## АКЦЕССОРНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ХРОМИТИТАХ МАНТИЙНОГО РАЗРЕЗА ОФИОЛИТОВ КРАКА

#### © Д.Е. Савельев.

доктор геологоминералогических наук, профессор АН РБ, ведущий научный сотрудник, Институт геологии, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, ул. К. Маркса, 16/2, 450077, г. Уфа, Российская Федерация, эл. почта: savl71@mail.ru

#### © С.Н. Сергеев.

младший научный сотрудник, Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Российская Федерация, эл. почта: nikocem17@gmail.com

#### © И.А. Блинов.

кандидат геологоминералогических наук, научный сотрудник, Институт минералогии, Уральское отделение РАН, Ильменский заповедник, 1, 456301, Миасс, Челябинская область. Российская Федерация. эл. почта: ivan\_a\_blinov@mail.ru

Приведены результаты изучения акцессорной минерализации в пяти хромитопроявлениях мантийного разреза массивов Крака - крупнейшего в Республике Башкортостан офиолитового комплекса. Изученные месторождения и рудопроявления хромититов приурочены к ультрамафитам мантийного разреза. Рудопроявление Верхне-Сарангинское расположено в центральной части массива Северного Крака и относится к типу подиформных залежей с маломощной дунитовой оторочкой. Остальные исследованные объекты расположены в западной части массива Южный Крака. Месторождение Лактыбаш представляет собой вкрапленный тип оруденения; месторождения Малый Башарт и им. Менжинского относятся к переходному типу от таблитчатых тел вкрапленного строения к подиформным. Абласовское месторождение представлено линзовидным телом преимущественно массивных хромититов в полностью серпентинизирпованных и интенсивно тектонизированных ультрамафитах.

В работе показано, что главными акцессорными минералами большинства изученных месторождений и рудопроявлений являются: интерметаллид никеля и железа – аваруит, сульфиды никеля и железа (пентландит, хизлевудит, миллерит) и продукты их замещения. Более редкими акцессорными минералами хромититов и вмещающих ультрамафитов являются сульфиды меди, самородная медь, арсенид никеля (орселит), а также собственные минералы элементов платиновой группы, из которых установлены лаурит (Ru,Os)S<sub>2</sub>, твёрдые растворы с никелем и железом (Ru-Ni-Fe-Os-Ir-Pd-Rh и Fe-Co-Pt-Pd-Au составов), арсениды и сульфосоли сложного состава (Ni-Fe-Cu-Ir-Pt-Au-Pd). Высказано предположение, что первичные неизмененные сульфиды никеля являются одними из основных концентраторов платиновых металлов в мантийных хромититах и вмещающих ультрамафитах массивов Крака. Обоснована необходимость дальнейшего изучения акцессорной минерализации массивов, получение и исследование сульфидных концентратов из вкрапленных руд для оценки их платиноносности.

Ключевые слова: ультрамафиты, офиолиты, хромититы, платиноиды, сульфиды никеля, пентландит, хизлевудит, Крака

© D.E. Saveliev<sup>1</sup>, S.N. Sergeev<sup>2</sup>, I.A. Blinov<sup>3</sup>

# ACCESSORY MINERALIZATION IN CHROMITITES OF THE MANTLE SECTION OF THE KRAKA OPHIOLITES

<sup>1</sup> Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, 16/2, ulitsa Karla Marksa, 450077, Ufa, Russian Federation, e-mail:savl71@mail.ru

 Institute for Metals Superplasticity Problems
Russian Academy of Sciences,
Julitsa Stepana Khalturina,
Ufa, Russian Federation,
e-mail: nikocem17@gmail.com

<sup>3</sup> Institute of Mineralogy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 1, Ilmeny Reserve, 456301, Miass, Russian Federation, e-mail: ivan a blinov@mail.ru This article presents some research results on the accessory mineralization in five chromite-bearing ore occurrences and deposits of the mantle section of the Kraka massifs, the largest ophiolite complex in the Republic of Bashkortostan. The chromitite deposits and ore occurrences under investigation are confined to ultramafites of the mantle section. The Upper Saranga ore occurrence is located in the central part of the North Kraka mountain range and refers to pod-shaped deposits with a thin dunite rim. The rest of the objects studied are located in the western part of the South Kraka. The Lactybash deposit has disseminated mineralization; the Malyy Bashart and Menzhnsky deposits are classified as transitional from tabular bodies of the disseminated structure to pod-shaped ones. The Ablasovo deposit is represented by a lenticular body of primarily massive chromitites in completely serpentinized and intensely tectonized ultramafites.

