УДК 553.461(234.853)

DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-6>

ХРОМИТИТЫ ЗОНЫ МЕЛАНЖА НУРАЛИНСКОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. Д. Е. Савельев, Я. Н. Нугуманова, Р. А. Гатауллин, С. Н. Сергеев

Реферат. Исследованы минералогические особенности хромититов из зоны серпентинитового меланжа в восточной части Нуралинского массива. Установлено, что рудообразующие хромшпинелиды проявлений Сарусаккульского рудного узла и рудопроявления Шерамбайское представлены высокохромистыми разновидностями, близкими по составу к шпинелидам из хромититов внутренней части мантийного разреза офиолитов. Основными акцессорными минералами в хромититах являются сульфиды и арсениды никеля (миллерит, хизлевудит, орселит), к которым часто приурочены тонкие выделения (1–7 мкм) минералов платиновой группы. По геохимическим особенностям минерализация относится к смешанному типу (Os, Pt, Ir > Ru > Pd, Rh). Делается вывод о том, что образование акцессорной минерализации и выделение платинометаллических фаз было вызвано тектонической перегруппировкой материала и воздействием на хромититы низкотемпературных флюидов.

Ключевые слова: ультрамафиты, хромшпинелиды, акцессорные минералы, сульфиды, платиноиды, массив Нурали

CHROMITITES FROM MÉLANGE ZONE OF THE NURALI MASSIF (THE SOUTHERN URALS)

D. E. Saveliev, Ya. N. Nugumanova, R. A. Gataullin, S. N. Sergeev

Abstract. We present some results of study of mineralogical peculiarities of chromitites from serpentinite mélange zone in the eastern part of Nurali massif. It was found that chromian spinel grains from Sherambayskoe and Sarusakkul area occurrences are high-Cr as those from chromitite bodies of the inner parts of ophiolite mantle section. The main accessory minerals in the chromitite are Ni-sulfides and arsenides (millerite, heazlewoodite and orcelite). These often enclose tiny precipitations (1–7 µm) of platinum group minerals (PGM). Chemically, this mineralizations belong to a mixed type with Os, Pt, Ir > Ru > Pd, Rh. We infer that accessory minerals formation including PGM was caused by both tectonic redistribution of matter and interaction of chromitites with low-T fluids.

Keywords: ultramafic rock, chromian spinel, accessory minerals, base metal sulfides, PGE, Nurali massif

Введение

Актуальность изучения акцессорной минерализации, приуроченной к хромититам Нуралинского массива, определяется тем, что в непосредственной близости от него расположены россыпи золота, несущие платинометаллическую минерализацию [Зайков и др., 2016]. Предыдущие исследования [Дмитренко и др., 1992; Смирнов, 1995; Молошаг, Смирнов, 1996; Grieco et al., 2007; Zaccarini

et al., 2004 и др.] позволили установить платиносодержание некоторых рудопоявлений, расположенных на площади распространения переходного мантийно-корового комплекса офиолитов (Западно-Шерамбайское и Приозерное). В дальнейшем минералы платиновой группы были установлены также в пределах месторождения Мокрая Яма [Савельев и др., 2017], которое приурочено к апоперидитовым серпентинитам и отделяется от них небольшой оторочкой аподунитовых серпентинитов.

Для цитирования: Савельев Д.Е., Нугуманова Я.Н., Гатауллин Р.А., Сергеев С.Н. Хромититы зоны меланжа Нуралинского массива (Южный Урал) // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 77–90. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-6>.

For citation: Saveliev D.E., Nugumanova Ya.N., Gataullin R.A., Sergeev S.N. Chromitites from mélange zone of the Nurali massif (the Southern Urals) // *Geologicheskii vestnik*. 2019. No. 1. P. 77–90. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-6>.

Целью настоящей работы является продолжение исследований состава хромшпинелидов и акцессорной минерализации в хромититах восточной части массива. В данном сообщении рассмотрены рудопоявления, локализованные в зоне серпентинитового меланжа.

Исследования включали в себя маршрутное геологическое изучение рудопоявлений, отбор образцов хромититов и вмещающих пород (серпентинизированных ультрамафитов, габброидов, лиственитов). Петрографический и минеральный состав пород и руд изучен в полированных шлифах и аншлифах на поляризационных оптических микроскопах. Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 SBH Tescan с энерго-дисперсионным анализатором x-Act Oxford Instruments в ИПСМ РАН (г. Уфа). Формулы минералов рассчитывались в пересчете на целое число атомов анионов: 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, маухерита — на 8 атомов As, интерметаллидов — на 1 формульную единицу суммы металлов.

Результаты исследований и их обсуждение

Геологическая позиция рудопоявлений

Восточная часть Нуралинского массива представляет собой слабо всхолмленную равнину с многочисленными мелкими озерами. Небольшие возвышенности с абсолютными отметками 450–550 м сложены габбро, диабазами, лиственитами и родингитизированными осадочными и вулканогенными породами (рис. 1). Данные породы слагают блоки в меланже, матриksom которого являются преимущественно хризотилловые серпентиниты, занимающие пониженные участки и подножия склонов. При поисковых работах на хромовые руды в 1930-х (Фарафонтьев, 1939 г. и др.) и 1970-х годах (Шумихин, 1980 г.) в серпентинитовом меланже Нуралинского массива был выявлен ряд небольших рудопоявлений, в том числе Шерамбайское и проявления Сарусаккульского рудного узла (Шумихин, 1987 г.), минералогические особенности которых мы и рассмотрим ниже.

