

DOI 10.24412/2949-4052-2026-1-88-107

УДК 552.321.6+553.46

**МИНЕРАЛОГИЯ САРАНГАЕВСКОГО ХРОМИТОПРОЯВЛЕНИЯ В
ПЕРЕХОДНОМ МАНТИЙНО-КОРОВОМ КОМПЛЕКСЕ МАССИВА
СРЕДНИЙ КРАКА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

© Шабутдинов Тимур Денисович, Савельев Дмитрий Евгеньевич

Институт геологии

ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр

Российской Академии наук»,

г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Изучена минералогия Сарангаевского рудопоявления, обладающего специфическим минеральным составом по сравнению как с высокохромистыми хромититами в краевых дунитах мантийного разреза, так и с железистыми хромититами верлит-клинопироксенитового комплекса. Показано, что для хромититов изученного рудопоявления характерна зональность (неоднородный состав) с преобладанием глиноземистых разностей, в интерстициях рудных минералов и во включениях в значительных количествах присутствуют высокотемпературные силикаты – орто- и клинопироксены, оливин, амфиболы. Обнаружены выделения сульфидов основных металлов и минералов платиновой группы, для которых характерна высокотемпературная геохимическая специализация (Ru-Os-Ir). Определены P-T-fO₂ условия кристаллизации хромититов и нерудных минералов, высказаны два возможных варианта образования хромититов: 1) кумуляты наиболее ранних порций частичного расплава, тектонически перемещенные внутрь мантийного разреза по поперечному разлому, 2) реститовые образования, сформированные в ультрамафитах гарцбургитового комплекса.

Ключевые слова: хромититы, офиолиты, ультрамафиты, переходный мантийно-коровый комплекс, Крака

**MINERALOGY OF SARANGAEVSKOE CHROME ORE OCCURRENCE IN
THE MANTLE-CRUST TRANSITION ZONE OF CENTRAL KRAKA
OPHIOLITE MASSIF (SOUTH URALS)**

© Shabutdinov Timur Denisovich, Saveliev Dmitry Evgenievich

Institute of Geology

FGBNU "Ufa Federal Research Center"

Ufa, Russian Federation

Summary. The mineralogy of the Sarangaevskoe ore occurrence, which has a unique mineral composition compared to both high-chromium chromitites in marginal dunites of the upper mantle section and ferruginous chromitites of the wehrlite-clinopyroxenite transition zone, was studied. It was shown that the chromitites of the studied ore occurrence are characterized by zonation

⁶ *Для цитирования:* Шабутдинов Т.Д., Савельев Д.Е. Минералогия сарангаевского хромитопроявления в переходном мантийно-коровом комплексе массива Средний Крака (Южный Урал) // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. 2026. № 1. С. 88-107. DOI 10.24412/2949-4052-2026-1-88-107

(heterogeneous composition) with a predominance of aluminous varieties. High-temperature silicates—ortho- and clinopyroxenes, olivine, and amphiboles—are present in significant quantities in the interstices of chromite grains and as inclusions. Sulfide segregations of base metals and platinum-group minerals, characterized by refractory geochemical specialization (Ru-Os-Ir), were discovered. The PT conditions for the crystallization of chromitites and silicates have been determined, and two possible variants for the formation of chromitites have been proposed: 1) cumulates of the earliest portions of partial melt, tectonically moved inside the mantle section along a transverse fault, 2) restite formations formed in ultramafic rocks of the harzburgite unit.

Keywords: chromitite, ophiolite, ultramafic rocks, mantle-crust transition zone, Kraka

Введение. Генезис хромититов, связанных с офиолитовыми комплексами, представляет собой до настоящего времени нерешенную проблему, а поиски хромовых руд в офиолитах остаются актуальной задачей в практическом плане [1–3]. Подавляющее количество месторождений в офиолитах относится к так называемому «подиформному типу» и располагается в мантийном разрезе офиолитов, где неизменно вмещается дунитовыми телами различного размера и морфологии [4–5]. В широком диапазоне могут варьировать количественные характеристики оруденения, соотношения между размерами залежей и ее дунитовой оторочкой, а также степень концентрации оруденения – от редковкрапленных хромититовых прожилков (seams) в мощных дунитовых телах до крупных залежей массивных хромититов, отделенных от гарцбургитов небольшой по мощности дунитовой оторочкой (dunite envelope). С данным типом оруденения связаны все экономически значимые концентрации хромититов в офиолитовых комплексах мира [6–8].

Значительно реже хромититы образуют скопления внутри переходного мантийно-корового комплекса на границе мантийных тектонитов (лерцолитов, гарцбургитов) и существенно мафитовых пород (габбро, норитов, апогаббровых амфиболитов), которые залегают в основании корового комплекса офиолитов. Несмотря на небольшие размеры рудопроявлений данного типа, они часто могут содержать в себе повышенные концентрации элементов платиновой группы, вплоть до образования экономически значимых месторождений (например, в офиолитах Шетлендских островов).

Химический состав рудообразующих хромшпинелидов также может варьировать в довольно значительном диапазоне: от высокохромистых (55–65 мас.% Cr_2O_3) до глиноземистых (менее 50 мас.% Cr_2O_3), причем в некоторых массивах он выдержан, а в других изменчив [7,9]. Для рудопроявлений переходной зоны типичной является повышенная железистость рудообразующих минералов.

Оба описанных выше типа оруденения встречаются в пределах массива Средний Крака, но в самой южной его части их уверенное отнесение к тому или иному типу затруднено вследствие интенсивной серпентинизации и наруженности разреза в области перехода от мантийного разреза к коровому.

Основной задачей настоящего исследования является детальная минералогическая характеристика одного из рудопроявлений, находящихся в области данного перехода.

Геологическая обстановка. Сарангаевское хромитопоявление расположено в южной части массива Средний Крака, вблизи «петрологической границы Мохо» (ПГМ), разделяющий образования так называемых мантийного и корового разрезов офиолитовой ассоциации (рис. 1). От ПГМ на восток обнажаются мантийные тектониты, представленные краевыми дунитами, перемежающимися на протяжении около 1.5 км с породами дунит-гарцбургитового комплекса, далее к востоку они сменяются преобладающими лерцолитами. Западнее ПГМ разрез представлен незакономерным чередованием на протяжении около 1 км верлитов, клинопироксенитов, серпентинитов и меланократовых гнейсовидных габбро. Затем следует существенно мафитовая часть разреза с преобладанием однородного крупнозернистого роговообманкового габбро.

Помимо описываемого Сарангаевского рудопроявления (точка 748 (2571) на рис.1), на рассматриваемой территории расположено множество хромитопоявлений различного масштаба. Наиболее значимые из них приурочены к мощным дунитовым телам в краевой зоне мантийных тектонитов. Среди них: Правосаксейская рудная зона (423, 938, 1108, 1860), месторождение Левый Саксей (1870), Шатран (1872, 1114), Ключевское рудопроявление (1882, 1885, 1886), месторождения Акбура (167), Хамитовское (189/2568). Небольшие рудопроявления железистых хромититов с высокими содержаниями платиноидов приурочены к верлит-клинопироксенитовой зоне (186, 1505). Кроме того, ряд мелких рудопроявлений приурочен к серпентинитам меланжа, проникающим вдоль долины ручья Черный Ключ внутрь мафитового разреза (165, 1900, 1928, 2558).

Геологическая позиция Сарангаевского рудопроявления неоднозначна, так как оно вместе с проявлениями 168 и 2567 находится в «области неопределенности» – вблизи границы мантийного разреза и верлит-клинопироксенитового комплекса и, кроме того, в зоне наложенной серпентинизации, которая связана с проявлением поперечного сдвигового нарушения, проходящего вдоль долины р.Кага и разделяющего массивы Средний и Южный Крака. Вследствие слабой обнаженности и тектонической нарушенности разреза, сведения о геологии этих рудопроявлений весьма скудные. На Сарангаевском рудопроявлении оруденение вскрыто канавами и небольшой затопленной выемкой размером 1,5x1,5x2 м, в отвалах встречаются редкие обломки массивных хромититов и более обильные – выветрелых серпентинитов.