As is shown, the main accessory minerals in the majority of the deposits and ore occurrences in question include Ni-Fe intermetallic (avaruite), Fe-Ni sulphides (pentlandite, heazlewoodite, millerite) and their substitution products. Less common accessory minerals of chromitites and host peridotites are Cu sulphides, native Cu, Ni arsenide (orcelite) and also platinum-group minerals (PGM), among them laurite (Ru,Os)S<sub>2</sub>, solid solutions with Ni and Fe (Ru-Ni-Fe-Os-Ir-Pd-Rh and Fe-Co-Pt-Pd-Au compositions), arsenides and sulphosalts of the complex composition (Ni-Fe-Cu-Ir-Pt-Au-Pd). It is suggested that primary unaltered Ni sulphides are one of the major PGE concentrators in mantle chromitites and ultramafic rocks of the Kraka massifs. The need is substantiated for further studies on the accessory mineralization of the massifs and sulphide concentrates from disseminated ores to evaluate their PGE potential.

Key words: ultramafic rocks, ophiolites, chromitites, platinides, nickel sulphides, pentlandite, heazlewoodite, Kraka

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Массивы Крака представляют собой крупнейший офиолитовый комплекс на территории Республики Башкортостан. Ультраосновные породы обнажаются на площади около 900 км<sup>2</sup> и вмещают многочисленные месторождения и рудопроявления хромовых руд. Одной из актуальных задач является оценка практической значимости платинометальной минерализации, связанной с офио-

литовыми ультрамафитами [1]. В настоящей работе приведены новые данные по изучению акцессорной минерализации в хромититах массивов.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующих электронных микроскопах Vega 3 SBH Tescan и Vega 3 Tescan с энерго-дисперсионным анализатором x-Act Oxford Instruments в ИПСМ

РАН (Уфа) и в Институте Минералогии УрО РАН (Миасс). Анализы проведены при диаметре пучка 3 мкм, токе 20 нА, ускоряющем напряжении 20 кВ, времени набора спектра 120 с. Формулы минералов рассчитывались анионным методом: миллерита - на один атом S, хизлевудита – на два атома S, полидимита – на 4 атома S, пентландита – на 8 атомов S, орселита – на 2 атома As, интерметаллидов – на 1 формульную единицу суммы металлов. Формулы неидентифицированных сульфидов рассчитаны на 1 атом серы.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ХРОМИТИТОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Изученные месторождения и рудопроявления хромититов приурочены к ультрамафитам так называемого «мантийного разреза» офиолитового комплекса. Рудопроявление Верхне-Сарангинское расположено в центральной части массива Северный Крака, а все остальные исследованные объекты (Малый Башарт, им.Менжинского, Лактыбаш и Абласовское) - в западной части массива Южный Крака.

Верхне-Сарангинское рудопроявление представляет собой небольшое по размерам столбообразное тело густовкрапленных хромититов, залегающее почти вертикально среди шпинелевых перидотитов, по структурноморфологической классификации [2; 3] оно может быть отнесено к типично подиформным залежам.

Абласовское месторождение представлено линзовидным телом преимущественно массивных хромититов в полностью серпентинизированных и интенсивно тектонизированных ультрамафитах. Рудовмещающие породы представлены хризотиловыми серпентинитами, не сохранившими реликтов первичных пород.

Месторождение Лактыбаш относится к типу таблитчатых по форме (табулярных) залежей вкрапленных хромититов. Вмещающими породами являются в значительной степени серпентинизированные дуниты. В строении месторождения выделяется несколько рудных зон, наиболее мощными и выдержанными являются северная и южная, разделенные полосой безрудных дунитов мошностью до 20 м.

Месторождение им. Менжинского и Малый Башарт могут быть отнесены к переходному типу залежей (от подиформных к табулярным). Месторождение им. Менжинского представлено несколькими протяженными (около 1000 м длины) и тонкими (0,3–1,5 м) хромититовыми телами. Они вмещаются уплощенной дунитовой линзой мощностью 30-60 м. Хромовая руда является преимущественно густовкрапленной, редко неравномерно вкрапленной или массивной.

Месторождение Малый Башарт имеет сходные черты строения с описанным выше объектом, одной из характерных его особенностей является наличие расширений и сужений хромитоносной зоны. В местах расширения располагаются линзовидные и подиформные залежи массивных и густовкрапленных хромититов, соединенные тонкими проводниками средневкрапленных руд на участках сужения. Оруденение представлено серией параллельных прерывистых жил вкрапленных хромититов, образующих рудную зону, залегающую согласно контактам тела вмещающих дунитов и пироксеновой полосчатости в окружающих гарцбургитах.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Верхне-Сарангинское рудопроявление. В хромититах данного рудопроявления фиксируются обильные выделения сульфидов размером до 50 мкм (рис. 1). Они локализованы внутри зёрен хромшпинелидов и пироксенов (рис. 1 а, д), в интерстициях рудных зерен и пироксенов (рис. 1 г), а также приурочены к спайности в пироксенах (рис.1 а) и заполняют трещины как в силикатах, так и в хромшпинелидах (рис. 1 б, в).