Рудопоявления в различной степени изучены с поверхности и характеризуются небольшими размерами. Судя по остаткам эксплуатационных выемок, наиболее крупными из них являлись Восточно- и Южно-Сарусаккульское (рис. 2а, б). Следует

отметить, что, хотя проявления названы по оз. Сарусаккуль, все они расположены примерно в 1 км к юго-востоку от него, вблизи другого, безымянного озера округлой формы.

На Восточно-Сарусаккульском рудопоявлении (НР-118) пройдена цепочка небольших карьеров размерами до 5×3×3 м с общим северо-восточным простиранием (СВ 40°). В днище одной из выемок пройден шурф глубиной не менее 3 м. По-видимому, рудопоявление было представлено цепочкой из трех линзовидных тел массивных и густовкрапленных хромититов длиной от 1 до 10 м. В отвалах с преобладанием хризотилловых апоперидитовых серпентинитов (см. рис. 2в) довольно часто встречаются рудные обломки.

На Южно-Сарусаккульском проявлении (НР-217), расположенном на южном берегу безымянного озера (см. рис. 2г), сохранились две сильно заросшие выемки размером 7×7×5 и 3×3×1 м (см. рис. 2д), расположенные также в виде цепочки северо-восточного простирания. В отвалах рудные образцы встречаются значительно реже, здесь также преобладают серпентиниты. Значительно меньшими размерами характеризуется Сарусаккульское рудопоявление. Оно расположено на северном берегу одноименного озера, в 10 м от уреза воды, и в настоящее время представлено заросшей выемкой размером 3×1.5×1.5 м, пройденной на контакте серпентинитов и родингитизированных осветленных пород предположительно первичной вулканогенно-осадочной природы (см. рис. 2е). Хромититы были отобраны из отвала выемки, где они встречаются в виде крупных обломков (см. рис. 2ж, з) вместе с серпентинитами и родингитами.

Помимо упомянутых выше рудопоявлений, принадлежащих к Сарусаккульскому рудному узлу, в отчетах и на карте Е.А. Шумихина (1987 г.) отмечены также Северо-Сарусаккульское и Уртыкташское. Первое нами не было найдено, а на участке, где обозначено второе, мы обнаружили только многочисленные неглубокие канавы, пройденные по серпентинитам, но обломки хромититов не были найдены.

Структурные и минералогические особенности хромититов

Шерамбайское рудопоявление расположено на одноименном ручье, на северном берегу пруда (см. рис. 1), и приурочено к западному контакту блока лиственитов с серпентинитами. Положительные формы рельефа с хорошо выраженными

Рис. 1. Схема геологического строения восточной части Нуралинского массива. Составлена с использованием данных работ (Шумихин, 1987 г.), [Савельев и др., 2017; Saveliev, Ankusheva, 2018]

Условные обозначения: 1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — осадочные породы; 3 — вулканогенные породы; 4 — габброиды; 5 — переходный мантийно-коровый комплекс (пироксениты, верлиты, вебстериты); 6 — шпинелевые перидотиты; 7 — преимущественно дуниты; 8 — серпентиниты; 9 — листвиниты; 10 — разрывные нарушения; 11 — хромитопоявления (а — в мантийном и переходном мантийно-коровом комплексе; б — в меланже, описанные в настоящей работе: 1 — Шерамбайское, 2 — Сарусаккульское, 3 — Восточно-Сарусаккульское, 4 — Южно-Сарусаккульское), 12 — золотонесные россыпи, содержащие МПГ.

Fig. 1. Sketch geological map of the eastern part of Nurali ultramafic massif. After works (Shumikhin, 1987), [Saveliev et al., 2017; Saveliev, Ankusheva, 2018]

Legend: 1 — Quaternary alluvial deposits; 2 — sedimentary rocks; 3 — volcanic rocks; 4 — gabbro; 5 — mantle-crust transition zone (pyroxenites, wehrlites, websterites); 6 — spinel peridotites; 7 — dunite; 8 — serpentinites; 9 — listwanites; 10 — faults; 11 — chrome ore occurrences (a — in the mantle and mantle-crust transition sections; б — in the serpentinite mélange, studied here: 1 — Sherambayskoe, 2 — Sarusakkulskoe, 3 — East-Sarusakkulskoe, 4 — South-Sarusakkulskoe), 12 — gold placers with PGM.

обнажениями представлены листвинитами, а серпентиниты слагают преимущественно пониженные участки. Листвиниты характеризуются светлой окраской — от почти белой до зеленовато-коричневой. Они состоят главным образом из кварца и магнезита с небольшим количеством хромовой слюды — фуксита и редких ксеноморфных зерен хромшпинелидов (рис. 3), состав которых существенно отличается от типичных составов аксессуар-

ных и рудообразующих шпинелидов ультрамафитов (см. ниже).

Морфология хромшпинелидов указывает на то, что листвиниты были образованы, скорее всего, по перидотитам мантийного разреза офиолитового комплекса. Хромититы в коренных выходах представлены преимущественно густовкрапленными мелко- и среднезернистыми разновидностями, в элювии встречены обломки массивных хромити-

Рис. 2. Общий вид рудопроявлений и обнажений хромититов и вмещающих пород

Примечание: а–в — Восточно-Сарусаккульское рудопроявление, на врезке — шурф; г — обнажения родингитизированных вмещающих пород на северном берегу безымянного озера, стрелки указывают на расположение проявлений Южно-Сарусаккульское (HP-217) и Сарусаккульское (HP-115); д — заплывшая выемка на Южно-Сарусаккульском рудопроявлении; е–з — Южно-Сарусаккульское рудопроявление (е — родингиты в борту канавы, вскрывающей хромититы; ж, з — крупнозернистые густовкрапленные хромититы из отвала).