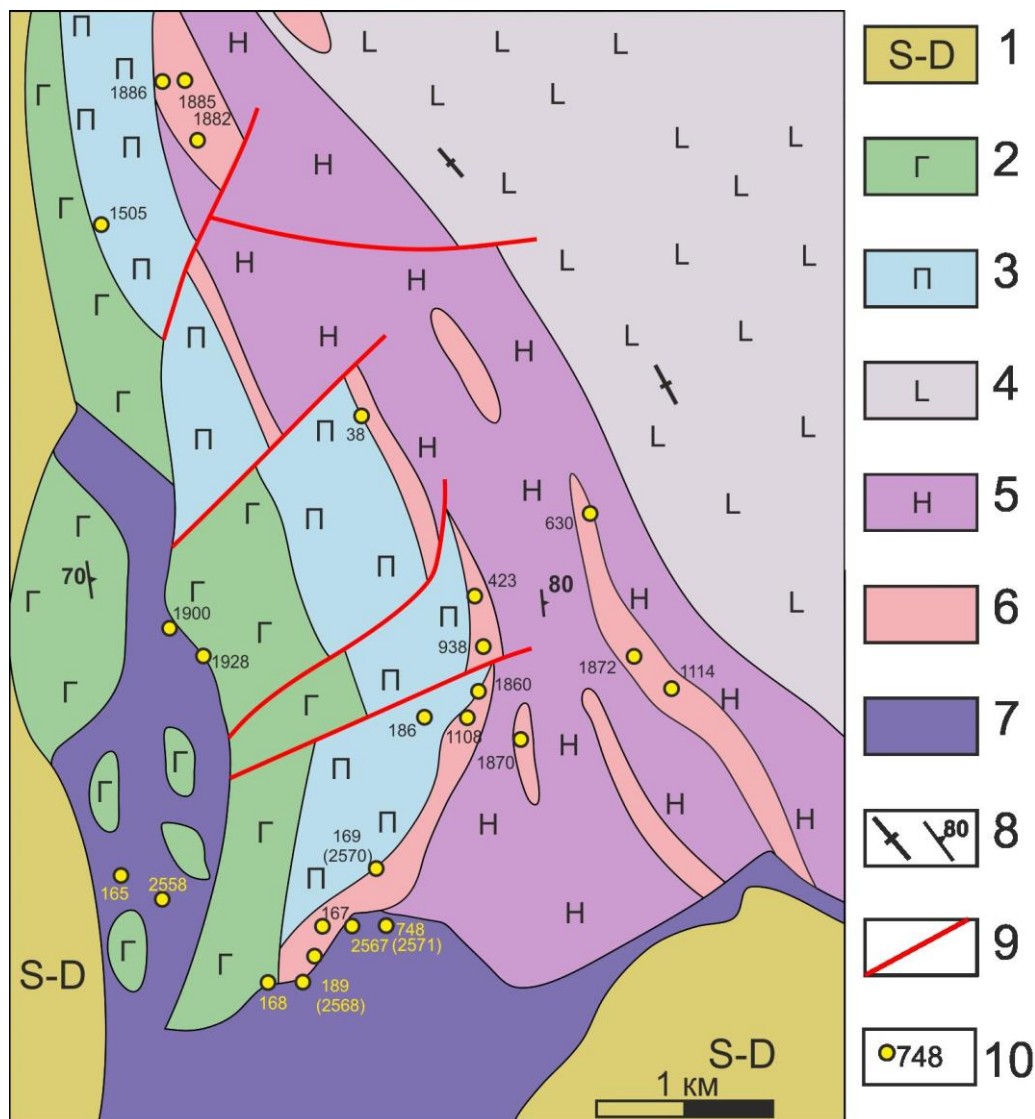


Рисунок 1 – Геологическое строение юго-западной части массива Средний Крак, по [10] где: 1 – вмещающие осадочные и вулканогенно-осадочные породы силура и девона, 2 – габброиды, 3 – клинопироксениты, верлиты, 4 – преимущественно лерцолиты с подчиненными гарцбургитами и дунитами, 5 – дунит-гарцбургитовый комплекс, 6 – преимущественно дуниты, 7 – серпентиниты, 8 – структурные элементы мафитов и ультрамафитов (полосчатость, минеральная уплощенность), 9 – разрывные нарушения, 10 – хромитопоявления

Методы исследований. Отобранные в ходе полевых работ 2024 годов образцы хромититов изучались в виде аншлифов на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 4 Compact с анализатором Xplorer 15 (Oxford Instruments, Великобритания) в Институте геологии УФИЦ РАН, г.Уфа. Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ. При съемке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда в диапазоне 3–4 нА, время накопления спектра в точке 60 секунд в режиме «Point&ID». На основе спектров химического состава рассчитывались формульные

коэффициенты для породообразующих и акцессорных минералов. Формулы хромшпинелидов и оливина рассчитывались на 4, пироксенов – на 6 атомов кислорода, соответственно. В формуле хромшпинелидов количество двух- и трехвалентного железа определялось по стехиометрии минерала. Расчет формул амфиболов проводился на 23 атома кислорода по методу, изложенному в работе [11].

Содержания минералов в составе оливина и пироксенов определены следующим образом: форстерита ($Fo = Mg / (Mg + Fe)$, ат.%), энстатита ($En = Mg / (Mg + Fe + Ca)$, ат.%), ферросилита ($Fs = Fe / (Mg + Fe + Ca)$, ат.%), волластонита ($Wo = Ca / (Mg + Fe + Ca)$, ат.%). Аббревиатуры, использованные на рисунках, соответствуют утвержденным в Международном справочнике по новым минералам, номенклатуре и классификации (IMA–CNMNC) [12].

Результаты исследований. Хромититы Сарангаевского хромитопроявления характеризуются богатым минералогическим составом (таблица 1).

Таблица 1 – Породообразующие и акцессорные минералы хромититов

№	Минерал	Формула	Распространенность
1	Хромшпинелид	$(Mg, Fe)(Cr, Al, Fe)_2O_4$	++++
2	Серпентин	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$	+++
3	Оливин	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	++
4	Ортопироксен	$MgFe(Si_2O_6)$	++
5	Клинопироксен	$CaMg(Si_2O_6)$	++
6	Паргасит	$NaCa_2(Mg_4Al)Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$	++
7	Магнезиальная роговая обманка	$Ca_2[Mg_4(Al, Fe^{3+})]Si_7AlO_{22}(OH)_2$	++
8	Эденит	$NaCa_2Mg_5Si_7AlO_{22}(OH)_2$	+
9	Аваруит	Ni_3Fe	++
10	Хизлевудит	Ni_3S_2	++
11	Борнит (окисленный)	Cu_5FeS_4	+
12	Диенерит	Ni_3As	+
13	Лаурит	RuS_2	+

Примечание. ++++ - главные минералы (до 90–100% породы), +++ - второстепенные минералы (10–30% породы), ++ - акцессорные минералы (до 1–5% породы), + - единичные находки

Породообразующие минералы представлены хромшпинелидами и серпентином, занимающим интерстиции между рудными минералами. Встреченные в образцах хромититов шпинелиды $((Mg, Fe)(Cr, Al, Fe)_2O_4)$ по классификации Н.В. Павлова образуют ряд от хромпикотита до алюмохромита. За редким исключением встречаются субферриалюмохромит и хромит (рис. 2А). Магнезиальность ($\#Mg$) составляет 0.37–0.73, хромистость ($\#Cr$) – 0.44–0.73 (см. рис. 2Б).

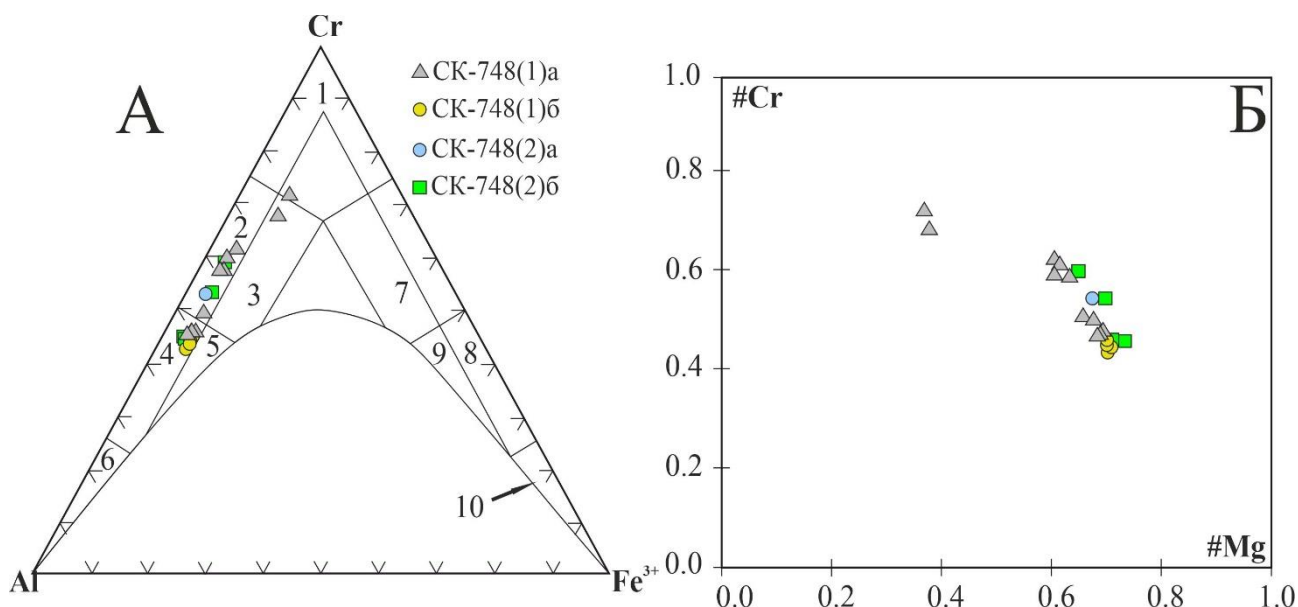


Рисунок 2 – Особенности состава хромшпинелидов:

A - классификационная диаграмма хромшпинелидов: 1 - хромит, 2 – алюмохромит, 3 – субферриалюмохромит, 4 – хромпикотит, 5 – субферрихромпикотит, 6 – пикотит, 7 – субалюмоферрихромит, 8 – хроммагнетит, 9 – субалюмохроммагнетит, 10 – магнетит, поля по [15]; *Б* - диаграмма #Cr–#Mg для хромшпинелидов. #Cr = Cr/(Cr+Al+Fe³⁺). #Mg = Mg/(Mg+Fe²⁺).

Содержание главных оксидов варьирует в следующих пределах: MgO – 7.0–16.61 мас.%; FeO – 11.0–21.6; Al₂O₃ – 9.28–30.00; Cr₂O₃ – 37.68–53.54; Fe₂O₃ – 1.9–6.0; TiO₂ – 0.12–0.29; V₂O₃ – 0.15–0.30; MnO – 0.28–0.41. В таблице 2 приведены некоторые анализы хромшпинелидов.

Таблица 2 – Представительные анализы химического состава хромшпинелидов из хромититов

№ п/п	№ образца	MgO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	V ₂ O ₃	TiO ₂	Всего	#Cr	#Mg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	СК-748(1)а	15.74	12.24	0.31	28.94	39.25	3.25	0.25	0.14	100.12	0.46	0.70
2		12.62	14.86	0.34	17.90	50.71	3.00	0.22	0.17	99.82	0.63	0.60
3		15.83	12.00	0.33	29.24	38.96	3.26	0.17	0.18	99.97	0.45	0.70
4	СК-748(1)б	16.26	12.00	-	29.39	39.66	3.50	-	0.24	101.05	0.46	0.71
5		16.38	12.00	0.30	29.64	39.28	3.63	0.19	0.21	101.63	0.45	0.71
6	СК-748(2)а	14.92	12.93	0.33	24.34	46.06	2.00	0.20	-	100.78	0.55	0.67
7	СК-748(2)б	13.81	13.46	-	20.17	49.03	2.00	0.24	-	98.71	0.61	0.65
8		16.45	12.00	-	29.82	40.10	1.90	0.21	-	100.48	0.46	0.71
Кристаллохимическая формула												
1	СК-748(1)а	(Mg _{0.69} Fe ²⁺ _{0.30} Mn _{0.01}) _{1.00} (Al _{1.00} Cr _{0.91} Fe ³⁺ _{0.07} V _{0.01}) _{1.99} O _{4.00}										
2		(Mg _{0.59} Fe ²⁺ _{0.39} Mn _{0.01}) _{0.99} (Cr _{1.26} Al _{0.66} Fe ³⁺ _{0.07} V _{0.01}) _{2.00} O _{4.00}										
3		(Mg _{0.69} Fe ²⁺ _{0.30} Mn _{0.01}) _{1.00} (Al _{1.01} Cr _{0.91} Fe ³⁺ _{0.07}) _{1.99} O _{4.00}										

4	СК-748(1)б	$(\text{Mg}_{0.71}\text{Fe}^{2+}_{0.29})_{1.00}(\text{Al}_{1.01}\text{Cr}_{0.91}\text{Fe}^{3+}_{0.08}\text{Ti}_{0.01})_{2.00}\text{O}_{4.00}$
5		$(\text{Mg}_{0.71}\text{Fe}^{2+}_{0.29}\text{Mn}_{0.01})_{1.01}(\text{Al}_{1.01}\text{Cr}_{0.90}\text{Fe}^{3+}_{0.08})_{1.99}\text{O}_{4.00}$
6	СК-748(2)а	$(\text{Mg}_{0.67}\text{Fe}^{2+}_{0.32}\text{Mn}_{0.01})_{1.00}(\text{Cr}_{1.09}\text{Al}_{0.86}\text{Fe}^{3+}_{0.05})_{2.00}\text{O}_{4.00}$
7	СК-748(2)б	$(\text{Mg}_{0.64}\text{Fe}^{2+}_{0.35})_{0.99}(\text{Cr}_{1.21}\text{Al}_{0.74}\text{Fe}^{3+}_{0.05}\text{V}_{0.01})_{2.01}\text{O}_{4.00}$
8		$(\text{Mg}_{0.71}\text{Fe}^{2+}_{0.29})_{1.00}(\text{Al}_{1.02}\text{Cr}_{0.92}\text{Fe}^{3+}_{0.04})_{1.98}\text{O}_{4.00}$

Примечание. Здесь и далее прочерк означает, что содержание элемента ниже предела обнаружения.

Серпентин ($\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$), развитый по оливину и ортопироксену, представлен альфа-лизардитом по классификации А.С. Варлакова [13] или к петельчатым серпентином по классификации В.Р. Артемова [14]. Акцессорные минералы представлены оливином, пироксенами, амфиболами, интерметаллидами, сульфидами, арсенидами Fe, Ni, Cu и минералами платиновой группы (МПГ).

Оливин ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), встречающийся как внутри, так и в интерстициях между рудными зёрнами хромититов (рис. 3А), по химическому составу соответствует форстериту (Fo_{94-95}). Содержание MgO – 52.44–56.52 мас. %; FeO – 4.95–5.73; NiO – 0.50–0.77; MnO – 0.16; SiO₂ – 40.62–43.62 (таблица 3).

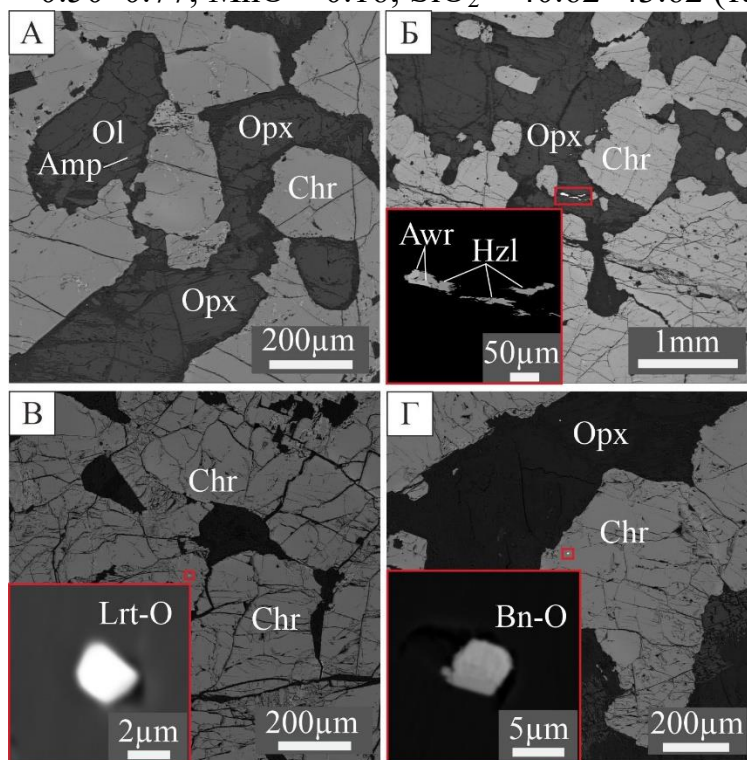


Рисунок 3 – Породообразующие и акцессорные в аншлифах хромититов Сарангаевского хромитопоявления:

А – СК-748(1)а; Б – СК-748(1)б; В,Г – СК-748(2)а. Условные обозначения: Amp – амфибол; Awr – аварит; Bn-O – борнит (окисленный); Chr – хромитинелид; Hzl – хизлевудит; Lrt – лаурит; Opx – ромбический пироксен.