Преимущественным распространением пользуются пентландит и хизлевудит (табл. 1), иногда они образуют сростки (рис. 2 г, д).

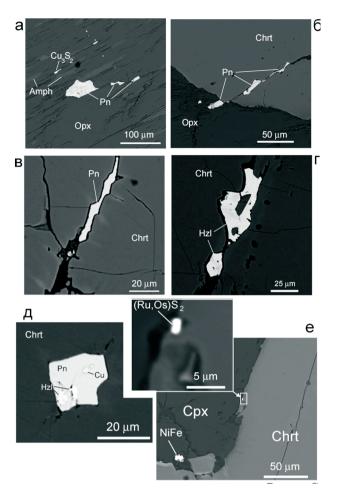


Рис. 1. Акцессорные минералы в хромититах рудопроявления Верхне-Сарангинское Примечание – Снимки в обратно-рассеянных электронах. Chrt – хромит, Pn – пентландит, Hzl – хизлевудит, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Amph – амфибол

Морфология зерен изменяется от удлиненноксеноморфной (рис. 2 а–в) до гипидиоморфной (рис. 1 а) и идиоморфной (рис. 1 д). В некоторых случаях выделения сульфидов характеризуются каркасной морфологией, они частично или полностью окаймляют фрагменты силикатного матрикса, обычно серпентин (рис. 1 г). В отдельных случаях внутри сростков пентландита и хизлевудита встречаются выделения самородной меди (рис. 1 д).

Наряду с пентландитом и хизлевудитом, в хромититах Верхне-Сарангинского рудопроявления обнаружены редкие выделения аваруита и сульфида меди, состав которого на-

иболее близок к формуле  $Cu_3S_2$ . Упоминания о находках сульфида с подобным составом в массивах Полярного Урала встречаются в работах А.Б. Макеева [4; 5], хотя в базе данных МІNDAT он отсутствует. Кроме описанных выше акцессорных минералов, на границе зерен клинопироксена и хромшпинелида найдено единственное выделение минерала платиновой группы, который представлен субмикронным сростком лаурита и пирротина (?) (рис. 1 е).

Абласовское месторождение. Хромититы данного месторождения сложены среднехромистыми шпинелидами, в ассоциации с которыми встречены обильные выделения ильменита. Акцессорная минерализация представлена преимущественно выделениями аваруита, который обычно образует «пылевидную вкрапленность» в серпентине, форма выделений варьирует от точечных до пластинчатых, преобладающий размер его частиц составляет первые микроны (до 10 мкм).

В некоторых случаях скопления аваруита пространственно связаны с участками замещения кристаллов хромшпинелидов хром-магнетитом, иногда отдельные выделения аваруита встречаются в «серпентиновых ловушках» внутри хромшпинелидов либо непосредственно в виде включений в зернах хромшпинелида. Помимо аваруита, в хромититах Абласовского месторождения встречены единичные мелкие зёрна халькопирита.

*Месторождение Лактыбаш*. В густов-крапленных хромититах (рис. 2 а) довольно часто встречаются акцессорные сульфиды никеля, среди которых доминирует хизлевудит. Его выделения чаще всего приурочены к поперечным и диагональным трещинам в зернах хромшпинелида, характерных для структур типа «пулл-апарт». В большинстве случаев минерал характеризуется ксеноморфным габитусом, полностью или частично окаймляет участки силикатного матрикса, который в настоящее время представлен серпентином (рис.  $2 \, 6 - д$ ).

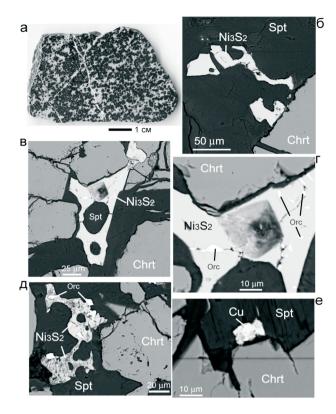


Рис.2. Акцессорные минералы в хромититах месторождения Лактыбаш

Примечание - Снимки в обратно-рассеянных электронах. Spt - серпентин, Chrt - хромит; Orc - орселит

В некоторых случаях включения имеют идиоморфные очертания, что позволяет предполагать первично оливиновый их состав. Размер зерен хизлевудита варьирует от первых до 100 мкм, состав достаточно однообразен и почти соответствует теоретической формуле минерала (табл. 1). Кроме никеля и серы в минерале очень редко встречаются примеси железа (до 1,1 мас. %) и хрома (до 2,09 мас. %). Высока вероятность того, что появление хрома обусловлено захватом материала матрикса. По соотношению металлов и серы, чаще отмечается незначительный дефицит последней.

В некоторых зернах хизлевудита наблюдается выделение арсенидов никеля (рис. 2 в - д).