Fig. 2. General view of occurrences and outcrops of chromitites and their wall rocks

Note: а–в — East-Sarusakkulskoe occurrence, on the inset — exploration pit; г — outcrops of rodingitized wall rocks on the north side of unnamed lake; arrows show locations of South-Sarusakkulskoe (HP-217) and Sarusakkulskoe occurrences (HP-115); д — small quarry at the South-Sarusakkulskoe occurrence; е–з — South-Sarusakkulskoe occurrence (е — rodingites on the wall of exploration trench at the contact with chromitites; ж, з — coarse-grained dense-disseminated chromitites from waste).

Рис. 3. Структурные и минералогические особенности листваниц Шерамбайского рудопроявления

Примечание: а — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; б–г — снимки в режиме обратно-рассеянных электронов (далее — BSE); q — кварц, fu — фуксит, Chrt — хромшпинелид, Mgt — магнетит.

Fig. 3. Structural and mineralogical peculiarities of listwanites from Sherambayskoe occurrence

Note: a — scan-image of polished section, scale 1 cm; б–г — BSE-images; q — quartz, fu — fuchsite, Chrt — chromian spinel, Mgt — magnetite.

тов. Вкрапленные хромититы сложены округлыми зернами хромшпинелидов, соприкасающимися между собой. Рудные зерна разбиты трещинами, заполненными карбонатом, реже серпентином.

Из акцессорных минералов наибольшим распространением пользуется сульфид никеля — хизлевудит (рис. 4г, е), значительно реже в сростаниях с ним или в виде мелких выделений внутри него встречен арсенид никеля (орселит). Размер зерен варьирует от долей микрона до 15–20 мкм, поэтому количественные данные о составе минералов удастся получить не всегда. Относительно крупные выделения локализованы среди более крупных

кристаллов хромита, а среди раздробленных и измененных тонкозернистых хромититов обычно встречаются обильные тончайшие выделения акцессориев.

В некоторых случаях сростки хизлевудита и орселита содержат очень мелкие обособления минералов платиновой группы, среди которых определены арсенид Ni-Cu-Pt, платинистая медь, твердые растворы состава Ni-Pt-Fe-Ru-Ir. В овальных измененных кристаллах миллерита обнаружены обильные мельчайшие выделения недиагностируемых фаз (<1 мкм) с высокими содержаниями рутения и иридия (см. рис. 4з).

Рис. 4. Хромититы и акцессорная минерализация Шерамбайского рудопоявления

Примечание: а, б — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; в-и — изображения в режиме BSE; Chrt — хромшпинелиды, Spt — серпентин.

Fig. 4. Chromitites and accessory minerals of Sherambayskoe occurrence

Note: а, б — scan-image of polished section, scale 1 cm; в-и — BSE-images; Chrt — chromian spinel, Spt — serpentine.

На *Сарусаккульском рудопоявлении* оруденение приурочено к тектонизированным хризотил-ловым серпентинитам, слагающим пониженные участки вдоль северного берега безымянного озера. С запада и севера они граничат с плотными осветленными родингитами, которые обнажаются на склоне и вершинах возвышенностей (см. рис. 2г). Среди хромититов преобладают крупнозернистые средне- и густовкрапленные разновидности.

Под микроскопом хромититы представлены агрегатами плотно соприкасающихся зерен. В большинстве случаев границы отдельных кристаллов

неотличимы: с одной стороны, они тесно срастаются между собой, а с другой — разбиты многочисленными тонкими трещинами. Внешние границы отчетливы только в случае соприкосновения хромита с силикатным материалом, который представлен серпентином и хлоритом. В этом случае для зерен хромита характерна преимущественно неправильная форма, часто с округлыми очертаниями границ.

Морфология силикатных выделений еще более причудлива и свидетельствует, скорее всего, о выжимании более мягкого серпентин-хлорито-

вого матрикса при формировании (либо преобразовании) структуры хромититов. К таким участкам приурочены почти все обнаруженные выделения акцессорных минералов, которые на данном проявлении являются наиболее многочисленными (см. рис. 5в). Преимущественным распространением среди акцессориев пользуется миллерит (см. рис. 5в—д, ж, з). Он образует изометричные либо неправильной формы зерна размером 50–100 мкм,

внутри которых иногда обнаруживаются более мелкие (до 7 мкм) выделения минералов платиноидов. Последние представлены чаще всего твердыми растворами состава $\text{Os-Ir-Pt-Ru} \pm \text{Pd} \pm \text{Rh}$ с Ni, Fe, Cu. Вторым по распространенности акцессорием в хромититах является хизлевудит, в одном из его сростков с пентландитом обнаружены многочисленные, но очень мелкие (<1 мкм) выделения фаз Os и Ir (см. рис. 5е).

Рис. 5. Хромититы и акцессорная минерализация Сарусакульского рудопоявления

Примечание: снимки в режиме BSE; з — фрагмент участка «ж»; Chrt — хромшпинелид, Spt — серпентин, Chl — хлорит, Hzl — хизлевудит.

Рис. 5. Chromitites and accessory minerals of Sarusakkulskoe occurrence

Note: BSE-images; Chrt — chromian spinel, Spt — serpentine, Chl — chlorite, Hzl — heazlewoodite.

Восточно-Сарусаккульское рудопоявление (НР-118) сложено густовкрапленными и массивными хромититами, которые характеризуются разнотекстурной структурой (рис. 6а). Размер зерен варьирует от 1 до 5 мм, в сплошных агрегатах индивидуальные кристаллы хромита трудно различимы из-за их тесного срастания между собой и наличия многочисленных трещин. Зерна обычно соединены в непрерывные агрегаты с извилистыми границами, заключающими внутри себя силикатные (серпентиновые) включения неправильной формы. Для зерен, граничащих с силикатным материалом, характерна округленная форма.

