

© Д. чл. Н. С. РУДАШЕВСКИЙ, В. Н. РУДАШЕВСКИЙ

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О МАЛАНИТЕ И КУПРОРОДСИТЕ
ИЗ ХРОМИТИТОВ БУШВЕЛЬДСКОГО КОМПЛЕКСА,
ЮЖНАЯ АФРИКА***ООО «ЦНТ Инструментс»,
191136, Санкт-Петербург, Невский пр., 132;
e-mail: nrudash@list.ru*

Изучена (с использованием оригинальной 3D-минералогической технологии) представительная выборка зерен тиошпинелей из трех групп горизонтов хромититов (нижней LG6, средней MG1/MG2 и верхней UG2): 46 зерен маланита (размером 4—42 мкм) и 34 зерна купорродсита (9—42 мкм). Проведен их микрозондовый анализ ($n = 61$). По результатам статистической обработки, формула маланита — $(\text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{2+})(\text{Pt}^{3+}\text{Rh}^{3+}, \text{Ir}^{3+}, \text{Co}^{3+}, \text{Ni}^{3+}\text{Fe}^{3+})\text{S}_4$, купорродсита — $(\text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{2+})(\text{Rh}^{3+}, \text{Pt}^{3+}, \text{Ir}^{3+}, \text{Fe}^{3+})\text{S}_4$. Морфология зерен тиошпинелей, их взаимоотношения с минералами платиновой группы (МПГ) и вмещающими их сульфидами позволяет отнести тиошпинели к числу ранних первичных МПГ в хромититах. Распределение купорродсита и маланита в хромититах контролировалось рэлеевским фракционированием первичного сульфидного расплава в процессе формирования хромититовых горизонтов.

Ключевые слова: маланит, купорродсит, тиошпинели, Бушвельдский комплекс, хромититы, распределение МПГ, 3D-минералогическая технология исследования.

**N. S. RUDASHEVSKY, V. N. RUDASHEVSKY. NEW DATA ON MALANITE
AND CUPRORHODSITE FROM CHROMITITES OF THE BUSHVELD COMPLEX,
SOUTH AFRICA***«CNT Instruments», LLC, Saint Petersburg, Russia*

The 3D mineralogical technology was used to study the representative selection of grains of thiospinels from 3 groups of chromitite horizons (lower LG6, middle MG1/MG2 and upper UG2): 46 grains of malanite (4—42 μm) and 34 grains of cuprorhodsite (9—42 μm). Their microprobe analysis was performed ($n = 61$). Statistics for this selection have resulted in following formulae: for malanite — $(\text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{2+})(\text{Pt}^{3+}, \text{Rh}^{3+}, \text{Ir}^{3+}, \text{Co}^{3+}, \text{Ni}^{3+}\text{Fe}^{3+})\text{S}_4$, for cuprorhodsite — $(\text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{2+}) \cdot (\text{Rh}^{3+}, \text{Pt}^{3+}, \text{Ir}^{3+}, \text{Fe}^{3+})\text{S}_4$. According to morphological properties and their relationship with platinum-group minerals (PGM) and base metal sulphides, thiospinel can be attributed as the earliest primary PGM in chromitites. The distribution of cuprorhodsite and malanite in chromitites was controlled by the Rayleigh fractionation of the primary sulfide melt in the process of formation of Bushveld chromitite horizons.

Key words: malanite, cuprorhodsite, thiospinels, Bushveld Complex, chromitites, distribution of PGM, 3D-mineralogical investigation technology.

Тиошпинели Pt, Rh и Ir — маланит $\text{Cu}(\text{Pt}, \text{Ir})_2\text{S}_4$, купорродсит $\text{Cu}(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_2\text{S}_4$ и купроиродсит $\text{Cu}(\text{Ir}, \text{Rh}, \text{Pt})_2\text{S}_4$ — были открыты в Китае в незазванном Ni-Cu месторождении (Yu Zuxiang, 1996) и России, в россыпях, связанных с Кондерским щелочно-ультраосновным массивом (Рудашевский и др., 1985). В хромититах горизонта UG2 Бушвельдского комплекса незазванный Cu-сульфид Pt, Rh и Ir был установлен еще в 1982 г. (Kinloch, 1982; McLaren, De Villiers, 1982). Позже этот минерал был определен как маланит (Penberthy et al., 2000; Voordouw et al., 2010). Нами тиошпинели элементов платиновой группы (ЭПГ) были определены в «тяжелых» концентратах хромититов всех горизонтов (маланит) и в хромититах нижней и средней групп хромититов (Oberthür et al., 2016) (купорродсит).