ТАБЛИЦА1 – Средние химические составы акцессорных минералов из хромититов массивов Крака

№ п/п	n	S	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	As	Ru	Rh	Pd	Sb	Os	Ir	Сумма
1	6	34,45	0,72*	0,74	_	64,10	_	_	_	_	_	_	_	_	100,00
2	22	28,64	0,84*	1,18	_	69,26	_	_	_	_	_	_	_	_	99,92
3	30	35,37	0,64*	27,45	0,02	36,45	0,05	_	_	_	_	_	_	_	99,99
4	5	26,35	3,41*	6,33	_	2,97	60,93	_	_	_	_	_	_	_	99,99
5	16	25,41	_	1,25	_	_	73,34	_	_	_	_	_	_	_	100,00
6	1	30,64	_	1,45	-	36,31	31,59	_	_	_	_	_	_	_	99,99
7	6	33,74	1,45*	21,37	_	27,32	16,11	_	_	_	_	_	_	_	99,99
8	4	_	2,07*	0,78	1	2,87	93,52	_	_	_	_	_	_	_	99,24
9	60	27,95	_	0,35	0,01	71,05	_	0,08	_	_	_	_	_	_	99,44
10	9	_	_	0,41	-	60,73	_	37,73	_	ı	1	0,57	_	-	99,45
11	1	9,06	_	0,24	-	63,29	_	26,49	_	ı	1	0,38	_	1	99,46
12	8	0,03	1,34*	24,29	0,34	73,98	_	_	_	ı	1	_	_	1	99,97
13	1	_	3,13*	37,12	-	59,75	_	_	_	ı	1	_	_	1	100,00
14	1	30,60	_	32,21	3,74	31,55	_	_	_	ı	1	_	_	1	98,10
15	4	33,75	_	21,61	0,58	1,28	39,85	_	_	ı	1	_	_	1	97,06
16	6	_	0,05*	20,56	1,14	77,84	0,30	_	_	ı	1	_	_	1	99,88
17	2	1,90	_	1,93	-	1,73	93,89	_	_	ı	1	_	_	1	99,43
18	1	_	2,40*	6,58	-	26,19	_	_	42,69	0,68	0,38	_	13,51	7,59	100,02
19	10	26,71	_	2,70	0,32	69,74	0,30	_	_	_	_	_	_	_	99,77
20	6	33,10	_	28,34	2,86	35,81	_	_	_	_	_	_	_	_	100,10
21	1	_	_	1,87	_	59,83	_	38,30	_	_	_	_	_	_	100,00
22	4	_	_	27,04	1,16	71,15	0,28	_	_	_	_	_	_	_	99,63
23	2	_	_	6,65	0,42	88,12	4,81	_	_	_	_	_	_	_	100,00
24	2	_	_	2,25	0,02	3,03	94,71	_	_	_	_	_	_	_	100,00
25	8	33,01	_	31,63	3,48	30,89	0,83	_	_	_	_	_	_	_	99,84
26	6	26,48	_	2,79	_	70,75	0,04	_	_	_	_	_	_	_	100,05