Хромшпинелиды содержат многочисленные включения, преимущественно представленные серпентином. Значительно реже внутри зерен либо в интерстициях встречаются выделения акцессорных минералов, большая часть которых представлена миллеритом (см. рис. 6б, в). Размер выделений изменяется от первых до 50 мкм, они часто приурочены к небольшим включениям силикатного материала внутри кристаллов хромита. При изучении в режиме обратно-рассеянных электронов зерна миллерита обычно характеризуются однородным составом.

Южно-Сарусаккульское рудопоявление (НР-217) преимущественно было сложено массивными хромититами с небольшой долей ксеноморфных включений силикатного материала (рис. 7а). При изучении под микроскопом в хромититах фиксируется широкое распространение микробрекчиевидных текстур, которые развиты вдоль зон дробления массивных хромититов. Одна из таких зон хорошо видна в левой части изображения аншлифа (см. рис. 7а),

а ее внутреннее строение иллюстрируют рис. 7б, в. Зерна хромита разбиты на угловатые блоки размером от 10–20 мкм до 100 мкм и погружены в матрикс серпентинового состава (см. рис. 7б). Вокруг блоков отмечается тонкая оторочка, представленная предположительно гидроандрадитом (см. рис. 7г, д). Именно к таким зонам дробления приурочена большая часть обнаруженных акцессориев.

Выделения акцессорных минералов в хромититах представлены преимущественно арсенидом никеля — орселитом, размер зерен которого варьирует от субмикронного до 20–30 мкм (см. рис. 7в–д). Одно из редких крупных ксеноморфных зерен размером около 100 мкм содержит включение палладистой меди (рис. 7е). В целом же практически все изученные выделения арсенидов характеризуются однородным составом.

Состав хромшпинелидов и акцессорных минералов руд

Большая часть проанализированных рудообразующих хромшпинелидов относится к высокохромистым разновидностям — хромиту и алюмохромиту, концентрация Cr_2O_3 в неизмененных зернах варьирует в пределах 52–65 мас. % (табл. 1). Отношение двухвалентных катионов Mg/Fe в формуле примерно равно единице (рис. 8а). Уменьшение концентраций магния и алюминия обычно связано с метаморфическими преобразованиями первичных шпинелидов, замещением их хроммагнетитом и магнетитом. На изученных проявлениях обогащенные железом составы выявлены во внешних каемках зерен.

Рис. 6. Хромититы и акцессорная минерализация Восточно-Сарусаккульского рудопоявления

Примечание: а — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; б, в — снимки в режиме BSE; Chrt — хромшпинелид, Spt — серпентин.

Fig. 6. Chromitites and accessory minerals of East-Sarusakkulskoe occurrence

Note: а — scan-image of polished section, scale 1 cm; б, в — BSE-images; Chrt — chromian spinel, Spt — serpentine.

Рис. 7. Хромититы и акцессорная минерализация Южно-Сарусаккульского рудопоявления

Примечание: а — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; б–е — снимки в режиме BSE; Chrt — хромшпинелид, orc — орселит.

Fig. 7. Chromitites and accessory minerals of South-Sarusakkul'skoe occurrence

Note: а — scan-image of polished section, scale 1 cm; б–е — BSE-images; Chrt — chromian spinel, orc — orcelite.

Наиболее интенсивные изменения хромшпинелидов происходят при гидротермальном воздействии на ультрамафиты и могут быть проиллюстрированы составами акцессорных шпинелидов из вмещающих лиственитов проявления Шерамбайское. Как следует из табл. 1 и рис. 8, в зернах шпинелидов из лиственитов полностью отсутствует магний, а алюминий отмечается лишь в следовых количествах. В то же время минералы в значительной степени обогащены двух- и трехвалентным железом, а из примесных компонентов в них отмечается высокое содержание никеля (до 7 мас. % NiO) и цинка (до 1 мас. % ZnO). Вместе с тем форма выделений шпинелидов из лиственитов весьма сходна с таковой акцессорных хромшпинелидов из слабо серпентинизированных шпинелевых перидотитов Нуралинского массива. Из рассмотрения диаграмм $Mg\#-Fe\#$ и $Al-Cr-Fe^{+3}$ следует, что хромшпинелиды всех изученных проявлений близки к таковым типичных подформных месторождений мантийной части разреза офиолитовых комплексов.

Составы акцессорных минералов из хромититов приведены в табл. 2. В целом из нее следует, что на изученных рудопоявлениях наиболее распространены три минерала — миллерит, хизлевудит и орселит. Миллерит встречается на Шерамбайском, Сарусаккульском и Восточно-Сарусаккульском проявлениях. Для минералов Шерамбайского проявления характерны примеси меди, кобальта и железа. Наиболее высокие концентрации хрома (2.12 мас. %) и железа (до 5 мас. %) зафиксированы в миллерите из Восточно-Сарусаккульского проявления. Наличие в анализах небольших количеств хрома обычно связывается с захватом матрицы вмещающего хромшпинелида, но в данном случае он встречается во всех изученных точках, в том числе и в достаточно крупных зернах. Практически отсутствуют примеси в миллеритах Сарусаккульского проявления, а содержание никеля в них максимально (65 мас. %).

Хизлевудит встречается в хромититах Шерамбайского и Сарусаккульского рудопоявлений.