Бушвельдский комплекс включает самую большую из известных расслоенных интрузий и содержит крупнейшие мировые запасы ЭПГ (около 68 % Pt и 39 % Pd), а также значительные ресурсы Cr, V, Au, Ni и Cu (Vermaak, 1995; Sawthorn, 1999). Минерализация благородных металлов приурочена к нескольким горизонтам основных-ультраосновных пород и хромититов. Основные промышленные тела — риф Меренского (Ballhaus, Ryan, 1995; Sawthorn et al., 2002; Sawthorn, 2011), хромититы UG-2 (Sawthorn, 1999) и Платриф (Holwell, McDonald, 2010) — приурочены к критической зоне расслоенной интрузии и прослеживаются непрерывно на протяжении сотен километров (Von Gruenewaldt et al., 1986; Scoon, Teigler, 1994). Риф Меренского находится в самой верхней части критической зоны. Хромититы UG-2 локализованы в верхней части критической зоны на 15—400 м ниже рифа Меренского. В наибольшей степени эти горизонты сближены в западной части Бушвельдского комплекса, наиболее удалены друг от друга в восточной его части (Lee, 1996). Кроме главного хромититового горизонта UG2 с содержанием суммы ЭПГ + Au до 10 и более г/т, присутствуют другие группы слоев хромититов (LG — нижняя, MG — средняя, UG — верхняя) с более низкими содержаниями ЭПГ (0.5—4 г/т; Sawthorn, 1999; Oberthür et al., 2016).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучены (с использованием оригинальной 3D-минералогической технологии (Рудашевский и др., 2001; 2018; Rudashevsky et al., 2001; Рудашевский, Рудашевский, 2006; 2007; 2017; Cabri et al., 2006; 2008; Oberthür et al., 2008)) обогащенные МПГ образцы бушвельдских хромититов: 1) обр. BD-11/2 — хромитит из горизонта UG2, шахта Куселека, западный Бушвельд; 2) обр. S — флотационный концентрат, полученный из нижней группы хромититов, горизонт LG6, восточный Бушвельд, флотационная фабрика Думбош (Oberthür et al., 2016); 3) обр. T — флотационный концентрат, полученный из средней группы хромититов, горизонты MG1 и MG2, восточный Бушвельд, флотационная фабрика Твифонтейн (Oberthür et al., 2016). Характеристика химического состава изученных образцов приведена в табл. 1.

Хромититы на 70—95 % сложены хромитом. Промежутки между кристаллами хромита выполнены ортопироксеном и плагиоклазом. В составе хромититов содержание серы низкое (~100—200 г/т), количество сульфидов, как правило, <0.5 %. Сульфиды локализованы между зернами плагиоклаза. В хромититах присутствуют пентландит, пирит и халькопирит, изредка милле-

Таблица 1

Содержания благородных металлов (г/т) в изученных образцах
Contents of noble metals (ppm) in studied samples

Образец	Масса, г	Содержание элемента						
		Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au
S*	443.5	144	130	98.3	129	32.3	12.6	0.376
T*	626	78.9	53.2	18.0	48.2	10.4	5.04	0.261
UG2**		5.566	2.135	1.080	1.178	0.331	0.097	0.0087

Примечание. * По данным (Oberthür et al., 2016); ** обр. BD11/2 не анализировался, для другого образца хромититов горизонта UG2, западный Бушвельд (Junge et al., 2014).

рит. В пределах горизонта UG2 пентландит часто замещен виоларитом. Пирротин в хромититах обычно отсутствует. Сульфиды имеют размеры зерен от долей микрометра до 50 мкм (обычно 10—20 мкм). Минералы платиновой группы в хромититах всегда приурочены к обособлениям сульфидов Fe, Ni и Cu. МПГ изучены с помощью микрозондов в искусственных однослойных полированных шлифах «тяжелых» концентратов гидросепарации (гидросепаратор HS-11).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам микрозондовых исследований «тяжелых» концентратов гидросепарации изученных образцов хромититов, купрородсит и маланит избирательно сконцентрированы в нижней группе хромититов горизонта LG6 (обр. S). Содержания минералов — 35.6 и 24.9 % (от общей площади зерен МПГ в образце) соответственно. В средней группе хромититов MG1/MG 2 (обр. T) установлены купрородсит (1.4 %) и маланит (3.9 %), на горизонте UG2 (обр. BD-11/2) только маланит (1.1 %; табл. 2).¹