ТАБЛИЦА1-	(окончание)
1 / D / N L / N   - 1	OKOHTAHING /

№ п/п	Минерал	Кристаллохимическая формула	Распространенность
1	миллерит	$(Ni_{1.009}Fe_{0.012})_{\Sigma 1.021}S_{1.00}$	++
2	хизлевудит	$(Ni_{2.624}Fe_{0.047}Cr_{0.037})_{\Sigma 2.708}S_{2.00}$	+++
3	пентландит	$(Ni_{4.472}Fe_{3.549}Cr_{0.091}Cu_{0.005})_{\Sigma 8.12}S_{8.00}$	+++
4	Cu-Fe-Ni-сульфид (?)	$(Cu_{1.138}Fe_{0.137}Ni_{0.061}Cr_{0.08})_{\Sigma 1.416}S_{1.00}$	++
5	Си-сульфид (?)	$(Cu_{1.421}Fe_{0.028})_{\Sigma 1.449}S_{1.00}$	+++
6	Ni-Cu-сульфид (?)	$(Ni_{0.643}Cu_{0.508}Fe_{0.027})_{\Sigma 1.177}S_{1.00}$	+
7	Си-пентландит (?)	$(Ni_{0.439}Fe_{0.362}Cu_{0.235}Cr_{0.026})_{\Sigma 1.063}S_{1.00}$	+
8	самородная медь	$Cu_{0.934}Ni_{0.032}Cr_{0.026}Fe_{0.009}$	++
9	хизлевудит	$(Ni_{2.773}Fe_{0.014})_{\Sigma 2.787}(S_{1.998}As_{0.002})_{\Sigma 2.00}$	+++
10	орселит(?)	$(Ni_{4.070}Fe_{0.029})_{\Sigma 4.099}(As_{1.982}Sb_{0.018})_{\Sigma 2.00}$	++
11	S-орселит(?)	$(Ni_{3.373}Fe_{0.013})_{\Sigma 3.386}(As_{1.106}S_{0.884})_{\Sigma 2.00}$	+
12	аваруит	$Ni_{0.730}Fe_{0.252}Cr_{0.015}Co_{0.003}$	+++
13	аваруит(?)	$Ni_{0.583}Fe_{0.382}Cr_{0.035}$	+
14	пентландит	$(Fe_{4.812}Ni_{4.474}Co_{0.530})_{\Sigma 9.816}S_{8.00}$	+
15	халькопирит	$(Cu_{1.164}Fe_{0.731}Ni_{0.041}Co_{0.019})_{\Sigma 1.955}S_{2.00}$	++
16	аваруит	$Ni_{0.771}Fe_{0.215}Co_{0.011}Cu_{0.003}Cr_{0.001}$	++
17	самородная медь	$Cu_{0.922}S_{0.038}Fe_{0.022}Ni_{0.019}$	+
18	интерметаллид ЭПГ	$   (Ni_{_{0.386}}Fe_{_{0.102}}Cr_{_{0.040}})_{_{\Sigma 0.528}}(Ru_{_{0.367}}Os_{_{0.062}}Ir_{_{0.034}}Rh_{_{0.006}}Pd_{_{0.003}})_{_{\Sigma 0.472}}  $	+
19	хизлевудит	$(Ni_{2.832}Fe_{0.116}Co_{0.013}Cu_{0.011})_{\Sigma 2.971}S_{2.00}$	+++
20	пентландит	$(Ni_{4.694}Fe_{3.914}Co_{0.374})_{\Sigma 8.982}S_{8.00}$	++
21	орселит	$(Ni_{3.972}Fe_{0.131})_{\Sigma 4.102}As_{2.00}$	+
22	аваруит	$Ni_{0.704}Fe_{0.282}Co_{0.011}Cu_{0.003}$	++
23	аваруит(?)	$Ni_{0.882}Cu_{0.044}Fe_{0.070}Co_{0.004}$	+
24	самородная медь	$Cu_{0.941}Ni_{0.033}Fe_{0.026}$	+
25	пентландит	$(Fe_{4.379}Ni_{4.060}Co_{0.457}Cu_{0.099})_{\Sigma 8.996}S_{8.00}$	++
26	хизлевудит	$(Ni_{2.898}Fe_{0.120}Cu_{0.001})_{\Sigma 3.02}S_{2.00}$	++

Примечание: 1 – 7 – Верхне-Сарангинское; 8 – 11 – Лактыбаш; 12 – 15 – Абласовское; 16 – 21 – Малый Башарт; 22 – 26 – им. Менжинского; прочерк означает, что содержание данного элемента не превышает предел обнаружения; п - количество анализов, \* возможно, подсветка матрицы хромшпинелидов; распространенность: +++ - типичный, ++ - редкий, + - единичные находки

Чаще всего они встречаются в виде точечных и шестоватых образований размером в первые микроны (длиной до 10 микрон). По составу арсениды близки к маухериту либо орселиту, типичные примеси – сурьма, железо, хром (табл.1). На нескольких участках встречены тонкие включения самородной меди размером первые микроны (рис.2 е). Основной примесью является никель (до 3,74 мас.%), также отмечается железо (до 0,99%). Присутствующий в анализах хром (до 2,46 мас.%) вероятнее всего захвачен из хромитовой матрицы.

Месторождение Малый Башарт. Хизлевудит и пентландит являются главными акцессорными минералами, встречающимися в хромититах и вмещающих шпинелевых перидотитах данного месторождения (рис.3), иногда они образуют сростки (рис. 3 б), часто отмечается замещение пентландита оксидами железа (рис.3 д), видимо, в этом же процессе происходит образование выделений хизлевудита (рис. 3 б-г).

В отдельных случаях отмечались также сростки пентландита с арсенидом никеля, близким к орселиту (рис.3 а). Размер зерен

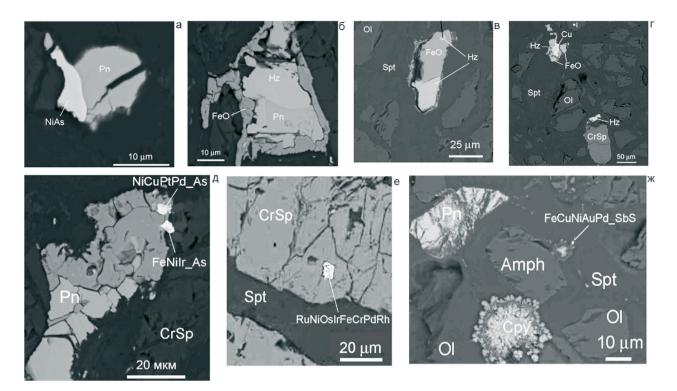


Рис.3. Акцессорные минералы в хромититах и вмещающих ультрамафитах месторождения Малый Башарт