Таблица 1

Средние химические составы хромшпинелидов (мас. %)

Table 1

Average compositions of chromian spinels (wt. %)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
N	4	9	3	11	8	14	2	1
Cr ₂ O ₃	52.77	60.64	36.2	57.63	58.80	58.87	64.63	51.35
Al ₂ O ₃	16.87	10.04	0.93	13.86	12.07	12.51	7.39	11.54
FeO	15.0	14.88	55.14	14.07	14.21	13.51	14.59	23.19
MgO	15.1	14.31	—	13.90	14.92	15.00	13.28	13.91
TiO ₂	0.26	0.14	—	—	—	0.11	0.11	—
MnO	—	—	—	0.48	—	—	—	—
NiO	—	—	6.95	—	—	—	—	—
ZnO	—	—	0.78	0.06	—	—	—	—
Коэффициенты формул								
Cr	1.297	1.540	1.080	1.446	1.475	1.472	1.672	1.303
Al	0.617	0.380	0.041	0.513	0.450	0.466	0.285	0.437
Fe ⁺³	0.076	0.078	0.852	0.036	0.077	0.061	0.051	0.246
Fe ⁺²	0.306	0.314	0.793	0.339	0.292	0.291	0.342	0.349
Mg	0.698	0.685	—	0.651	0.705	0.707	0.648	0.665
Ti	0.006	0.003	—	—	—	0.003	0.003	—
Mn	—	—	—	0.014	—	—	—	—
Ni	—	—	0.211	—	—	—	—	—
Zn	—	—	0.022	0.001	—	—	—	—
Числовые характеристики								
#Cr	0.68	0.80	0.96	0.74	0.77	0.76	0.85	0.75
#Mg	0.70	0.69	—	0.65	0.71	0.71	0.65	0.66

Примечание: 1–3 — Шерамбайское рудопоявление: 1 — хромитит, обр. HP-53-1a; 2 — хромитит, обр. HP-53-2; 3 — лиственит, обр. HP-53-3; 4 — Сарусаккульское рудопоявление, хромитит, обр. HP-115-1; 5 — Восточно-Сарусаккульское рудопоявление, хромитит, обр. HP-118-26; 6–8 — Южно-Сарусаккульское рудопоявление, хромитит, обр. HP-217; N — число анализов; прочерк означает, что содержание данного элемента ниже предела обнаружения.

Notes: 1–3 — Sherambayskoe occurrence: 1 — chromitite HP-53-1a, 2 — chromitite HP-53-2, 3 — listwanite HP-53-3; 4 — Sarusakkulskoe occurrence, chromitite HP-115-1; 5 — East-Sarusakkulskoe occurrence, chromitite HP-118-26; 6–8 — South-Sarusakkulskoe occurrence, chromitite HP-217; N — number of analyses; dash — below limit of detection.

Рис. 8. Вариации состава хромшпинелидов в хромититах и лиственитах меланжевой зоны Нуралинского массива

Примечание: а — диаграмма $Mg\#[Mg/(Mg+Fe^{+2})]-Cr\#[Cr/(Cr+Al)]$; б — диаграмма $Al-Cr-Fe^{+3}$, расчет по коэффициентам в формуле; 1–2 — Шерамбайское рудопоявление (HP-53): 1 — хромититы, 2 — листвениты; 3 — Сарусаккульское (HP-115); 4 — Восточно-Сарусаккульское (HP-118); 5 — Южно-Сарусаккульское (HP-217).

Fig. 8. Compositional variations of chromian spinels in the chromitites and listwanites from mélange zone of Nurali massif

Note: а — $Mg\#[Mg/(Mg+Fe^{+2})]-Cr\#[Cr/(Cr+Al)]$ diagram; б — $Al-Cr-Fe^{+3}$ diagram, all ratios were calculated using formula coefficients; 1–2 — Sherambayskoe occurrence (HP-53): 1 — chromitites, 2 — listwanites; 3 — Sarusakkulskoe (HP-115); 4 — East-Sarusakkulskoe (HP-118); 5 — South-Sarusakkulskoe (HP-217).

Таблица 2

Средние химические составы акцессорных минералов хромититов (мас. %)

Table 2

Average compositions of accessory minerals from chromitites (wt. %)

№ п/п	N	S	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	As	Rh	Sb	Сумма
1	3	36.83	0.07*	0.85	0.15	61.98	0.09	—	—	—	99.98
2	9	34.03	0.09*	0.02	—	65.85	—	—	—	—	100
3	5	34.41	2.12*	3.57	—	59.84	—	—	—	—	100
4	17	0.03	0.35*	1.02	—	61.99	—	36.33	—	0.3	100
5	2	—	—	0.77	—	63.63	—	33.48	0.21	0.48	98.55
6	1	—	0.63*	0.48	—	50.28	—	47.14	—	1.48	100.01
7	1	34.95	—	24.5	—	40.55	—	—	—	—	100
8	1	40.51	—	0.65	—	58.81	0.03	—	—	—	100
9	7	28.36	—	0.04	—	71.6	—	—	—	—	100
10	3	28.15	—	0.29	—	71.32	—	—	—	—	99.76
11	2	9.99	—	0.27	—	64.35	—	20.6	—	4.65	99.85
<i>Формулы минералов</i>											
1	$(\text{Ni}_{0.913}\text{Fe}_{0.013}\text{Co}_{0.001}\text{Cu}_{0.001}\text{Cr}_{0.001})_{0.929}\text{S}_{1.00}$										
2	$(\text{Ni}_{1.052}\text{Cr}_{0.002})_{1.054}\text{S}_{1.00}$										
3	$(\text{Ni}_{0.945}\text{Fe}_{0.06}\text{Cr}_{0.037})_{1.042}\text{S}_{1.00}$										
4	$(\text{Ni}_{4.347}\text{Fe}_{0.078}\text{Cr}_{0.027})_{4.452}(\text{As}_{1.987}\text{Sb}_{0.009}\text{S}_{0.004})_{2.00}$										
5	$(\text{Ni}_{4.791}\text{Fe}_{0.061}\text{Rh}_{0.009})_{4.860}(\text{As}_{1.983}\text{Sb}_{0.017})_{2.00}$										
6	$(\text{Ni}_{10.641}\text{Cr}_{0.151}\text{Fe}_{0.107})_{10.899}(\text{As}_{7.849}\text{Sb}_{0.15})_{8.00}$										
7	$(\text{Ni}_{5.034}\text{Fe}_{3.205})_{8.239}\text{S}_{8.00}$										
8	$(\text{Ni}_{3.15}\text{Fe}_{0.037}\text{Cu}_{0.001})_{3.188}\text{S}_{4.00}$										
9	$(\text{Ni}_{2.739}\text{Fe}_{0.002})_{2.741}\text{S}_{2.00}$										
10	$(\text{Ni}_{2.748}\text{Fe}_{0.012})_{2.759}\text{S}_{2.00}$										
11	$(\text{Ni}_{8.789}\text{Fe}_{0.039})_{8.768}(\text{S}_{2.488}\text{As}_{2.202}\text{Sb}_{0.31})_{5.00}$										