Изучена представительная выборка индивидов маланита (46 зерен, ECD² 4—42 мкм) и купрородсита (34 зерна, ECD 9—42 мкм) из трех образцов, представляющих полный разрез хромититов Бушвельдского комплекса (табл. 2). В «тяжелых» HS-концентратах оба минерала представлены различными типами зерен. Наиболее многочисленны зерна-сростки маланита, купрородсита и других МПГ с сульфидами Cu, Fe и Ni: с халькопиритом (рис. 1, *з, д, ж, з, н, о*), пиритом (рис. 1, *з, о*) и пентландитом (рис. 1, *е, л, н*). При этом, МПГ в матрице сульфидов могут присутствовать в качестве как краевых, так и центральных включений. Наиболее крупные зерна тиошпинелей ЭПГ — это свободные индивиды (рис. 1, *а, и*) и свободные зерна-сростки маланита и купрородсита с другими МПГ — брэггитом (рис. 1, *в*), высокоцитом (рис. 1, *к*), лауритом (рис. 1, *б*), Fe-Pt сплавом (рис. 1, *м*) и др. Присутствуют также относительно редкие зерна-сростки тиошпинелей с хромитом и с плагиоклазом (рис. 1, *п, р*).

Индивиды маланита и купрородсита имеют неправильную форму, нередко с прямолинейными очертаниями (рис. 1, *з, и—м*). Для включений маланита в халькопирите отмечается каплевидная форма (рис. 1, *д*). Судя по взаимоотношениям минералов в полированных шлифах, купрородсит, маланит, лаурит, высокоцит и брэггит относятся к числу наиболее ранних первичных минералов платиновой группы в хромититах.

В табл. 3 приведены данные о химическом составе маланита и купрородсита. Рис. 2 показывает положение фигуративных точек этих минералов (61 анализ) для каждого из изученных образцов на треугольных диаграммах. Как видно на рисунке, в изученных образцах хромититов преобладают составы тиошпинелей средней части ряда маланит-купрородсит (за исключением одного зерна купрородсита богатого Rh). Содержание Ir в маланите достигает 10.5 мас. %, Ru — 2.7 мас. %, в купрородситах — 6.8 мас. % и 2.6 мас. % соответственно.

¹ Рассматриваемые тиошпинели не обнаружены среди МПГ двух детально изученных образцов из рифа Меренского (из западной и восточной частей Бушвельдского комплекса).

² ECD — эквивалентный диаметр круга, площадь которого равна площади сечения зерна.

**Распределение маланита и купорродсита в «тяжелых» HS-конcentратах
изученных образцов хромититов**
**Distribution of malanite and cuprorhodsite in the heavy mineral HS concentrates
of the studied chromitite samples**

№ п/п	Минерал	n	S, мкм ²	S, %	n, %	ECD, мкм ²		
						минимальный	средний	максимальный
1	Купорродсит	32	18450	35.6	20.4	8.6	26	41.9
2	Маланит	32	12888	24.9	20.4	4.5	20.6	42.1
3	Маланит	6	2272	3.9	3.3	14.3	21.2	31
4	Купорродсит	2	804	1.4	1.1	19.9	22.5	25.1
5	Маланит	8	667	1.1	3.5	3.7	8.5	20.1

Примечание. S — площадь зерна минерала, n — число зерен. 1, 2 — обр. S, хромитит, горизонт LG6; 3, 4 — обр. T, хромитит, горизонты MG1/ MG 2; 5 — обр. BD11/2, хромитит, горизонт UG2.