Обнаруженные в хромититах зёрна пироксена (см. рис. 3А,Б,Г) по химическому составу соответствуют энстатиту ($\text{En}_{0.92-0.93}\text{Wo}_{0.01}\text{Fs}_{0.06-0.07}$) и диопсиду ($\text{En}_{0.48-0.51}\text{Wo}_{0.47-0.50}\text{Fs}_{0.01-0.02}$) (рис. 4А).

Содержание MgO для ромбических пироксенов составляет 35.33–39.42 мас. %; FeO – 4.29–5.19; CaO – 0.26–0.86; SiO₂ – 56.13–58.78; Al₂O₃ – 1.26–2.08; Cr₂O₃ – 0.34–0.72. Для моноклинных пироксенов: CaO – 23.47–26.16 мас. %; MgO – 17.63–18.37; FeO – 0.94–1.43; SiO₂ 53.13–55.15; Al₂O₃ – 0.34–2.79; Cr₂O₃ – 0.30–0.93; TiO₂ – 0.18 (таблица 4).

Таблица 3 – Представительные анализы химического состава оливина из хромититов

№ п/п	№ обр.	MgO	FeO	NiO	MnO	SiO ₂	Всего	Fo
1	СК-748(1)а	52.44	5.52	0.67	-	40.62	99.25	0.94
2		52.60	5.52	0.77	-	41.11	100.00	0.94
3		53.76	5.10	0.67	0.16	41.50	101.19	0.95
4		53.76	4.95	0.70	-	41.32	100.73	0.95
5	СК-748(1)б	53.75	5.23	0.66	-	41.55	101.19	0.95
6		53.33	5.17	0.69	-	41.48	100.67	0.95
7		52.93	5.16	0.65	-	41.16	99.90	0.95
8		53.18	5.73	0.50	-	41.67	101.08	0.94
Кристаллохимическая формула								
1	СК-748(1)а	$(\text{Mg}_{1.89}\text{Fe}_{0.11}\text{Ni}_{0.01})_{2.01}\text{Si}_{0.98}\text{O}_{4.00}$						
2		$(\text{Mg}_{1.88}\text{Fe}_{0.11}\text{Ni}_{0.01})_{2.00}\text{Si}_{0.99}\text{O}_{4.00}$						
3		$(\text{Mg}_{1.90}\text{Fe}_{0.10}\text{Ni}_{0.01})_{2.01}\text{Si}_{0.98}\text{O}_{4.00}$						
4		$(\text{Mg}_{1.90}\text{Fe}_{0.10}\text{Ni}_{0.01})_{2.01}\text{Si}_{0.98}\text{O}_{4.00}$						
5	СК-748(1)б	$(\text{Mg}_{1.90}\text{Fe}_{0.10}\text{Ni}_{0.01})_{2.01}\text{Si}_{0.99}\text{O}_{4.00}$						
6		$(\text{Mg}_{1.89}\text{Fe}_{0.10}\text{Ni}_{0.01})_{2.00}\text{Si}_{0.99}\text{O}_{4.00}$						
7		$(\text{Mg}_{1.89}\text{Fe}_{0.10}\text{Ni}_{0.01})_{2.00}\text{Si}_{0.99}\text{O}_{4.00}$						
8		$(\text{Mg}_{1.88}\text{Fe}_{0.11}\text{Ni}_{0.01})_{2.00}\text{Si}_{0.99}\text{O}_{4.00}$						

Примечание. Fo=Mg/(Mg+Fe²⁺)

Амфиболы характеризуются разнообразным составом от паргасита и магнезиальной роговой обманки до эденита (см. рис. 4Б, В). Содержание Na₂O – 0.43–1.99 мас. %; K₂O – 0.08–0.23; CaO – 12.29–13.55; MgO – 19.98–24.54; FeO – 1.38–2.37; NiO – 0.18–0.28; Al₂O₃ – 2.20–10.71; Cr₂O₃ – 0.49–2.23; TiO₂ – 0.13–0.74; SiO₂ 46.99–57.30.

Другие акцессорные минералы, встреченные в виде включений как внутри зёрен хромшпинелидов, так и в интерстициях между ними, представлены аваруитом (Ni₃Fe), хизлевудитом (Ni₃S₂), диенеритом (Ni₃As), окисленным борнитом (Cu₅FeS₄) и лауритом (RuS₂) (см. рис. 3, Б-Г; рис. 4Г).

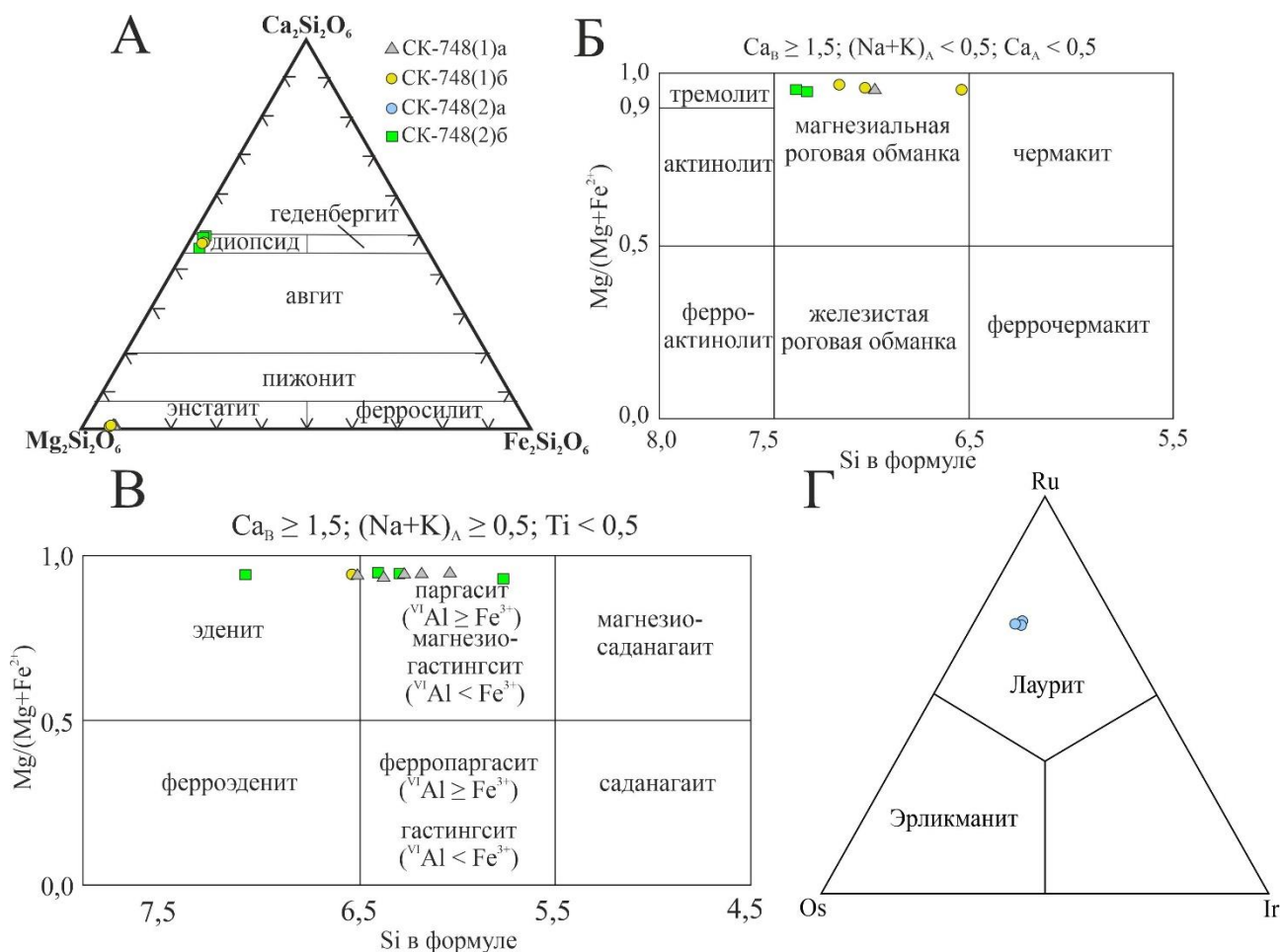


Рисунок 4 – Особенности состава акцессорных минералов:

А – ромбических и моноклинных пироксенов [16]; Б-В – амфиболов [11]; Г – минералов платиновой группы (МПГ).

