

## **Минеральные микровключения в хромитовых рудах Восточно-Варшавского рудного поля (Южный Урал)**

В Уральской металлогенической провинции известны многочисленные месторождения и рудопроявления хромитов, приуроченные к альпинотипным гипербазитам [Перевозчиков, 2004]. В последние годы наблюдается повышенный интерес исследователей к изучению минералогии хромитовых руд метаморфизованных гипербазитовых массивов. Наиболее интенсивно проводятся исследования минералогических особенностей руд Верблюжьегогорского гипербазитового массива, что связано с его наибольшими перспективами для добычи хромитовых руд. Расположенный вблизи Верблюжьегогорского, Южно-Варшавский массив в минералогическом отношении изучен менее детально.

Целью исследования является характеристика минеральных микровключений в различных типах хромитовых руд Восточно-Варшавского рудного поля. Работа проведена для пополнения минерального кадастра месторождений хромитовых руд.

Южно-Варшавский гипербазитовый массив расположен в пределах Восточно-Уральского микроконтинента, перекрытого сложно построенным чешуйчатоблоковым альпинотипным шарьяжем палеозойских океанических и островодужных комплексов. Породы массива интенсивно тектонизированы, меланжированы, смяты в складки и метаморфизованы [Металлогения..., 1999]. Основная часть хромитопрояв-

лений сосредоточена в юго-восточной краевой части массива вблизи контакта с брединской свитой, образуя Восточно-Варшавское рудное поле. Руды добывались в Центральном, Восточно-Варшавском, Юго-Западном и Варшавском-2 карьерах до глубины 30–50 м. Преобладают жильобразные рудные тела преимущественно северо-западного простирания с юго-западным падением. Местами наблюдаются раздувы или пережимы мощности, разветвления, границы тел по падению нередко тектонические. Мощность тел до 7 м, прослеженная длина – до 100 м. Наиболее крупные тела прослежены по падению до 70 м, в большинстве случаев они выклиниваются на гораздо меньших глубинах. Рудные тела сложены преимущественно массивными, в меньшей степени – вкрапленными рудами [Мосейчук, Кашина, 2009]. Вблизи коренных рудных тел также известны россыпи, ныне в основном выработанные.

Основными минералами хромитовых руд Восточно-Варшавского рудного поля являются хромит, серпентин и хлорит. Хромит представлен интенсивно катаклазированными зернами с размером отдельных индивидов до 4 мм. Хлорит выполняет трещины в хромитовой руде и образует многочисленные включения внутри зерен хромита. Хромит характеризуется переменным составом (табл. 1). Резко преобладает магнезиохромит, содержание окиси магнезия колеблется от 9.64 до 13.82 мас. % [Чернобровин и др., 2004]. Первичный хромит по трещинкам и по периферии зерен замещается хроммагнетитом с содержанием (мас. %):  $\Sigma\text{FeO} - 78.45$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3 - 14.65$ .

Наиболее низкие содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (< 40 мас. %) установлены в хромите с включением пентландита из Центрального карьера и ассоциирующем с никелином из Северо-Западного карьера. В изученных образцах хромитовых руд Восточно-Варшавского рудного поля титан содержится в виде постоянной примеси 0.06–0.71 мас. %, и практически отсутствует в наиболее измененных рудах месторождения Варшавское-2. Примесь титана и ванадия в хромитах может быть связана с наличием тонких вростков минералов титана.

Большинство изученных микровключений аксессуарных минералов находится в хромитах и продуктах его изменения (хроммагнетит, хлорит) и представлено миллеритом, пентландитом, халькопиритом и никелином. Миллерит установлен в хромитовой руде месторождения Варшавское-2 в виде единичного зерна округлой формы в сечении и размером 4 мкм. Химический состав характеризуется примесью Fe (1.29 мас. %, табл. 2). В хромите Северо-Западного карьера Восточно-Варшавского рудного поля выявлено включение миллерита размером около 5 мкм с примесью Cu (1.38 мас. %) и повышенным содержанием Ni на 5 мас. % по сравнению с миллеритом месторождения Варшавское-2 (табл. 2).