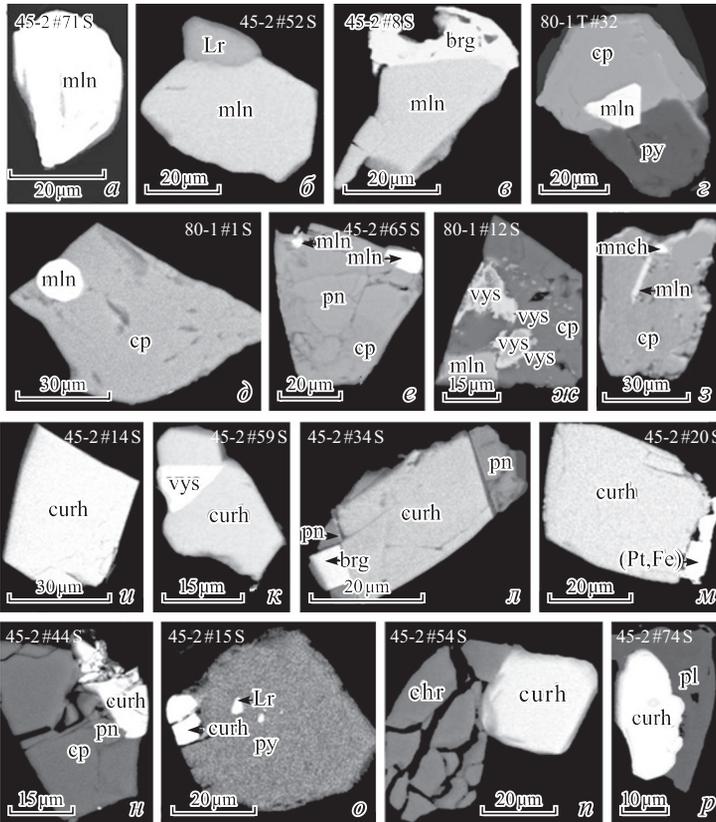


Рис. 1. Зерна минералов маланита и купорродсита из хромититов Бушвельдского комплекса. Полированные шлифы «тяжелых» HS-концентратов. Микрозонд CameScan 4DV, ПИД спектрометр Link AN 10000. Фото в отраженных электронах.

a—в, д—ж, и—р — обр. S (горизонт LG6), з — обр. T (горизонты MG1/MG2), з — горизонт UG2. mln — маланит $\text{Cu}(\text{Pt,Rh})_2\text{S}_4$, curh — $\text{Cu}(\text{Rh,Pt})_2\text{S}_4$, vys — высокоцит (Pd,Pt,Ni)S, brg — брэггит (Pt,Pd)S, Lr — лаурит $(\text{Ru,Os,Ir})\text{S}_2$, (Pt,Fe) — Fe-Pt сплав, cp — халькопирит, py — пирит, pn — пентландит, chr — хромит, pl — плагиоклаз.

Fig. 1. Grains of malanite and cuprorhodsite from chromitites of the Bushveld complex. Polished sections of heavy mineral HS concentrates.

Химические составы маланита и купорродсита из бушveldских хромититов
Chemical compositions of malanite and cuprorhodsite from Bushveld chromitites

№ п/п	Образец	Pt	Rh	Ir	Ru	Fe	Co	Ni	Cu	S	Сумма
Маланит (Cu,Fe²⁺)(Pt,Rh,Ir,Co,Fe³⁺,Ni)₂S₄											
1	Обр. Т, 45-1 #22	46.3	5.6	1.97	1.64	0.42	1.71	3.37	12.6	26.4	100.01
	mln (макс. Pt)	1.16	0.27	0.05	0.08	0.04	0.14	0.28	0.97	4.02	7
2	Обр. S, 45-2 #17	41.4	10.5	3.2		1.13	4.79	0.69	13.2	27.0	101.91
	Co-mln	0.99	0.48	0.08		0.09	0.38	0.06	0.97	3.95	7
3	Обр. S, 45-2 #34	40.0	9.51	3.06		2.06	0.84	5.54	11.5	27.6	100.11
	Ni-mln	0.96	0.43	0.07		0.17	0.07	0.44	0.84	4.02	7
4	Обр. S, 45-2 #62	39.2	19.7			0.64		0.43	13.4	26.6	99.97
	Rh-mln	0.97	0.92			0.05		0.04	1.02	4.00	7
5	Обр. Т, 45-1 #49	39.0	7.74	10.5		1.2	2.2	0.68	11.9	25.8	99.02
	Ir-mln	1.01	0.38	0.27		0.11	0.19	0.06	0.94	4.05	7
6	Обр. Т, 45-1 #30	31.7	9.45	2.97		5.55	3.19	3.36	13.6	30.1	99.92
	Fe-mln	0.70	0.39	0.07		0.43	0.23	0.25	0.92	4.02	7
7	Среднее, n = 31	39.14	13.98	2.24	0.20	1.24	1.69	1.37	12.82	26.97	99.65
		0.96	0.65	0.06	0.01	0.11	0.14	0.11	0.96	4.01	7
Купорродсит (Cu,Fe²⁺)(Rh,Pt,Ir,Fe³⁺)₂S₄											
8	Обр. S, 45-2 #11	7.62	45.0	2.69	1.83	1.79		0.28	12.3	30.1	101.61
	curh (макс. Rh)	0.16	1.82	0.06	0.08	0.13		0.02	0.81	3.92	7
9	Обр. S, 45-2 #15	31.8	22.7	2.9		2.35		0.45	11.8	28.1	100.10
	Fe-curh	0.76	1.02	0.07		0.20		0.04	0.86	4.06	7
10	Обр. S, 45-2 #4	35.9	22.0	2.71		0.59	0.36		12.4	26.0	99.96
	Co-curh	0.90	1.04	0.07		0.05	0.02		0.95	3.96	7
11	Обр. S, 45-2 #42	38.1	21.9						13.5	26.6	100.10
	Pt-curh	0.94	1.03						1.02	4.01	7
12	Обр. S, 80 #18	30.7	20.8	6.81		1.94		0.38	12.8	26.7	100.13
	Ni-Ir-curh	0.75	0.96	0.17		0.17		0.03	0.96	3.96	7
13	Среднее, n = 30	35.07	22.35	1.66	0.34	0.73	0.04	0.19	12.71	26.80	99.91
		0.86	1.04	0.04	0.02	0.06		0.02	0.96	4.00	7

