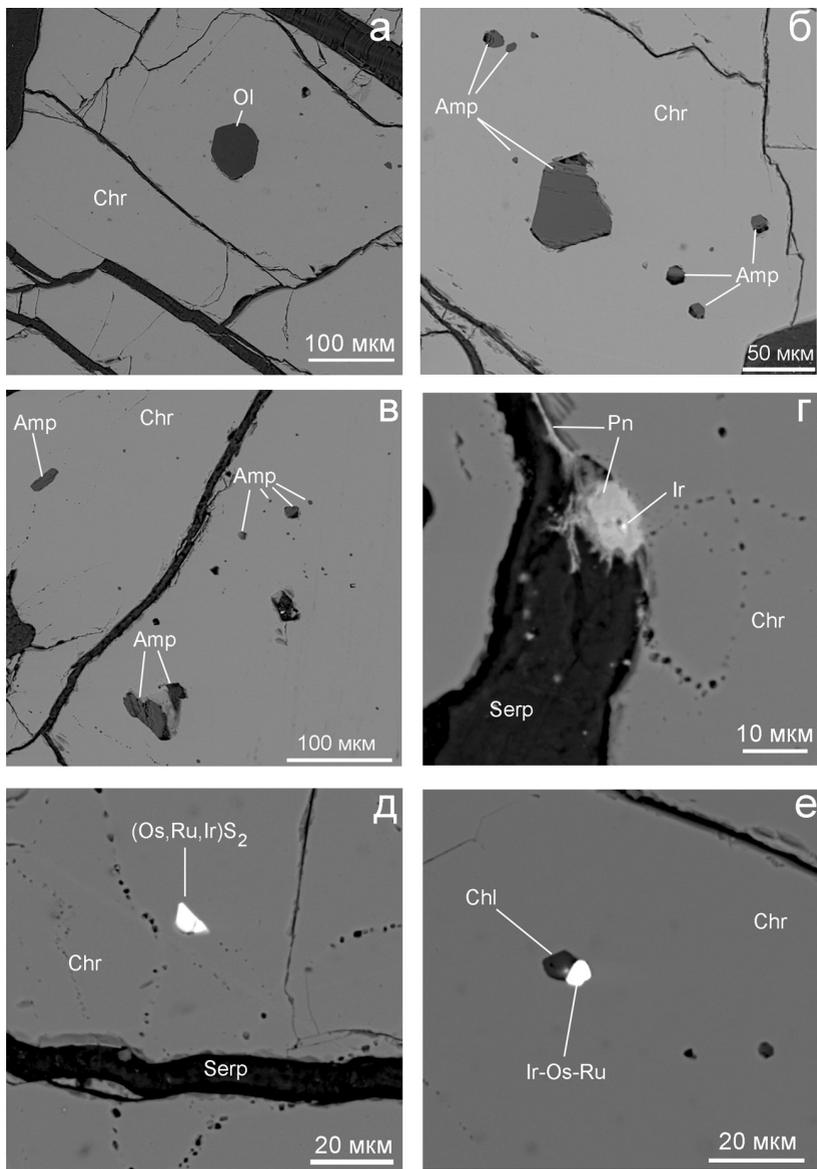


Рис. 1. Минеральные включения в зернах хромита месторождения Геофизическое-VII
 Chr – хромит, Amp – амфибол, Serp – серпентин, Chl – хлорит, Ol – оливин, Pn - пентландит

Кроме того, если присутствие амфиболов в хромититах связано с просачиванием флюидов, то локализация их должна быть связана с микро-трещинами или границами зерен. Однако, все включения паргасита в изученных нами зернах хромита встречаются в центральных частях вдали от границ, в то время как в многочисленных трещинах не выявлено ни одного выделения амфиболов подобного состава. Это позволяет нам сделать вывод о твердофазном генезисе включений.