Примечание – Снимки в обратно-рассеянных электронах. OI – оливин, Amph – амфибол, Spt – серпентин, CrSp – хромшпинелид, Pn – пентландит, Hz – хизлевудит, Cpy – халькопирит

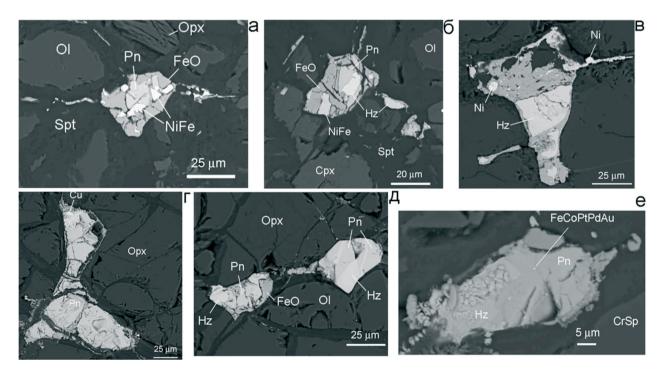


Рис. 4. Акцессорные минералы в хромититах и вмещающих ультрамафитах месторождения им. Менжинского

Примечание – Снимки в обратно-рассеянных электронах. OI – оливин, Opx – ортопироксен, Cpx – клинопироксен, Spt – серпентин, CrSp – хромшпинелид, Pn – пентландит, Hz – хизлевудит

пентландита достигает 100 мкм, в одном из них, локализованном внутри хромитита, встречены выделения минералов платиновой группы, которые представлены арсенидами сложного состава (рис. 3 д). На снимке видно, что оба выделения приурочены к краевой части крупного частично замещенного зерна пентландита, к области, сложенной в настоящее время оксидами железа.

В хромититах также встречены единичные включения интерметаллидов сложного состава, содержащих ЭПГ (рис. 3 е). Размер выделений составляет 1-10 мкм, в их составе основная роль принадлежит Ni, Fe и тугоплавким платиноидам (Ru, Os, Ir), в виде примеси встречаются также Pd, Rh, Cr. Мельчайшие выделения сульфосолей благородных металлов встречены также в амфиболсодержащих перидотитах, их включения приурочены к оксидным ореолам вокруг зерен сульфидов, преимущественно халькопирита и пентландита (рис. 3 ж). В их составе определены Pd, Au, Cu, Ni, Fe. Количественный анализ данных минералов провести не удалось из-за очень малого размера частиц.

Месторождение им. Менжинского. На данном месторождении наибольшее количество зерен акцессорных минералов было выявлено не в хромититах, а в образцах вмещающих пород – массивных перидотитов. Также как в описанных выше объектах, наибольшим распространением здесь пользуются выделения сульфидов никеля – пентландита и хизлевудита (рис.4), при замещении которых происходит образование оксидов железа и аваруита (рис.4 а–д), а также самородного никеля и меди (рис. 4 в, г).

Обычно выделения сульфидов приурочены к участкам апооливинового серпентина, но иногда встречаются на контакте свежих зерен оливина и ортопироксена (рис. 4 г, д). Для них характерно формирование «лапчатых» кристаллов (рис.4 а–в), реже – выделений с округлыми очертаниями (рис. 4 г), иногда округлые зерна соединяются узкими проводниками (рис. 4 д). В отдельных срос-

тках пентландита и хизлевудита были обнаружены мельчайшие субмикронные выделения фаз сложного состава на основе железа, включающих благородные металлы – Pt, Pd, Au (рис. 4 e).

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Опыт изучения как офиолитов, так и расслоенных интрузий показывает, что акцессорные сульфиды никеля и меди могут являться одними из главных концентраторов элементов платиновой группы в ультрамафитах и хромовых рудах. В частности, в уникальном расслоенном комплексе Бушвельд платиноносность рифа UG-2 определяется наличием мелких выделений Ni-Cu-сульфидов (base metal sulfides, BMS) в цементе вкрапленных хромшпинелидов [6 и др.]. Аналогичные особенности локализации платиноидов предполагаются для хромититов Полярного Урала [5].

Перспективы офиолитовых ультрамафитовых массивов на благороднометальное оруденение связаны с двумя типами хромититовой минерализации: 1) приуроченной к дунитам мантийной части разреза и 2) приуроченной к верлит-пироксенитовой ассоциации переходного мантийно-корового комплекса. По масштабам залежей хромовых руд первый тип является преобладающим, с ним связаны все промышленно-значимые месторождения хрома в массивах офиолитовой ассоциации (так называемые подиформные месторождения), второй тип имеет подчиненное значение. Многочисленными предшествующими исследованиями установлено, что состав платинометальной минерализации варьирует в разрезе офиолитовых комплексов. Для месторождений первого типа характерно преобладание в рудах платиноидов тугоплавкой триады (Os-Ir-Ru), тогда как во втором основная роль принадлежит платине, а остальные ЭПГ имеют подчиненное значение [7, 8 и др.].