Примечание. Анализы выполнены с помощью микрозонда Tescan, ППД-спектрометр Vega3, условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток образца 20 нА, диаметр зонда 1мкм, стандарты — чистые металлы и пирит на S. Для каждого анализа верхняя строка — содержание, мас. %, нижняя — кристаллохимический коэффициент.

Изученные тиошпинели содержат примеси в Co, Ni и Fe (табл. 3). Средние химические составы маланита и купорродсита в расчете на 7 атомов имеют следующий вид:

маланит $\text{Cu}_{0.96}(\text{Pt}_{0.96}\text{Rh}_{0.65}\text{Ir}_{0.06}\text{Ru}_{0.01})_{\Sigma 1.68}(\text{Co}_{0.14}\text{Ni}_{0.11}\text{Fe}_{0.11})_{\Sigma 0.36}\text{S}_{4.01}$,

купорродсит $\text{Cu}_{0.96}(\text{Rh}_{1.04}\text{Pt}_{0.86}\text{Ir}_{0.04}\text{Ru}_{0.02})_{\Sigma 1.96}(\text{Fe}_{0.06}\text{Ni}_{0.02})_{\Sigma 0.08}\text{S}_{4.00}$.

Можно констатировать, что обе формулы хорошо рассчитываются на 4 атома S, что характерно для тиошпинелей. В то же время коэффициенты для металлов существенно отклоняются от стехиометрических значений.

По результатам статистических расчетов имеет место отрицательная корреляция сумм содержаний PGE и Co+Ni+Fe ($r = -0.88$). Возможно, Co, Ni и

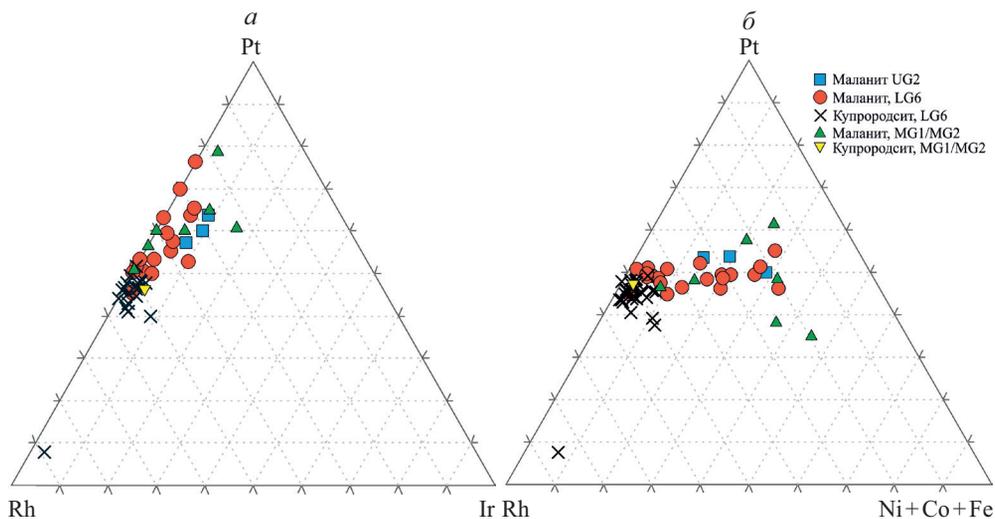


Рис. 2. Тройные диаграммы Rh—Pt—Ir (а) и Rh—Pt—(Ni + Co + Fe) (б) для составов маланита и купрородсита бушвельдских хромититов. Для построения диаграмм использованы атомные количества элементов. Обр. BD-11/2 (1, UG2), обр. S (2, LG6) и обр. Т (3, 2MG1/ MG 2).