Пентландит на Восточно-Варшавском рудном поле установлен в хромитовой руде Центрального и Северо-Западного карьеров. Округлое зерно пентландита размером 5 мкм (Центральный карьер) находится в каемке хроммагнетита вокруг хромита. В руде Северо-Западного карьера установлены микровключения пентландита размером до 5 мкм. Состав пентландита из хромита Северо-Западного карьера отличается от пентландита Центрального карьера повышенным содержанием Ni (около 10 мас. %) и пониженным Fe (на 7 мас. %) (табл. 2). В целом, пентландит Восточно-Варшавского рудного поля характеризуется как низкокобальтовый (содержание Co < 3 мас. %) [Боришанская и др., 1981], при этом наиболее низкие значения (0.71–0.92 мас. %) установлены в пентландите Северо-Западного карьера.

Халькопирит в хромитовой руде Центрального карьера Варшавского месторождения встречен в виде изометричного включения размером 10 мкм. Кристаллохимическая формула близка к теоретической (табл. 2).

Таблица 1

**Химический состав хромитов с включениями акцессорных минералов  
Восточно-Варшавского рудного поля (мас. %)**

№ п/п	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑FeO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма	Формула
1	9.64	23.17	0.26	39.51	26.98	–	–	99.56	(Fe <sub>0.55</sub> Mg <sub>0.45</sub> ) (Cr <sub>0.98</sub> Al <sub>0.86</sub> Fe <sub>0.15</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
2	11.52	26.76	0.30	40.46	20.55	0.20	0.09	99.88	(Mg <sub>0.52</sub> Fe <sub>0.47</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) (Cr <sub>0.98</sub> Al <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.05</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
3	12.00	13.80	–	54.83	18.95	0.32	–	99.90	(Mg <sub>0.57</sub> Fe <sub>0.42</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) (Cr <sub>1.39</sub> Al <sub>0.52</sub> Fe <sub>0.09</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
4	13.17	18.51	–	50.71	17.54	0.03	–	99.96	(Mg <sub>0.61</sub> Fe <sub>0.39</sub> ) (Cr <sub>1.25</sub> Al <sub>0.68</sub> Fe <sub>0.07</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
5	11.57	13.23	–	54.67	20.49	0.05	–	100.01	(Mg <sub>0.55</sub> Fe <sub>0.45</sub> ) (Cr <sub>1.39</sub> Al <sub>0.50</sub> Fe <sub>0.10</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
6	13.82	18.75	0.18	49.36	17.08	–	0.14	99.33	(Mg <sub>0.64</sub> Fe <sub>0.36</sub> ) (Cr <sub>1.22</sub> Al <sub>0.69</sub> Fe <sub>0.09</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
7	11.09	18.64	0.19	51.61	18.21	–	0.25	100.00	(Mg <sub>0.52</sub> Fe <sub>0.48</sub> ) (Cr <sub>1.29</sub> Al <sub>0.70</sub> V <sub>0.01</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
8	10.62	24.00	0.61	38.48	26.07	0.10	0.13	100.01	(Fe <sub>0.50</sub> Mg <sub>0.49</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) (Cr <sub>0.94</sub> Al <sub>0.88</sub> Fe <sub>0.17</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

Примечание. Здесь и далее анализы получены на растровом электронном микроанализаторе РЭММА-202М с энергодисперсионной приставкой (ИМин УрО РАН, аналитик В. А. Котляров). Прочерк – компонент не обнаружен. Хромиты: 1 – с включением пентландита (аншлиф 861, Центральный карьер); 2 – в ассоциации с халькопиритом (аншлиф 861-2, Центральный карьер); 3 – с включением гетита (аншлиф ВАР2-4, Варшавское 2); 4–6 – с включением миллерита (аншлиф ВАР2-4, Варшавское-2); 7 – в ассоциации с рутилом и хлоритом (аншлиф ВАР2-5, Варшавское 2); 8 – в ассоциации с никелином (аншлиф 864-3, Северо-Западный карьер).