Обсуждение результатов. Хромититы Сарангаевского рудопроявления характеризуются нетипичным составом, как в целом для массивов Крака, так и для Хамитовской площади (т.е. юго-западной части массива Средний Крака), в частности [2, 17]. Во-первых, обращает на себя внимание глиноземистый состав рудообразующих хромшпинелидов и значительный диапазон отношения Cr/Al , что также иллюстрируется ярко выраженной зональностью хромшпинелидов. Во-вторых, как во включениях, так и в интерстициальном пространстве хромититов, в большом количестве присутствуют реликтовые минералы мантийного парагенезиса – оливин, орто- и клинопироксен, что является очень редким явлением для мантийных разрезом офиолитов в целом. Еще одной парадоксальной особенностью данного рудопроявления является то, что обилие первичных силикатов в хромититах диссонирует с полной серпентинизацией вмещающих пород.

Таблица 4 – Химический состав пироксенов из хромититов

№ п/п	№ образца	MgO	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Сумма	En	Wo	Fs
Энстатит											
1	СК-748(1)а	35.33	4.53	0.62	56.13	1.70	0.51	98.82	0.92	0.01	0.07
2		36.54	4.62	0.46	57.55	1.41	0.37	100.95	0.93	0.01	0.07
3		35.98	4.56	0.39	56.94	1.66	0.54	100.07	0.93	0.01	0.07
4	СК-748(1)б	35.85	4.29	0.48	57.01	1.40	0.54	99.57	0.93	0.01	0.06
5		36.36	4.51	0.48	57.23	1.71	0.49	100.78	0.93	0.01	0.06
6		36.54	4.35	0.38	57.11	1.54	0.50	100.42	0.93	0.01	0.06
7		35.80	4.62	0.41	56.26	1.69	0.47	99.25	0.93	0.01	0.07
Диопсид											
8	СК-748(2)б	17.63	1.09	25.41	53.13	1.46	0.87	99.59	0.48	0.50	0.02
9		18.16	0.94	25.70	54.73	0.34	0.30	100.17	0.49	0.50	0.01
Кристаллохимическая формула											
1	СК-748(1)а	$(Mg_{1.82}Fe_{0.13}Ca_{0.02})_{1.97}(Si_{1.94}Al_{0.07}Cr_{0.01})_{2.02}O_{6.00}$									
2		$(Mg_{1.84}Fe_{0.13}Ca_{0.02})_{1.99}(Si_{1.95}Al_{0.06}Cr_{0.01})_{2.02}O_{6.00}$									
3		$(Mg_{1.83}Fe_{0.13}Ca_{0.01})_{1.97}(Si_{1.94}Al_{0.07}Cr_{0.01})_{2.02}O_{6.00}$									
4	СК-748(1)б	$(Mg_{1.83}Fe_{0.12}Ca_{0.02})_{1.97}(Si_{1.96}Al_{0.06}Cr_{0.01})_{2.03}O_{6.00}$									
5		$(Mg_{1.84}Fe_{0.13}Ca_{0.02})_{1.99}(Si_{1.94}Al_{0.07}Cr_{0.01})_{2.02}O_{6.00}$									
6		$(Mg_{1.85}Fe_{0.12}Ca_{0.01})_{1.98}(Si_{1.94}Al_{0.06}Cr_{0.01})_{2.01}O_{6.00}$									
7		$(Mg_{1.82}Fe_{0.13}Ca_{0.02})_{1.97}(Si_{1.94}Al_{0.07}Cr_{0.01})_{2.02}O_{6.00}$									
8	СК-748(2)б	$(Ca_{0.99}Mg_{0.96}Fe_{0.03})_{1.98}(Si_{1.93}Al_{0.06}Cr_{0.03})_{2.02}O_{6.00}$									
9		$(Ca_{1.00}Mg_{0.98}Fe_{0.03})_{2.01}(Si_{1.98}Al_{0.01}Cr_{0.01})_{2.00}O_{6.00}$									

Примечание. En=Mg/(Mg+Fe²⁺+Ca); Fs= Fe²⁺/(Mg+Fe²⁺+Ca); Wo=Ca/(Mg+Fe²⁺+Ca).

В то же время, состав пироксенов из хромититов отличается от такового перидотитов внутренней части массива пониженным содержанием алюминия, а в клинопироксене также фиксируются весьма низкие концентрации натрия и титана. Это указывает скорее всего на истощенный характер вмещающих ультрамафитов.

На основе обнаруженных в аншлифах зёрен оливинов и пироксенов были рассчитаны оливин-шпинелевые [18–20] и дупироксеновые [21–23] геотермометры, а также гео- и оксигарометры [24] (рис. 5). Полученные значения показали, хромититы формировались при температурах 650–1050°C (см. рис. 5А) при давлении 5–5.5 кбар (см. рис. 5Б) и фугитивности кислорода $\Delta \log(fO_2) = +0.71 \dots +2.51$ (см. рис. 5В). Причем установление равновесия в пироксенах происходило при температурах стабильно выше на 200–250°C, чем в парах оливина и хромшпинелидов. (см. рис. 5А). Это объясняется различной скоростью диффузии Fe и Mg в рассматриваемых парах.