Fig. 2. Triple diagrams Rh—Pt—Ir (a) and Rh—Pt—(Ni + Co + Fe) (b) for compositions of malanite and cuprorhodite from Bushveld chromitites. Sample BD-11/2 (1, UG2), Sample S (2, LG6) and Sample T (3, 2MG1/ MG 2).

Fe в изученных тиошпинелях замещают элементы платиновой группы. Такие замещения более характерны для маланита (табл. 3).

Небольшой дефицит Cu, судя по средним составам маланита и купрородсита (табл. 3), восполняется за счет Fe^{2+} ($r_{\text{Cu-Fe}} = -0.58$).

Богатые кобальтом зерна маланита бушвельдских хромититов по химическому составу близки к кобальтовой разновидности маланита $\text{Cu}(\text{Pt}^{3+}, \text{Co}^{3+})_2\text{S}_4$, обнаруженной в ранее неназванном Ni-Cu месторождении Китая (Yu Zuxiang, 1981; 1996).

Обобщенные формулы бушвельдских тиошпинелей: для маланита $(\text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{2+})(\text{Pt}^{3+}, \text{Rh}^{3+}, \text{Ir}^{3+}, \text{Co}^{3+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ni}^{3+})_2\text{S}_4$, для купрородсита $(\text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{2+})(\text{Rh}^{3+}, \text{Pt}^{3+}, \text{Ir}^{3+}, \text{Fe}^{3+})_2\text{S}_4$. Эти формулы не противоречат типовой формуле минералов группы тиошпинелей $\text{Me}^{2+}\text{Me}^{3+}_2\text{S}_4$. Известно более 40 минералов группы тиошпинелей с этой формулой, где Me^{2+} — Cu, Fe, Ni, Co, Zn и Pb, Me^{3+} — Pt, Ir, Rh, Fe, Ni, Co, Cr, In, Sb, Sn и Tl (www.mindat.org).

Хромититы расслоенных интрузий — классические концентраторы минералов платиновой группы, формировавшихся из обособленного сульфидного расплава (Naldrett, von Gruenewaldt, 1989; Naldrett et al., 2009; 2012; Junge et al., 2014; Osbahr et al., 2014; Oberthür et al., 2016; и др.). Распределение ЭПГ в бушвельдских хромититах трактуется как результат их рэлеевского фракционирования в ходе кристаллизации, что объясняет концентрирование Rh, Pd на нижних и средних горизонтах хромититов по отношению к хромититам UG2 и породам рифа Меренского, где все более накапливалась Pt.

Процесс рэлеевского фракционирования, видимо, ответствен и за перераспределение серы в обособлениях сульфидного расплава в хромититах. Первые порции сульфидной жидкости при кристаллизации, видимо, были наиболее сернистыми. Такой тренд изменения химического состава первичного сульфидного расплава объясняет распределение сульфидов в различных

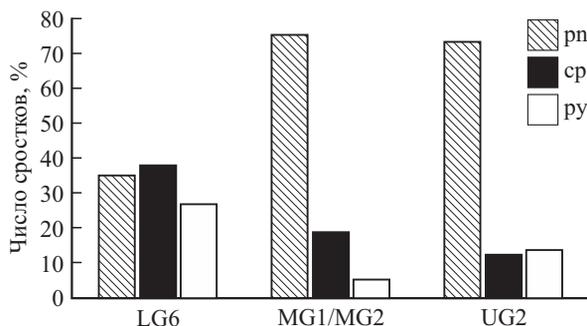


Рис. 3. Гистограммы числа сростков зерен минералов платиновой группы (отн. %) с пентландитом (pn), халькопиритом (cp) и пиритом (py) в различных группах горизонтов бушвелдских хромититов.

Fig. 3. Charts of number of intergrowths (%) between PGM and pentlandite (pn), chalcocopyrite (cp), and pyrite (py) in various groups of Bushveld chromitite horizons.

горизонтах хромититов: присутствие пирита вместо пирротина и увеличение содержания пирита в нижней группе хромититов (горизонт LG6, обр. S). Распределение сульфидов Fe, Ni и Cu в различных группах хромититовых горизонтов следующие. На горизонтах нижней (LG6) и средней (MG1/MG2) групп хромититов, по данным расчетов с использованием химических составов их флотационных концентратов (Oberthür et al., 2016)³ и присутствующих в них сульфидов, для обр. S: пирит (1.0 %) > халькопирит (0.5 %) > пентландит (0.4 %), для обр. T: пентландит (+миллерит) (0.5 %) > халькопирит (0.3 %) > пирит (0.2 %); для хромититов UG2 (обр. BD-11/2) — оценка по выборке, состоящей из 100 случайных зерен сульфидов в полированных шлифах «тяжелых» концентратов: пентландит (+виолярит) > пирит > халькопирит.