Примечание: 1–3 — миллерит; 4, 5 — орселит; 6 — маухерит; 7 — пентландит; 8 — полидимит; 9–10 — хизлеудит; 11 — $\text{Ni}_9(\text{AsS})_5$; 1, 5, 8, 10, 11 — Шерамбайское (НР-53); 2, 7, 9 — Сарусаккульское (Нр-115); 3 — Восточно-Сарусаккульское; 4, 6 — Южно-Сарусаккульское; * — подсветка матрицы хромшпинелидов.

Notes: 1–3 — millerite; 4, 5 — orcelite; 6 — maucherite; 7 — pentlandite; 8 — polydymite; 9–10 — heazlewoodite; 11 — $\text{Ni}_9(\text{AsS})_5$; 1, 5, 8, 10, 11 — Sherambayskoe (НР-53); 2, 7, 9 — Sarusakkulskoe (Нр-115); 3 — East-Sarusakkulskoe; 4, 6 — South-Sarusakkulskoe; * — effect of spinel matrix.

Для всех изученных зерен данного минерала характерен дефицит металлов по отношению к сере (см. табл. 2). Из примесей присутствует только железо в весьма незначительном количестве. Орселит встречен в хромититах Южно-Сарусаккульского и Шерамбайского проявлений. На Южно-Сарусаккульском рудопроявлении он является основным аксессуаром, для него характерны примеси железа, сурьмы и серы. Кроме данного минерала, встречено одно зерно маухерита, содержащего в виде примеси до 1.48 мас. % сурьмы. Зерна орселита с Шерамбайского рудопроявления содержат

в виде примеси родий (0.21 мас. %) и сурьму (до 0.45 мас. %).

Кроме отмеченных выше минералов, в хромититах также встречены единичные выделения пентландита, полидимита, маухерита и неидентифицированный сульфид никеля, состав которого наиболее близок к формуле $\text{Ni}_9(\text{AsS})_5$. В последнем зафиксированы высокие содержания сурьмы (4.65 мас. %).

Платинометальная минерализация в изученных образцах хромититов представлена очень мелкими выделениями интерметаллидов и сульфидов

арсенидов платиноидов, количественный анализ которых удастся провести далеко не всегда. В табл. 3 приведены данные химических анализов, которые характеризуют выделения МПГ размером более 5 мкм. Из таблицы следует, что подавляющее большинство изученных зерен представлено твердыми растворами платиновых металлов с никелем, железом и медью. Наибольшее число анализов (7) относится к хромититам Сарусаккульского рудопроявления, из них 6 — твердые растворы с преобладанием тугоплавких ЭПГ и одно — сульфогарсенид никеля с высоким содержанием родия (19.59 мас. %). Из шести анализов интерметаллидов, в трех ведущая роль принадлежит осмию ($Os > Ir > Ru, Pt, Pd$), в двух — иридию ($Ir > Ru$), в одном — платине ($Pt > Ir$). На Шерамбайском проявлении получены данные о составе твердого

раствора никеля и железа с платиноидами состава $Pt > Ru > Ir$ и платинистой меди с примесью палладия, на Южно-Сарусаккульском — палладистой меди.

Проведенные минералого-геохимические исследования показали, что акцессорная минерализация неравномерно распределена в хромититах меланжевой зоны Нуралинского массива. Наименьшее количество акцессориев встречается в рудах Восточно-Сарусаккульского проявления, умеренные количества характерны для Шерамбайского и Южно-Сарусаккульского проявлений, а максимальное количество сульфидов обнаружено в хромититах Сарусаккульского рудопроявления.