Таблица 5 – Химический состав амфиболов из хромититов

№ п/п	№ образца	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	FeO	NiO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Сумма
1	СК-748(1)а	1.54	0.14	12.59	21.13	2.37	-	9.29	2.07	0.66	49.65	99.45
2		1.40	0.10	12.57	21.73	2.09	0.19	8.01	1.42	0.47	51.45	99.44
3		0.68	-	12.58	23.72	1.89	-	3.97	0.73	0.22	55.61	99.42
4		1.69	0.08	12.35	21.68	2.35	0.20	8.89	1.60	0.64	50.63	100.10
5		1.63	0.13	12.29	20.81	2.27	0.18	10.29	2.09	0.74	49.24	99.66
6		1.54	0.11	12.35	21.70	2.36	-	8.46	1.48	0.59	50.75	99.35
7	СК-748(1)б	0.95	-	13.34	22.11	1.93	-	5.66	1.41	0.32	53.06	98.79
8		0.55	-	13.14	23.71	1.39	-	3.28	0.58	0.16	56.23	99.04
9		0.61	-	13.02	23.10	1.77	0.23	3.64	0.61	0.13	54.86	97.97
10		1.29	-	13.02	21.47	2.08	-	8.03	1.27	0.53	51.23	98.93
11	СК-748(2)б	1.45	-	13.48	21.09	1.83	0.28	8.17	1.79	0.22	50.34	98.67
12		0.43	-	13.29	23.51	1.38	-	2.30	0.85	-	56.74	98.50
13		0.53	-	13.04	24.54	1.60	-	2.20	0.49	-	57.30	99.70
Кристаллохимическая формула												
1	СК-748(1)а	$(\text{Na}_{0.74}\text{K}_{0.04})_{0.78}(\text{Ca}_{1.68}\text{Mg}_{0.29}\text{Fe}^{2+}_{0.25})_{2.22}(\text{Mg}_{3.63}\text{Al}_{0.90}\text{Cr}_{0.41}\text{Ti}_{0.06})_{5.00}(\text{Si}_{6.18}\text{Al}_{1.82})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
2		$(\text{Na}_{0.69}\text{K}_{0.03})_{0.72}(\text{Ca}_{1.71}\text{Mg}_{0.33}\text{Fe}^{2+}_{0.22}\text{Ni}_{0.02})_{2.28}(\text{Mg}_{3.75}\text{Al}_{0.90}\text{Cr}_{0.28}\text{Ti}_{0.05})_{5.00}(\text{Si}_{6.51}\text{Al}_{1.49})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
3		$(\text{Ca}_{1.70}\text{Na}_{0.33})_{2.03}(\text{Mg}_{4.44}\text{Fe}^{2+}_{0.20}\text{Al}_{0.16}\text{Cr}_{0.15}\text{Ti}_{0.02})_{4.97}(\text{Si}_{6.99}\text{Al}_{1.01})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
4		$(\text{Na}_{0.81}\text{K}_{0.03})_{0.84}(\text{Ca}_{1.64}\text{Mg}_{0.26}\text{Fe}^{2+}_{0.24}\text{Ni}_{0.02})_{2.16}(\text{Mg}_{3.75}\text{Al}_{0.88}\text{Cr}_{0.31}\text{Ti}_{0.06})_{5.00}(\text{Si}_{6.28}\text{Al}_{1.72})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
5		$(\text{Na}_{0.77}\text{K}_{0.04})_{0.81}(\text{Ca}_{1.62}\text{Mg}_{0.31}\text{Fe}^{2+}_{0.23}\text{Ni}_{0.02})_{2.18}(\text{Mg}_{3.48}\text{Al}_{1.03}\text{Cr}_{0.41}\text{Ti}_{0.07})_{5.01}(\text{Si}_{6.05}\text{Al}_{1.95})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
6		$(\text{Na}_{0.75}\text{K}_{0.04})_{0.79}(\text{Ca}_{1.67}\text{Mg}_{0.30}\text{Fe}^{2+}_{0.25})_{2.21}(\text{Mg}_{3.77}\text{Al}_{0.88}\text{Cr}_{0.29}\text{Ti}_{0.06})_{5.00}(\text{Si}_{6.38}\text{Al}_{1.62})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
7	СК-748(1)б	$(\text{Ca}_{1.77}\text{Na}_{0.45})_{2.22}(\text{Mg}_{4.07}\text{Cr}_{0.27}\text{Al}_{0.20}\text{Fe}^{2+}_{0.20}\text{Ti}_{0.03})_{4.77}(\text{Si}_{6.55}\text{Al}_{1.45})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
8		$(\text{Ca}_{1.80}\text{Na}_{0.27})_{2.07}(\text{Mg}_{4.50}\text{Al}_{0.15}\text{Fe}^{2+}_{0.15}\text{Cr}_{0.12}\text{Ti}_{0.02})_{4.94}(\text{Si}_{7.16}\text{Al}_{0.84})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
9		$(\text{Ca}_{1.79}\text{Na}_{0.30})_{2.10}(\text{Mg}_{4.42}\text{Fe}^{2+}_{0.19}\text{Al}_{0.14}\text{Cr}_{0.12}\text{Ni}_{0.02}\text{Ti}_{0.01})_{4.90}(\text{Si}_{7.04}\text{Al}_{0.96})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
10		$\text{Na}_{0.64}(\text{Ca}_{1.78}\text{Mg}_{0.35}\text{Fe}^{2+}_{0.22})_{2.35}(\text{Mg}_{3.74}\text{Al}_{0.96}\text{Cr}_{0.26}\text{Ti}_{0.05})_{5.00}(\text{Si}_{6.54}\text{Al}_{1.46})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
11	СК-748(2)б	$\text{Na}_{0.71}(\text{Ca}_{1.84}\text{Mg}_{0.22}\text{Fe}^{2+}_{0.18}\text{Ni}_{0.03})_{2.28}(\text{Mg}_{3.77}\text{Al}_{0.85}\text{Cr}_{0.36}\text{Ti}_{0.02}\text{Fe}^{2+}_{0.01})_{5.01}(\text{Si}_{6.40}\text{Al}_{1.60})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
12		$(\text{Ca}_{1.85}\text{Na}_{0.22})_{2.07}(\text{Mg}_{4.55}\text{Cr}_{0.18}\text{Fe}^{2+}_{0.15}\text{Al}_{0.06})_{4.94}(\text{Si}_{7.36}\text{Al}_{0.64})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										
13		$(\text{Ca}_{1.79}\text{Na}_{0.26})_{2.05}(\text{Mg}_{4.68}\text{Fe}^{2+}_{0.17}\text{Cr}_{0.10})_{4.95}(\text{Si}_{7.33}\text{Al}_{0.66})_{8.00}(\text{OH})_{2.00}$										

Наиболее быстро равновесие устанавливается между сосуществующими пироксенами, тогда как между оливином и шпинелидами этот процесс уравнивания более длительный во времени и прекращается при более низких температурах. Из проведенных расчетов можно заключить, что наиболее

высокотемпературные равновесия фиксируют либо стадию кристаллизации из расплава, либо субсолидусные процессы в рестите. Пока сложно однозначно ответить на вопрос – являются ли данные хромититы кумулатами переходного комплекса, или же это редкий случай формирования хромититов в перидотитовом реститовом субстрате.

Большая часть обнаруженных амфиболов в хромититах Сарангаевского рудопроявления имеет магматический генезис. Об этом свидетельствует расположение фигуративных точек их составов на дискриминантных диаграммах в поля магматических амфиболов (рис. 5Г,Д), для которых предполагается корово-мантийный источник (рис. 5Е). Единичные фигуративные точки амфиболов тяготеют к полям метаморфических (рис. 5Г,Д) с коровым источником (рис. 5Е).

Происхождение интерметаллидов, сульфидов и арсенидов связано с коровыми условиями [28]. Диенерит, хизлевудит и борнит вероятно образовались при низких температурах (<500 °С) в результате проработки хромититов флюидами, насыщенными S, As, Ni, Cu как это характерно для гарутита в хромититах массива Средний Крака [29]. Образование аваруита связано с десульфуризацией пентландита [30] или при замещении оливина в процессе серпентинизации [28;31–32]. Что касается механизма концентрации МПГ в хромититах дискусионен. Один из возможных вариантов – концентрация платиноидов в хромититах в результате частичного плавления ультрамафитов. Дело в том, что в неистощенных лерцолитах в ассоциации с пироксенами [33–34] часто отмечаются довольно обильные выделения сульфидов основных металлов (пирротин, пентландит, халькопирит), которые могут содержать значительные количества ЭПГ. В процессе частичного плавления и распада пироксенов и сульфидов, тугоплавкие платиноиды могли быть включены в новообразованный хромшпинелид рестита [35]. Другой вариант: кумулятивный хромит концентрировал микронные выделения тугоплавких МПГ на ранних стадиях кристаллизации.

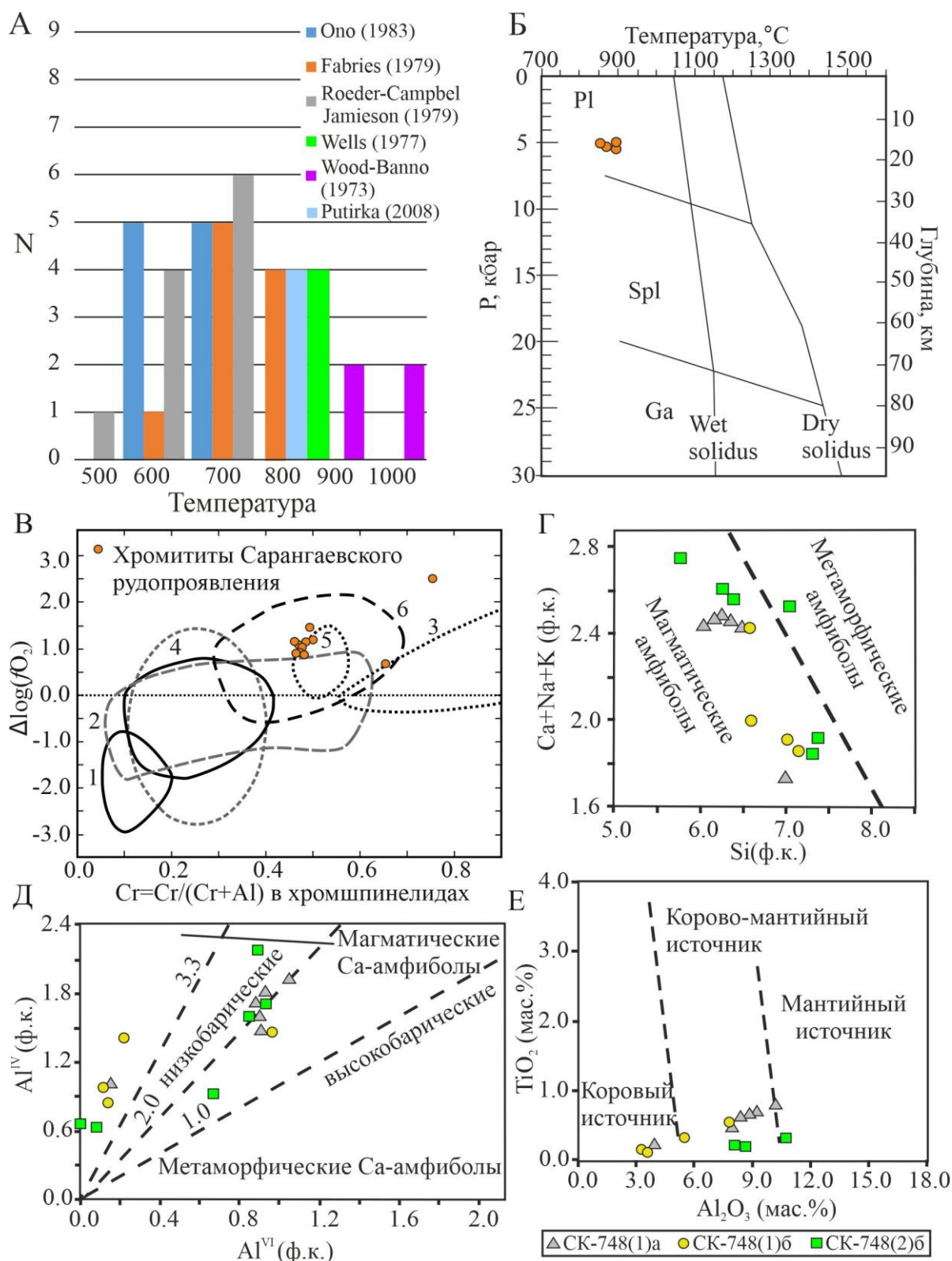


Рисунок 5 – Условия образования рудообразующих и акцессорных минералов хромититов Сарангаевского рудопроявления:

А – сравнение температур образования минералов в хромититах по оливин-шпинелевым [18–20] и двутироксеновым [21–23] геотермометрам; Б, В – оценка давлений (Б) по [23] и фугитивности кислорода (В) по [24]; Дискриминационные диаграммы для амфиболов: Г – Si – Ca+Na+K(z) [25]; Д – Al^{VI} – Al^{IV} [26]; Е – Al₂O₃ – TiO₂ (мас.%) [27].

Заключение. В результате проведенных исследований охарактеризована минералогия Сарангаевского рудопроявления, включая редкие акцессорные минералы. Показано, что хромититы имеют нетипичный для массива глиноземистый состав и богатую силикатную минерализацию мантийного парагенезиса. Для хромититов характерно наличие тугоплавкой ассоциации МПГ. Оценка P - T - fQ_2 условий кристаллизации по пироксеновым и оливин-хромшпинелевым равновесиям показала, что хромититы могли формироваться в условиях субсолидуса в рестите, либо являться ранними кумулятами расплавов, родоначальных для переходного верлит-клинопироксенитового комплекса. Для более точной интерпретации генезиса руд необходимо проведение дополнительных исследований

Финансирование. Исследования выполнены за счет темы Госзадания (FMRS-2025-0014).

Funding. The research was supported by State Assignment (FMRS-2025-0014).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou M.-F., Robinson P.T., Malpas J., Li Z. Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite (Southern Tibet): Implications for Melt-Rock Interaction and Chromite Segregation in the Upper Mantle // *Journal of Petrology*. 1996. Vol. 37, No. 1. P. 3–21.
2. Савельев Д.Е. Ультрамафитовые массивы Крака (Южный Урал): особенности строения и состава перидотит-дунит-хромититовых ассоциаций. Уфа: Башкирская энциклопедия, 2018. 304 с.
3. Вахрушева Н.В., Ширяев П.Б., Степанов А.Е., Богданова А.Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 2017. 265 с.
4. Cassard D., Nicolas A., Rabinowitch M., Moutte J., Leblanc M., Prinzhofer A. Structural Classification of Chromite Pods in Southern New Caledonia // *Economic Geology*. 1981. Vol. 76. P. 805–831.
5. Miura M., Arai S., Ahmed A.H., Mizukami T., Okuno M., Yamamoto S. Podiform chromitite classification revisited: a comparison of discordant and concordant chromitite pods from Wadi Hilti, northern Oman ophiolite // *Journal of Asian Earth Science*. 2012. Vol.59. P.52–61.
6. Greenbaum D. The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus // *Economic Geology*. 1977. Vol. 72. P. 1175–1194.
7. Leblanc M., Violette J.-F. Distribution of aluminium-rich and chromium-rich chromite pods in ophiolite peridotites // *Economic Geology*. 1983. Vol.78. P.293–301.
8. Кравченко Г.Г. Роль тектоники при кристаллизации хромитовых руд Кемпирсайского плутона. М.: Наука, 1969. 232 с.

9. Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб: Наука, 1999. 198 с.
10. Савельев Д.Е., Белогуб Е.В., Зайков В.В., Сначев В.И., Котляров В.А., Блинов И.А. Платинометальная минерализация в ультрамафитах массива Средний Крака (Южный Урал) // Руды и металлы. 2014. №6. С.33–42.
11. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne W.C., Kato A., Kisch K.J., Krivovichev V.G., Lithout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.A., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association commission on new minerals and mineral names // Canadian Mineralogist. 1997. Vol. 35. P. 219–246.
12. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. 2021. Vol. 85. P. 291–320. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
13. Варлаков А.С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 224 с.
14. Артемов В.Р., Кузнецова В.Н. Кiemбайское месторождение хризотил-асбеста. М.: Недра, 1979. 233 с.
15. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды института геологических наук АН СССР. 1949. № 13. С. 10–35.
16. Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes // Canadian mineralogist. 1989. Vol. 27. P.143–156.
17. Saveliev D.E. Chromitites of the Kraka ophiolite (South Urals, Russia): geological, mineralogical and structural features // Mineralium Deposita. 2021. Vol. 56, No.6. P. 1111–1132. doi.org/10.1007/s00126-021-01044-5
18. Fabries J. Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1979. Vol. 69 P. 329–336. <https://doi.org/10.1007/BF00372258>
19. Roeder R.L., Campbell I.H., Jamieson H.E. A Re-Evaluation of the Olivine-Spinel Geothermometer // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1979. Vol. 68. P. 325–334. <https://doi.org/10.1007/BF00371554>
20. Ono A. Fe-Mg partitioning between spinel and olivine // Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists. 1983. Vol. 78. P. 115–122.
21. Wood B.J., Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1973. Vol. 42. P. 109–124. <https://doi.org/10.1007/BF00371501>
22. Wells P.R.A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1977. Vol. 62. P. 129–139. <https://doi.org/10.1007/BF00372872>

23. Putrika K.D. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008. Vol.69. P. 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
24. Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H. High-pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1991. Vol.107. P. 27–40.
25. Czamanske G.K., Wones D.R. Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarks Complex, Oslo Area, Norway: Part 2, the mafic silicate // *Journal of Petrology*. 1973. Vol.14, No.3. P. 349–380
26. Ernst W.G., Liu J. Experimental Phase-Equilibrium Study of Al- and Ti-contents of Calcic Amphibole in MORB – A Semiquantitative Thermobarometer // *American Mineralogist*. 1998. Vol. 83. P. 952–969.
27. Changyi J., Sanyuan A. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance // *Journal of Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol.3. P. 1–9.
28. Klein F., Bach W. Fe-Ni-Co-O-S phase relations in peridotite-seawater interactions // *Journal of Petrology*. 2009. Vol.50, No.1. P. 37–59. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn071>
29. Garuti G., Pushkarev E.V., Gottman I.A., Zaccarini F. Chromite-PGM mineralization in the Iherzolite mantle tectonite of the Kraka ophiolite complex (Southern Urals, Russia) // *Minerals*. 2021. Vol. 11. P. 1287. <https://doi.org/10.3390/min11111287>
30. Kutuyev A., Kamenetsky V.S., Kontonikas-Charos A., Savelyev D.P., Yakich T.Yu., Belousov I.A., Sandimirova E.I., Moskaleva S.V. Behavior of Platinum-group elements during hydrous metamorphism: constraints from awaruite (Ni₃Fe) mineralization // *Lithosphere*. 2023. Vol.126. P. 1–15. https://doi.org/10.2113/2023/lithosphere_2023_126
31. Сандимирова Е.И., Сидоров Е.Г., Чубаров В.М. Акцессорные минералы железа и никеля гипербазитового массива горы Попутной (Восточная Камчатка) // *Записки Российского минералогического общества*. 2016. Т.144, №2. С. 71–82.
32. Britten R. Regional metallogeny and genesis of a new deposit type-disseminated awaruite (Ni₃Fe) mineralization hosted in the Cache Creek Terrane // *Economic Geology*. 2017. Vol.112, No.3. P. 517–550. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.3.517>
33. Gonzalez-Jimenez J.M., Griffin W.L., Gervilla F., Proenza J.A., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part I. A review and new ideas on the origin and significance of platinum-group minerals. // *Lithos*. 2014. Vol.189. P. 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.06.016>

34. Савельев Д.Е., Гатауллин Р.А. Акцессорная платиноидная минерализация в лерцолитах массива Северный Крака (Южный Урал) // Георесурсы. 2023. Т. 25, №3. С. 208–215. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.24>.