Проведенное ранее изучение содержаний ЭПГ в хромититах массивов Крака показало, что в месторождениях и рудопроявлениях мантийного разреза примерно в равных количествах присутствуют платина и тугоплавкие платиноиды [9]. Это позволило выделить субхондритовый кракинский тип распределения платиноидов, отличающийся от более дифференцированного тугоплавкого типа массивов с существенно гарцбургитовым типом разреза [10; 11]. Вместе с тем, в хромититах переходного мантийно-корового комплекса резко преобладает платина, в меньших количествах присутствует палладий при минимальных концентрациях остальных платиноидов [9; 12], здесь выявлен ряд рудопроявлений хромититов с обильной платинометальной минерализацией [12; 13].

Как показано в работе [9], суммарное содержание ЭПГ в хромититах мантийного разреза массивов Крака в среднем составляет 200 мг/т. Приведенные выше данные о распределении акцессорной минерализации показывают, что сульфиды никеля, меди и железа часто могут концентрировать в себе металлы платиноидов в виде примесей. По данным работы [5], типичное содержание суммы ЭПГ в сульфидах Полярно-Уральских

массивов составляет порядка 0,1 мас. %. В этом случае, в неизмененных сульфидах с равномерным распределением платиноидов, энерго-дисперсионный анализ в растровом электронном микроскопе не позволит выявить их значимые содержания. Лишь в случае замещения первичных сульфидов вторичной минеральной ассоциацией примесные элементы могут выделиться в виде самостоятельных минеральных фаз, как это иллюстрируют снимки на рис. 3 д, ж, 4 е.

Таким образом, присутствие в измененных сульфидных выделениях мелких включений платиноидов позволяет предполагать, что первичные неизмененные сульфиды, главным образом — пентландит, являются одними из основных концентраторов ЭПГ в мантийных хромититах и вмещающих ультрамафитах массивов Крака. Представляется важным дальнейшее изучение акцессорной минерализации массивов, а также получение и исследование сульфидных концентратов из вкрапленных руд для оценки их платиноносности.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Distler V.V, Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Ore petrology of chromite-PGE mineralization in the Kempirsai ophiolite complex // Mineralogy and Petrology. 2008. Vol. 92. P. 31–58. DOI 10.1007/ s00710-007-0207-3
- Cassard D., Nicolas A., Rabinowitch M., Moutte J., Leblanc M., Prinzhoffer A. Struc-tural classification of chromite pods in Southern New Caledonia // Economic Geol-ogy. 1981. Vol. 76. P. 805–831.
- 3. Hock M., Friedrich G., Plueger W.L., Wichowski A. Refractory- and metallurgical-type chromite ores, Zambales Ophiolite, Luzon, Philippines // Mineralium Deposita. 1986. Vol. 21. P. 190–199.
- 4. Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. СПб.: Наука. 1992. 197 с.
- 5. Макеев А.Б., Брянчанинова Н.Й. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. С.-Пб.: Наука, 1999. 252 с.
- 6. Naldrett A., Kinnaird J., Wilson A., Chunnet G., Yudovskaya M. Platinum group elements in the critical zone of the Bushveld complex. In: Platinum-

- group elements of South Africa. N.Q. Hammond, C. Hotton (eds). Council for Geoscience, South Africa. 2015.. Mineral Resources Series (2). P. 93–193.
- 7. Gonzalez-Jimenez J.-M., Gervilla F., Proenza J.A., Auge T., Kerestedjian T. Distribution of platinumgroup minerals in ophiolitic chromitites // Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B). 2009. Vol. 118. No. 3/4. P. 101–110.
- 8. Prichard H.M., Brough C. Potential of ophiolite complexes to host PGE deposits. In New developments in magmatic Ni-Cu and PGE deposits. Li C. and Ripley E.M. (Eds.) Geological publishing house Beijing. 2009. P. 277–290.
- 9. Сначев В.И., Савельев Д.Е., Рыкус М.В. Петрогеохимические особенности пород и руд габбро-гипербазитовых массивов Крака. Уфа, ИГ УНЦ РАН, 2001. 213 с.
- 10. Волченко Ю.А., Неустроева И.И. Два типа распределения платиноидов в альпинотипных комплексов складчатых поясов // Ежегодник–1987. ИГГ УрО АН СССР: Свердловск, 1988. С.70–73.