По составу акцессориев также отмечают различия: на Южно-Сарусаккульском проявлении встречены исключительно арсениды никеля

Таблица 3

Химический состав минералов платиновой группы из хромититов (мас. %)

Table 3

Chemical composition of Platinum Group Minerals from chromitites (wt. %)

№ п/п	S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Сумма
1	—	14.88	41.93	—	—	—	11.96	—	—	—	7.56	23.08	99.41
2	—	1.34	9.45	8.92	—	—	5.04	—	1.62	50.9	19.89	2.84	100
3	1.31	13.54	47.87	—	—	—	1.61	—	—	—	35.68	—	100
4	2.08	9.92	37.59	—	—	—	11.92	—	—	—	38.48	—	99.99
5	—	0.45	5.73	—	0.88	—	6.26	—	—	61.73	24.96	—	100
6	—	17.57	50.56	1.05	—	—	1.52	0.69	—	—	4.88	23.74	100
7	—	9.79	28.87	—	—	—	5.45	—	—	25.34	14.08	16.45	99.98
8	—	—	—	67.52	—	—	—	—	2.42	—	—	30.06	100
9	—	0.9	—	91.58	—	—	—	—	7.52	—	—	—	100
10	13.16	—	44.92	—	—	21.9	—	19.59	—	—	—	—	99.57
<i>Формулы минералов</i>													
1	$Ni_{0.568}Fe_{0.212}Ru_{0.095}Pt_{0.094}Ir_{0.031}$												
2	$Os_{0.345}Ni_{0.206}Cu_{0.181}Ir_{0.134}Ru_{0.064}Fe_{0.031}Pd_{0.020}Pt_{0.019}$												
3	$Ni_{0.626}Fe_{0.187}Ir_{0.143}S_{0.032}Ru_{0.012}$												
4	$Ni_{0.532}Ir_{0.167}Fe_{0.148}Ru_{0.099}S_{0.054}$												
5	$Os_{0.511}Ir_{0.205}Ni_{0.153}Ru_{0.098}Zn_{0.021}Fe_{0.013}$												
6	$Ni_{0.632}Fe_{0.231}Pt_{0.090}Ir_{0.019}Cu_{0.012}Ru_{0.011}Rh_{0.005}$												
7	$Ni_{0.485}Fe_{0.173}Os_{0.132}Pt_{0.084}Ir_{0.073}Ru_{0.053}$												
8	$Cu_{0.855}Pt_{0.126}Pd_{0.019}$												
9	$Cu_{0.943}Pd_{0.046}Fe_{0.011}$												
10	$(Ni_{3.248}Rh_{0.811})_{4.059}(As_{1.246}S_{1.754})_{3.00}$												

Примечание: 1–7 — твердые растворы платиноидов с Ni, Fe, Cu; 8 — платинистая медь; 9 — палладистая медь; 10 — Rh-содержащий сульфогарсенид никеля(?); 1, 8 — Шерамбайское (HP-53); 2–7, 10 — Сарусаккульское (HP-115); 9 — Южно-Сарусаккульское (HP-217).

Notes: 1–7 — solid solutions of PGE with Ni, Fe, Cu; 8 — Pt-containing Cu; 9 — Pd-containing Cu; 10 — Rh-containing sulfoarsenide of Ni(?); 1, 8 — Sherambayskoe (HP-53); 2–7, 10 — Sarusakulskoe (HP-115); 9 — South-Sarusakulskoe (HP-217).

(орселит и маухерит), тогда как в хромититах остальных рудопроявлений преобладают сульфиды (миллерит, хизлевудит). Платинометальная минерализация в наибольшем количестве представлена в хромититах Сарусаккульского проявления и носит смешанный характер с преобладанием тугоплавких элементов (Os, Ir) и платины, несколько меньшее значение имеет рутений, а палладий и родий являются редкими. На Шерамбайском рудопроявлении платинометальная минерализация преимущественно приурочена к зонам интенсивного дробления хромититов, и она также имеет смешанный характер (Pt, Ru, Pd).

Поскольку в составе МПГ преобладают тугоплавкие ЭПГ и платина, а состав рудообразующих хромшпинелидов изученных проявлений близок к таковому из хромититов рудных тел, локализованных в мантийном разрезе массива, можно предположить, что все изученные рудопроявления первоначально также размещались в дунитовых телах среди мантийных перидотитов. Тектоническое перемещение и связанные с ним процессы низкотемпературного метаморфизма и гидротермальных преобразований (серпентинизация, родингитизация, лиственитизация) привели к структурной перестройке хромититовых тел и минералого-геохимическим изменениям. Структурная перестройка заключалась в изменении морфологии тел, формировании зон дробления и брекчиевидных текстур. Вещественные изменения выразились в высвобождении примесных элементов (Ni, Fe, Cu, ЭПГ) из решетки хромшпинелидов и первичного оливина при серпентинизации и последующем дроблении в виде зерен акцессорных минералов — сульфидов, арсенидов и самородных металлов. В качестве дополнительных источников серы и мышьяка могли выступать коровые метаморфические флюиды.

Выводы

1. Исследован состав хромититов зоны серпентинитового меланжа Нуралинского массива и показано, что рудопроявления Сарусаккульского рудного узла и Шерамбайское сложены высокохромистыми шпинелидами, близкими к таковым месторождений внутренней части мантийного разреза массива.

2. Акцессорная минерализация изученных хромититов представлена сульфидами и арсенидами никеля, из которых основная роль принадлежит миллериту, хизлевудиту, орселиту.

3. На рудопроявлениях Шерамбайское, Сарусаккульское и Южно-Сарусаккульское впервые выявлена платинометальная минерализация, представленная преимущественно твердыми растворами платиноидов с никелем, железом и медью и единичными выделениями сульфоарсенидов. По геохимическим особенностям минерализация относится к смешанному типу (Os, Pt, Ir > Ru > Pd, Rh).

4. Формирование акцессорной минерализации и выделение платинометальных фаз было вызвано тектонической перегруппировкой материала и воздействием на хромититы низкотемпературных флюидов. Примесные элементы, первоначально входившие в состав хромшпинелидов и оливина, под действием деформаций и замещения первичного матрикса высвобождались из кристаллических решеток и образовали новые фазы.