35. Saveliev D.E. Chromitites and associated mineralization of the Akkarga ophiolitic massif in the southeastern Urals (Russia) // Journal of Asian Earth Science. 2024. Vol. 273. 106273.

REFERENCES

1. Zhou M.-F., Robinson P.T., Malpas J., Li Z. Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite (Southern Tibet): Implications for Melt-Rock Interaction and Chromite Segregation in the Upper Mantle // Journal of Petrology. 1996. Vol. 37, No. 1. P. 3–21.

2. Saveliev D.E. Ultramafic massifs of Kraka (Southern Urals): features of the structure and composition of peridotite-dunite-chromitite associations. Ufa: Bashkir Encyclopedia, 2018. 304 p. (in Russian)

3. Vakhrusheva N.V., Shiryaev P.B., Stepanov A.E., Bogdanova A.R. Petrology and chromite content of the Rai-Iz ultramafic massif (Polar Urals). Ekaterinburg: IGG UB RAS, 2017. 265 p. (in Russian)

4. Cassard D., Nicolas A., Rabinowitch M., Moutte J., Leblanc M., Prinzhofer A. Structural Classification of Chromite Pods in Southern New Caledonia // Economic Geology. 1981. Vol.76. P. 805–831.

5. Miura M., Arai S., Ahmed A.H., Mizukami T., Okuno M., Yamamoto S. Podiform chromitite classification revisited: a comparison of discordant and concordant chromitite pods from Wadi Hilti, northern Oman ophiolite. // Journal of Asian Earth Science. 2012. Vol.59. P.52–61.

6. Greenbaum D. The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus // Economic Geology. 1977. Vol.72. P. 1175–1194.

7. Leblanc M., Violette J.-F. Distribution of aluminium-rich and chromium-rich chromite pods in ophiolite peridotites // Economic Geology. 1983. Vol.78. P.293–301.

8. Kravchenko G.G. The Role of Tectonics in the Crystallization of Chromite Ores of the Kempirsai Pluton. Moscow: Nauka, 1969. 232 p. (in Russian)

9. Makeev A.B., Brianchaninova N.I. Topomineralogy of Ultramafic Rocks of the Polar Urals. St. Petersburg: Nauka, 1999. 198 p. (in Russian)

10. Saveliev D.E., Belogub E.V., Zaikov V.V., Snachev V.I., Kotlyarov V.A., Blinov I.A. Platinum-Metal Mineralization in Ultramafic Rocks of the Sredny Kraka Massif (Southern Urals) // Ores and Metals. 2014. Vol.6. P. 33–42. (in Russian)

11. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne W.C., Kato A., Kisch K.J., Krivovichev V.G., Lithout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.A., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International

Mineralogical Association commission on new minerals and mineral names // Canadian Mineralogist. 1997. Vol.35. P. 219–246.

12. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. 2021. Vol.85. P. 291–320. doi.org/10.1180/mgm.2021.43

13. Varlakov A.S. Petrology of serpentinization processes of ultramafic rocks in folded regions. Sverdlovsk: Ufa Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1986. 224 p. (in Russian)

14. Artemov V.R., Kuznetsova V.N. Kiembayskoye chrysotile asbestos deposit. Moscow: Nedra, 1979. 233 p. (in Russian)

15. Pavlov N.V. Chemical composition of chrome spinels in relation to the petrographic composition of ultramafic intrusive rocks // Transactions of the Institute of Geological Sciences of the USSR Academy of Sciences. 1949. Vol.13. P. 10–35. (in Russian)

16. Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes // Canadian mineralogist. 1989. Vol.27. P.143–156.

17. Saveliev D.E. Chromitites of the Kraka ophiolite (South Urals, Russia): geological, mineralogical and structural features // Mineralium Deposita. 2021. Vol. 56, No. 6. P. 1111–1132. doi.org/10.1007/s00126-021-01044-5)

18. Fabries J. Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1979. Vol. 69. P. 329–336. <https://doi.org/10.1007/BF00372258>

19. Roeder R.L., Campbell I.H., Jamieson H.E. A Re-Evaluation of the Olivine-Spinel Geothermometer // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1979. Vol. 68. P. 325–334. <https://doi.org/10.1007/BF00371554>

20. Ono A. Fe-Mg partitioning between spinel and olivine // Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists. 1983. Vol. 78. P. 115–122.

21. Wood B.J., Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1973. Vol. 42. P. 109–124. <https://doi.org/10.1007/BF00371501>

22. Wells P.R.A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1977. Vol. 62. P. 129–139. <https://doi.org/10.1007/BF00372872>

23. Putrika K.D. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2008. Vol. 69. P. 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>.

24. Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H. High-pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1991. Vol.107. P. 27–40.

25. Czamanske G.K., Wones D.R. Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarks Complex, Oslo Area, Norway: Part 2, the mafic silicate // *Journal of Petrology*. 1973. Vol.14, No.3. P. 349–380
26. Ernst W.G., Liu J. Experimental Phase-Equilibrium Study of Al- and Ti-contents of Calcic Amphibole in MORB – A Semiquantitative Thermobarometer // *American Mineralogist*. 1998. Vol. 83. P. 952–969.
27. Changyi J., Sanyuan A. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance // *Journal of Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol.3. P. 1–9.
28. Klein F., Bach W. Fe-Ni-Co-O-S phase relations in peridotite-seawater interactions // *Journal of Petrology*. 2009. Vol.50, No.1. P. 37–59. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn071>
29. Garuti G., Pushkarev E.V., Gottman I.A., Zaccarini F. Chromite-PGM mineralization in the Iherzolite mantle tectonite of the Kraka ophiolite complex (Southern Urals, Russia) // *Minerals*. 2021. Vol. 11. P. 1287. <https://doi.org/10.3390/min11111287>
30. Kuttyrev A., Kamenetsky V.S., Kontonikas-Charos A., Savelyev D.P., Yakich T.Yu., Belousov I.A., Sandimirova E.I., Moskaleva S.V. Behavior of Platinum-group elements during hydrous metamorphism: constraints from awaruite (Ni₃Fe) mineralization // *Lithosphere*. 2023. Vol.126. P. 1–15. https://doi.org/10.2113/2023/lithosphere_2023_126
31. Sandimirova E.I., Sidorov E.G., Chubarov V.M. Accessory minerals of iron and nickel of the ultramafic massif of Mount Poputnaya (Eastern Kamchatka) // *Notes of the Russian Mineralogical Society*. 2016. Vol. 144, No. 2. P. 71–82. (in Russian)
32. Britten R. Regional metallogeny and genesis of a new deposit type-disseminated awaruite (Ni₃Fe) mineralization hosted in the Cache Creek Terrane // *Economic Geology*. 2017. Vol.112, No.3. P. 517–550. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.3.517>
33. Gonzalez-Jimenez J.M., Griffin W.L., Gervilla F., Proenza J.A., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part I. A review and new ideas on the origin and significance of platinum-group minerals. // *Lithos*. 2014. Vol.189. P. 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.06.016>
34. Saveliev D.E., Gataullin R.A. Accessory platinum group mineralization in Iherzolites of the Northern Kraka massif (Southern Urals) // *Georesources*. 2023. Vol.25, No.3. P. 208–215. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.24>. (in Russian)
35. Saveliev D.E. Chromitites and associated mineralization of the Akkarga ophiolitic massif in the southeastern Urals (Russia) // *Journal of Asian Earth Science*. 2024. Vol. 273. 106273.

Сведения об авторах:

Шабутдинов Тимур Денисович, младший научный сотрудник, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН). 450006, г. Уфа, Российская Федерация ул. Карла Маркса, д. 16/2. E-mail: timurgeolog11@gmail.com

Савельев Дмитрий Евгеньевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН). 450006, г. Уфа, Российская Федерация ул. Карла Маркса, д. 16/2. E-mail: savl71@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8910-6992.

Author's personal details

Shabutdinov Timur Denisovich, junior researcher, Institute of Geology - a separate structural unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFIC RAS). 450006, Ufa, Russian Federation st. Karla Marksa, 16/2. E-mail: timurgeolog11@gmail.com

Saveliev Dmitry Evgenievich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Institute of Geology - a separate structural unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFIC RAS). 450006, Ufa, Russian Federation st. Karla Marksa, 16/2. E-mail: savl71@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8910-6992.

© Шабутдинов Т.Д., Савельев Д.Е.