В свете этих данных находят объяснения anomalно высокие содержания «высокосернистых» Cu-тиошпинелей — маланита $\text{Cu}(\text{Pt}, \text{Rh})_2\text{S}_4$ и купрородсита $\text{Cu}(\text{Rh}, \text{Pt})_2\text{S}_4$ (S/Me = 4/3) — именно в нижней группе хромититов (горизонт LG6 с максимальными концентрациями S и Cu), а также наибольшие количества сростков МПГ (в первую очередь, купрородсита и маланита) с халькопиритом и пиритом в хромититах горизонта LG6 (рис. 3).

Таким образом, купрородсит и маланит являются характерными МПГ, продуктами фракционирования первичного сульфидного расплава в процессе формирования бушвелдских хромититовых горизонтов.

Авторы искренне признательны д-ру Т. Обертюру и д-ру И. В. Векслеру за предоставленные для исследований образцы бушвелдских хромититов.

Список литературы

Рудашевский Н. С., Меньшиков Ю. П., Мочалов А. Г., Трубкин Н. В., Шумская Н. И., Жданов В. В. Купрородсит CuRh_2S_4 и купроиродсит CuIr_2S_4 — новые природные тиошпинели платиновых элементов // ЗВМО. 1985. Ч. 114. № 2. С. 187—195.

Рудашевский Н. С., Лупал С. Д., Рудашевский В. Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 216530. Российская Федерация. М., 2001.

Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 2281808. Российская Федерация. М., 2006.

³ Количество сульфидов во флотоконцентратах более высокое, чем в первичных хромититах, но соотношения сульфидов практически не изменяются.

Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 69418., полезная модель. Российская Федерация. М., 2007.

Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н. 3D-Минералогическая технология исследования руд и технологических продуктов коренных месторождений благородных металлов / Мат. Юбилейного съезда Российского минералогич. общества «200 лет РМО». СПб.: 2017. Т. 2. С. 146—148.

Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н., Антонов А. В. Универсальная минералогическая технология исследования горных пород, руд и технологических продуктов // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 88—102.

References

Ballhaus C., Ryan C. G. Platinum-group elements in the Merensky Reef. I. PGE in solid solution in base metal sulfides and the down-temperature equilibration history of Merensky ores. *Contrib. Miner. Petrol.* **1995**. Vol. 122. No. 3. P. 241—251.

Cabri L. J., Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Lastra R. Hydroseparation: a new development in process mineralogy of platinum-bearing ores. *CIM Bull.* **2006**. Vol. 99. No. 1092. P. 1—7.

Cabri L. J., Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Oberthür T. Electric-pulse disaggregation (EPD), hydroseparation (HS) and their use in combination for mineral processing and advanced characterization of ores. In: *Canad. Miner. Processors 40th Annual Meeting*. Ottawa, **2008**. P. 211—235.

Cawthorn R. G. Platinum-group element mineralization in the Bushveld Complex — a critical reassessment of geochemical models. *S. Afr. J. Geol.* **1999**. Vol. 102. P. 268—281.

Cawthorn R. G. Geological investigations of the PGE distribution in the Bushveld Merensky and UG2 chromite reefs. *J. South Afr. Inst. Min. Metall.* **2011**. Vol. 111. P. 67—79.

Cawthorn R. G., Lee C. A., Schouwstra R. P., Mellowship P. Relationship between PGE and PGM in the Bushveld Complex. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. P. 311—328.

Holwell D. A., McDonald I. A review of the behavior of platinum group elements within natural magmatic sulfide ore systems. *Platin. Met. Rev.* **2010**. Vol. 54. P. 26—36.

Junge M., Oberthür T., Melcher F. Cryptic variation of chromite chemistry, platinum-group-element and mineral distribution in the UG-2 chromitite — an example from the Karee Mine, western Bushveld Complex, South Africa. *Econ. Geol.* **2014**. Vol. 109. P. 795—810.

Kinloch E. D. Regional trends in the platinum-group mineralogy of the critical zone of the Bushveld Complex, South Africa. *Econ. Geol.* **1982**. Vol. 77. P. 1328—1347.

Lee C. A. A review of mineralization in the Bushveld complex and some other layered intrusions. In: *Layered intrusions*. Ed. by R. G. Cawthorn. Amsterdam: Elsevier, **1996**. P. 103—145.