Исследования проведены в рамках Госзадания (темы №№ 0252–2017–0014, 0246–2019–0078). Электронно-микроскопические исследования минералов ультрамафитов проведены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Список литературы:

- Дмитренко Г.Г., Горелова Е.М., Савельева Г.Н. Минералы платиноидов в хромитах массива Нурали (Южный Урал) // Докл. РАН. — 1992. — Т. 324, № 2. — С. 403–406.
- Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. Сrostки минералов ЭПГ в Миасской россыпной зоне и их коренные источники // Минералогия. — 2016. — № 4. — С. 31–47.
- Молошаг В.П., Смирнов С.В. Платиноидная минерализация Нуралинского гипербазит-габбрового массива (Южный Урал) // Записки РМО. — 1996. — № 1. — С. 48–54.
- Савельев Д.Е., Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. Хромшпинелиды и акцессорная минерализация в хромититах и ультрамафитах Нуралинского массива (Южный Урал) // Записки РМО. — 2017. — № 1. — С. 59–83.
- Смирнов С.В. Петрология верлит-клинопироксенит-габбровой ассоциации Нуралинского гипербазитового массива и связанное с ним платиноидное оруденение: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Екатеринбург, 1995. — 18 с.
- Grieco G., Diella V., Chaplygina N.L., Savelyeva G.N. Platinum group elements zoning and mineralogy of chromitites from the cumulate sequence of the Nurali massif (Southern Urals, Russia) // Ore Geol. Reviews. — 2007. — V. 30. — P. 257–276. — doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.002.
- Savelyev D.E., Ankusheva N.N. Nurali ophiolite massif the Southern Urals: geological, structural and mineralogical features // Bulletin of Perm University. Geology. — 2018. — V. 18(3). — P. 230–253. — doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.228.

Zaccarini F., Pushkarev E.V., Fershtater G.B., Garuti G. Composition and mineralogy of PGE-rich chromitites in the Nurali Lherzolite-gabbro complex // *Canadian Mineralogist*. — 2004. — V. 42. — P. 545–562. — doi.org/10.2113/gscanmin. 42.2.545.

References:

Dmitrenko G.G., Gorelova E.M., Saveliya G.N. Platinum group minerals in chromites of the Nurali massif (the Southern Urals) // *Doklady Earth Sci.* 1992. V. 324. P. 403–406.

Grieco G., Diella V., Chaplygina N.L., Saveliya G.N. Platinum group elements zoning and mineralogy of chromitites from the cumulate sequence of the Nurali massif (Southern Urals, Russia) // *Ore Geol. Reviews*. 2007. V. 30. P. 257–276. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.002.

Moloshag V.P., Smirnov S.V. Platinoidnaya mineralizatsiya Nuralinskogo giperbazit-gabbrovogo massiva (Yuzhnyi Urals) [PGE mineralization of the Nurali ultramafic-gabbroic massif (the South Urals)] // *Zapiski RMO*. 1996. V. 1. P. 48–54 (in Russian).

Saveliev D.E., Ankusheva N.N. Nurali ophiolite massif (the Southern Urals): geological, structural and mineralogical features // *Bulletin of Perm University. Geology*. 2018. V. 18 (3). P. 230–253. doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.228.

Saveliev D.E., Zaykov V.V., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Kraynev Yu.D. Khromshpinelidy i aktsessornaya mineralizatsiya v khromititakh i ul'tramafitakh Nuralinskogo massiva (Yuzhnyi Urals) [Chromespinelides and accessory mineralization in chromitites and Ultramafites of the Nurali massif, Southern Urals] // *Zapiski RMO*. 2017. V. 1. P. 59–83 (in Russian).

Smirnov S.V. Petrologiya verlit-klinopiroksenit-gabbrovoy assotsiatsii Nuralinskogo giperbazitovogo massiva i svyazannoe s nim platinoidnoye orudenenie [Petrology of the wehrlite-clinopyroxenite-gabbro association of the Nurali ultrabasic massif and associated PGE mineralization]: PhD thesis syn. Ekaterinburg: IGG UB RAS, 1995. 18 p. (in Russian).

Zaccarini F., Pushkarev E.V., Fershtater G.B., Garuti G. Composition and mineralogy of PGE-rich chromitites in the Nurali Lherzolite-gabbro complex // *Canadian Mineralogist*. 2004. V. 42. P. 545–562. doi.org/10.2113/gscanmin.42.2.545.

Zaykov V.V., Melekestzeva I.Yu., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Kraynev Yu.D. Srostki mineralov EPG v Miasskoi rossypnoi zone i ikh korennye istochniki [Intergrowths of platinum group minerals from the Miass placer zone (the Southern Urals) and their primary sources] // *Mineralogiya*. 2016. V. 4. P. 31–47 (in Russian).

Сведения об авторах:

Савельев Дмитрий Евгеньевич, доктор геол.-мин. наук, профессор АНРБ, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: savl71@mail.ru

Нугуманова Язгуль Наилевна, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: jazgul-ice@yandex.ru

Гатауллин Руслан Азатович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: RusRusu4@yandex.ru

Сергеев Семен Николаевич, Федеральное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСМ РАН), г. Уфа. E-mail: semen@imsp.ru

About the author:

Saveliev Dmitry Evgenievich, doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: savl71@mail.ru

Nugumanova Yazgul Nailevna, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: jazgul-ice@yandex.ru

Gataullin Ruslan Azatovich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: RusRusu4@yandex.ru

Sergeev Semen Nikolaevich, Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, (IMSP RAS), Ufa. E-mail: semen@imsp.ru