Таблица 2

## Химички состав корных минералов в слюде Врановского поля (м. %)

№п/п	№пр	Fe	Ni	Co	Ca	Al	Sr	S	Сума	Формула
Милерит										
1	8624	129	632	–	–	–	–	326	987	$(Ni_{0.8}Fe_{0.2})S_{10}$
2	8643	–	615	138	–	–	–	303	986	$(Ni_{1.2}Co_{0.2})_{1.2}S_{10}$
Геладит										
3	861	274	358	–	241	–	–	386	999	$(Ni_{1.6}Fe_{0.37}Co_{0.3})_{0.87}S_{80}$
4	8642	194	414	–	071	–	–	341	980	$(Ni_{1.7}Fe_{0.25}Co_{0.05})_{0.83}S_{80}$
5	8643	209	466	–	080	–	–	318	980	$(Ni_{1.1}Fe_{0.28}Co_{0.01})_{0.89}S_{80}$
6		206	445	–	092	–	–	327	970	$(Ni_{1.35}Fe_{0.29}Co_{0.02})_{0.86}S_{80}$
Хвостит										
7	8612	302	–	328	–	–	–	366	926	$Co_{0.9}Fe_{0.5}S_{20}$
Нестит										
8	8642	–	427	–	–	559	163	–	999	$(Ni_{0.8}S_{0.2})_{10}As_{10}$
9		–	467	–	–	540	177	–	994	$(Ni_{1.2}S_{0.2})_{10}As_{10}$
10		045	466	–	–	534	165	–	990	$(Ni_{1.0}S_{0.2}Fe_{0.1})_{10}As_{10}$
11		045	461	–	–	530	148	–	924	$(Ni_{1.0}S_{0.2}Fe_{0.1})_{10}As_{10}$
12		–	429	–	–	525	126	–	980	$(Ni_{1.0}S_{0.2})_{10}As_{10}$
13		064	435	–	–	538	155	–	992	$(Ni_{1.0}S_{0.2}Fe_{0.02})_{10}As_{10}$
14	8643	–	461	–	055	543	136	–	991	$(Ni_{1.2}S_{0.2}Co_{0.1})_{10}As_{10}$
15		–	444	–	–	536	267	–	1006	$(Ni_{1.0}S_{0.2})_{10}As_{10}$

Примечание. Формулы рассчитаны на 1 атом серы геладита – на 8 атомов серы хвостита – на 2 атома серы нестита – на 1 атом мышьяка

Никелин образует скопления зерен пластинчатой формы размером до 30 мкм в нерудной «матрице». Характеризуется невысоким содержанием Sb (до 2.67 мас. %) и Fe (до 0.64 мас. %). В одном случае установлен Co-содержащий никелин (0.55 мас. %). По данным рентгеноспектрального микроанализа намечается возможность выделения 3 разновидностей никелина: Sb-, Sb-Co- и Sb-Fe-содержащий.

Собственные минералы титана в хромитовой руде (проявление Варшавское-2) представлены рутилом, образующим субидiomорфные зерна со сглаженными очертаниями индивидов и звездчатые агрегаты размером до 100 мкм в хлорите. В рутиле отмечены примеси (мас. %):  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 0.00–1.98,  $\text{V}_2\text{O}_5$  – 0.58–0.96. По литературным данным в рутиле данного рудного поля установлены также примеси  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.14–0.44 и 0.09–0.15 мас. % соответственно) [Чернобровин и др., 2004]. Зерна рутила ясно выделяются на фоне сопутствующего хромшпинелида, имея повышенную отражательную способность.

Таким образом, исследование микровключений в хромитовых рудах Восточно-Варшавского рудного поля показало, что поздняя минерализация хромитовых руд представлена оксидами (хроммагнетит, гетит, рутил) с резким преобладанием магнетита, а также сульфидами (миллерит, пентландит, халькопирит) и арсенидами (никелин). Для нее характерна Ti-Fe-Ni-Cu-Co-As специализация. Пентландит и халькопирит отделяются от вмещающего хромита хроммагнетитовой каймой. Сульфидная и арсенидная акцессорная минерализация имеет гидротермально-метасоматический генезис, рутил – метаморфический, что связано с выносом Ti из вмещающего хромшпинелида. Рутил, приуроченный к хлоритовым жилкам, характеризуется относительно крупными размерами и сглаженными краями зерен, что при обогащении руды будет иметь положительное значение.

### Литература

*Борищанская Б. С., Виноградова Р. А., Крутов Г. А.* Минералы никеля и кобальта. М.: МГУ, 1981. 222 с.

Металлогения рядов геодинамических обстановок островных дуг / Под ред. *Н. В. Межеловского*. М., 1999. 436 с.

*Мосейчук В. М., Кашина Л. В.* Отчет о геологическом строении и полезных ископаемых Варшавской площади. Челябинск: ООО НТПП «Геопоиск», 2009ф.

*Перевозчиков Б. В.* Реестр хромитопроявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. Пермь: КамНИИКИГС, 2000. 474 с.

*Чернобровин В. П., Пашкеев И. Ю., Михайлов Г. Г. и др.* Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд. Челябинск: ЮУрГУ, 2004. 346 с.