McLaren C. H., De Villiers J. P. R. The platinum-group chemistry and mineralogy of the UG-2 chromitite layer of the Bushveld Complex. *Econ. Geol.* **1982**. Vol. 77. P. 348—361.

Naldrett A., von Gruenewaldt G. Association of platinum-group elements with chromitite in layered intrusions and ophiolite complexes. *Econ. Geol.* **1989**. Vol. 84. P. 180—187.

Naldrett A., Kinnaird J., Wilson A., Yudovskaya M., McQuade S., Chunnnett G., Stanley C. Chromite composition and PGE content of Bushveld chromitites: part 1 — the lower and middle groups. *Appl. Earth Sci.* **2009**. Vol. 118. P. 131—161.

Naldrett A., Wilson A., Kinnaird J., Yudovskaya M., Chunnnett G. The origin of chromites and related PGE mineralization in the Bushveld Complex: new mineralogical and petrological constraints. *Miner. Deposita*. **2012**. Vol. 47. P. 209—232.

Oberthür T., Melcher F., Sitnikova M., Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Cabri L. J., Lodziak J., Klosa D., Gast L. Combination of novel mineralogical methods in the study of noble metal ores — focus on pristine (Bushveld, Great Dyke) and placer platinum mineralization. In: *Proc. 9th Int. Congress Applied Miner.* Brisbane: QLD. **2008**. P. 187—194.

Oberthür T., Junge M., Rudashevsky N., de Meyer E., Gutter P. Platinum-group minerals in the LG and MG chromitites of the Bushveld Complex, South Africa. *Miner. Deposita*. **2016**. Vol. 51. P. 71—87.

Osbah I., Oberthür T., Klemd R., Josties A. Platinum-group element distribution in base-metal sulfides of the UG2, Bushveld Complex, South Africa — a reconnaissance study. *Miner. Deposita*. **2014**. Vol. 49. P. 655—665.

Penberthy C. J., Oosthuyzen E. J., Merkle R. K. W. The recovery of platinum-group elements from the UG-2 chromitite — a mineralogical perspective. *Miner. Petrol.* **2000**. Vol. 68. P. 213—222.

Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N. Hydraulic classifier. RU Patent. N 2281808. Moscow, **2006** (in Russian).

Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N. Hydraulic classifier. RU Patent. N 69418. Moscow, **2007** (in Russian).

Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N. 3D mineralogical technology for investigation of ores and process products from precious metal primary deposits. In: *Proc. 200th Anniversary Meeting Russian Miner. Soc.* Saint Petersburg. **2017**. Vol. 2. P. 146—148 (in Russian).

Rudashevsky N. S., Men'shikov Yu. P., Mochalov A. G., Trubkin N. V., Shumskaya N. I., Zhdanov V. V. Cuprorhodsites CuRh_2S_4 and cuproiridsites CuIr_2S_4 — new natural thiospinels of platinum-group elements. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1985**. Vol. 114. P. 187—195 (in Russian).

Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Lupal S. D. Method for separating granular materials and device for carrying out said method. Patent Cooperation Treaty PCT/RU01/00123, Moscow, 20 April **2001**.

Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Antonov A. V. Universal mineralogical technology of research for rocks, ores, and process products. *Regional Geol. Metall.* **2018**. No. 73. P. 88—102 (in Russian).

Scoon R. N., Teigler B. Platinum-group element mineralization in the critical zone of the Western Bushveld Complex: I. Sulfide poor-chromitites below the UG-2. *Econ. Geol.* **1994**. Vol. 89. P. 1094—1112.

Vermaak C. The platinum-group metals — a global perspective. *MINTEK*, **1995**. 247 p.

Von Gruenewaldt G., Hatton C. J., Merkle R. K. W., Gain S. B. Platinum-group element-chromite associations in the Bushveld Complex. *Econ. Geol.* **1986**. Vol. 81. P. 1067—1079.

Voordouw R., Gutzmer J., Beukes N. J. Zoning of platinum group mineral assemblages in the UG2 chromitite determined through in situ SEM-EDS-based image analysis. *Miner. Deposita*. **2010**. Vol. 45. P. 147—159.

Yu Zuxiang. A restudy of malanite and cobalt-malanite (dayingite). *Geol. Review*. **1981**. Vol. 27. P. 55—71 (in Chinese).

Yu Zuxiang. Malanite — a new cupric platinum (Pt^{3+}) and iridium (Ir^{3+}) sulfide. *Acta Geologica Sinica*. **1996**. Vol. 70. No. 4. P. 309—314 (in Chinese).

Поступила в редакцию
19 февраля 2019 г.