Платинометаллическая минерализация характеризуется преобладанием тугоплавких платиноидов – рутения, иридия и осмия при подчиненной роли родия и платины и полном отсутствии палладия, что также соответствует результатам, полученным ранее для других объектов юго-восточной части Кемпирсайского массива [6, 9]. На данном этапе изучения МПП в хромититах месторождения о решении вопроса их генезиса говорить преждевременно. Однако частая ассоциация МПП с хлоритом и, одновременно, отсутствие их вне зерен хромита также предполагает, что их образование могло быть связано с процессами рекристаллизации с одновременной сегрегацией примесей из рудных зерен.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № FMRS-2022-0011.

Библиографический список

1. Лушкарев Е.В., Каменецкий В.С., Морозова А.В., Хиллер В.В., Главатских С.П., Родеманн Т. Онтогенез хромшпинелидов и состав включений как индикаторы пневматолито-гидротермального происхождения платиноносных хромититов Кондерского массива (Алданский щит) // Геология рудных месторождений, 2015 – Т.57. – С. 394–423.
2. Савельев Д.Е., Белозуб Е.В., Блинов И.А., Кожевников Д.А., Котляров В.А. Петрологические свидетельства синдеформационной сегрегации вещества при образовании дунитов (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // Минералогия, 2019. – №4. – С. 56–77.
3. Савельев Д.Е. Особенности морфологии и состава хромшпинелидов из ультрамафитов мантийного разреза Нуралинского массива (Южный Урал) // Минералогия, 2019. – Т.5. – № 4. С. 3–18.
4. Савельев Д.Е., Федосеев В.Б. Твёрдофазное перераспределение минеральных частиц в восходящем мантийном потоке как механизм концентрации хромита в офиолитовых ультрамафитах (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // Георесурсы, 2019. – Т. 21. – № 1. – С. 31–46. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.31-46>
5. Borisova A.Y., Ceuleneer, G., Kamenetsky V.S., Arai S., Béjina F., Abily B., Bindeman I.N., Polvé, M., De Parseval P., Aigouy T., Pokrovski G.S. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions // Journal of Petrology, 2012. – V. 53. P. 2411–2440.
6. Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Ore petrology of chromite-PGE mineralization in the Kempirсай ophiolite complex // Mineralogy and Petrology. – 2008. – V.92. – P. 31–58. DOI 10.1007/s00710-007-0207-3
7. Gonzalez-Jimenez J.M., Griffin W.L., Proenza A., Gervilla F., O'Reilly S.Y., Akbulut M., Pearson N.J., Arai S. Chromitites in ophiolites: how, where, when, why?

Part II. The crystallisation of chromitites // *Lithos*, 2014. – V. 189. – P. 148–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.008>

8. *Johan Z., Martin R.F., Ettler V.* Fluids are bound to be involved in the formation of ophiolitic chromite deposits // *European Journal of Mineralogy*, 2017. – V. 29. – P. 543–555.

9. *Melcher F.* Base metal–platinum-group element sulfides from the Urals and the Eastern Alps: characterization and significance for mineral systematics // *Mineralogy and Petrology*. – 2000. – V. 68. – P. 177–211.

SOLID INCLUSIONS IN THE CHROMITITES OF
GEOFIZICHESKOE-VII DEPOSIT (KEMPIRSAY MASSIF,
KAZAKHSTAN)

D.E. Saveliev, D.K. Makatov, V.S. Portnov

Solid inclusions in chromite grains of Geofizicheskoe VII deposit located in Dzharlybutak area hosting the largest ophiolitic chromitite resources in the world are described. We show that mineralogical composition of inclusions (olivine, serpentine, chlorite, pargasite, PGM, base metal sulfides) is more various in comparison to that of host ultramafic rocks (olivine, enstatite, serpentine). PGM are predominantly disulfides of refractory PGE, rarely – native Ru-Os-Ir solid solutions. PGM inclusions always locate in chromite grains and they often form intergrowth with chlorite. We infer that the inclusions in chromite grains would be formed by solid state processes (deformation-induced breakdown of pyroxenes, impurity segregation in spinel, etc.) during high-T plastic flow and recrystallization at upper mantle conditions.

Keywords: chromites, Kempirsay massif, ophiolites.