- 11. Волченко Ю.А., Золоев К.К., Коротеев В.А., Мардиросьян А.Н. Типы платиновометального оруденения и их генетическая сущность // Актуальные проблемы магматической геологии, петрологии и рудообразования. Екатеринбург, 1995. С.38–55.
- 12. Савельев Д.Е., Белогуб Е.В., Зайков В.В., Сначёв В.И., Котляров В.А., Блинов И.А. Первые проявления платинометальной минерализации в ультрамафитах массива Средний Крака
- (Южный Урал) // Доклады Академии наук, 2015. Т. 460. № 5. С. 566–569.
- 13. Савельев Д.Е., Калмукашев С.Р., Мусабиров И.И. Платинометальное оруденение верлитпироксенитового комплекса массива Средний Крака и перспективы его практического освоения // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. Уфа. 2018. С. 300–306.

#### REFERENCES

- 1. Distler V.V, Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Ore petrology of chromite-PGE mineralization in the Kempirsai ophiolite complex. Mineralogy and Petrology, 2008, vol. 92, pp. 31–58. doi: 10.1007/s00710-007-0207-3
- 2. Cassard D., Nicolas A., Rabinowitch M., Moutte J., Leblanc M., Prinzhoffer A. Structural classification of chromite pods in Southern New Caledonia. Economic Geology, 1981, vol. 76, pp. 805–831.
- 3. Hock M., Friedrich G., Plueger W.L., Wichowski A. Refractory- and metallurgical-type chromite ores, Zambales Ophiolite, Luzon, Philippines. Mineralium Deposita, 1986, vol. 21, pp. 190–199.
- 4. Makeev A.B. Mineralogiya alpinotipnykh ultrabazitov Urala [Mineralogy of alpine-type ultrabasites of the Urals]. St. Petersburg, Nauka, 1992, 197 p. (In Russian).
- 5. Makeev A.B., Bryanchaninova N.I. Topomineralogiya ultrabazitov Polyarnogo Urala [Topomineralogy of the Polar Ural ultrabasites] St. Petersburg, Nauka, 1999, 252 p. (In Russian)
- Naldrett A., Kinnaird J., Wilson A., Chunnet G., Yudovskaya M. Platinum group elements in the critical zone of the Bushveld complex. In: Platinum-group elements of South Africa. N.Q. Hammond, C. Hotton (eds). Council for Geoscience, South Africa, 2015, Mineral Resources Series (2), pp. 93–193.
- 7. Gonzalez-Jimenez J.-M., Gervilla F., Proenza J.A., Auge T., Kerestedjian T. Distribution of platinumgroup minerals in ophiolitic chromitites. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), 2009, vol. 118, no. 3/4, pp. 101–110.
- 8. Prichard H.M., Brough C. Potential of ophiolite complexes to host PGE deposits. In: New developments in magmatic Ni-Cu and PGE deposits. C. Li, E.M. Ripley (eds.) Geological publishing house Beijing, 2009, pp. 277–290.
- 9. Snachev V.I., Saveliev D.E., Rykus M.V. Petrochimicheskie osobennosti porod i rud gabbro-

- giperbazitovykh massivov Kraka [Petrochemical features of rock and ores of Kraka gabbrogyperbasite massifs]. Ufa, BGU, 2001, 213 p. (In Russian).
- Volchenko Yu.A., Neustroeva I.I. Dva tipa raspredeleniya ptatinoidov v alpinotipnykh kompleksakh skladchatykh poyasov [Two types of PGE distribution in the alpine-type complexes of folded belts] Ezhegodnik-1987 [Yearbook-1987]. Sverdlovsk, IGG UrO AN SSSR, 1988, pp. 70–73. (In Russian).
- 11. Volchenko Yu.A., Zoloev K.K., Koroteev V.A., Mardirosyan A.N. Tipy platinovometalnogo orudeneniya i ikh geneticheskaya sushchnost [Types of PGE ores and their genetic essence] Aktualnye problemy magmaticheskoy geologii, petrologii and rudoobrazovaniya [Topical problems of magmatic geology, petrology and ore deposits formation]. Ekateringurg, 1995, pp. 38–55. (In Russian).
- 12. Saveliev D.E., Belogub E.V., Zaykov V.V., Snachev V.I., Kotlyarov V.A., Blinov I.A. First occurrences of PGE mineralization in the Sredny Kraka ultramafic rocks (the Southern Urals). Doklady Earth Sciences, 2015, vol. 460, part. 2, pp. 103–105.
- 13. Saveliev D.E., Kalmukashev S.R., Musabirov I.I. Platinometalnoe orudenenie verlit-piroksenitovogo kompleksa massiva Sredniy Kraka i perspektivy ego prakticheskogo ispolzovaniya [PGE mineralization of the werlite-pyroxenite complex in the Sredny Kraka massif and prospects for its use]. Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy okruzhayushchey sredy Bashkortostana i sopredelnykh territoriy [Geology, minerals and ecology problems of Bashkortostan and adjacent regions]. Ufa, 2018, pp. 300–306. (In Russian).

Работа выполнена в рамках Государственного задания по темам №0252-2017-0014 и №0246-2019-0078. Аналитические исследования проведены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов» и ЦКП ИМин УрО РАН.