

УДК 549.0 (234.853)

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-2

МИНЕРАЛОГИЯ ХРОМИТИТОВ ПОКЛОННОЙ ГОРЫ КАРАБАШСКОГО МАССИВА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

В.И. Попова¹, Е.В. Белогуб², М.А. Рассомахин², В.А. Попов¹, П.В. Хворов²

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,

¹Ильменский заповедник, ²Институт минералогии, г. Миасс,

Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2022 г., принята к печати 09.12.2022 г.

MINERALOGY OF CHROMITITES OF MOUNT POKLONNAYA OF THE KARABASH MASSIF, SOUTH URALS

V.I. Popova¹, E.V. Belogub², M.A. Rassomakhin², V.A. Popov¹, P.V. Khvorov²

South-Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,

¹Ilmeny State Reserve, ²Institute of Mineralogy, Miass,

Chelyabinsk region, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru

Received 28.11.2022, accepted 09.12.2022

Аннотация. Методами оптической и электронной микроскопии изучен минеральный состав хромититов и вмещающих серпентинитов, вскрытых карьером Поклонной Горы на СВ склоне Карабашского серпентинитового массива. В дополнение к ранее установленным самородному осмию и лауриту, впервые для Карабашского массива описано восемь минералов элементов платиновой группы (ЭПГ): изоферроплатина, ирарсит, иридий, налдреттит, купроиридсит, сперрилит, толовкит и эрликманит. Установлено, что ранний магматогенный хромшпинелид представлен магнезиоалюмохромитом, позднемагматические – магнезиохромитом и феррихромитом. Наиболее ранними минералами платиновой группы (МПГ) являются самородные иридий и осмий, которые замещаются сульфидами, арсенидами и стибнидами ЭПГ. С магнезиохромитом ассоциируют самородное золото, некоторые халькогениды МПГ и Ni (герсдорфит, миллерит, пентландит, хизлевудит), халькопирит. С серпентинизацией связаны хроммагнетит, магнетит, самородные железо и никель. Образование карбонатов (кальцита и доломита) и связанных с ними андрадита, галенита, брусита, сепиолита и недиагностированного силиката Ca происходило на поздних этапах серпентинизации. Вторичные минералы Ni (гаспеит, непуит, «гарниерит»), вероятно, завершали процессы минералообразования.

Ключевые слова: Южный Урал, Карабашский массив, хромшпинелиды, минералы элементов группы платины, золото, халькогениды никеля, серпентинизация.

Abstract. Mineral composition of chromitites and host serpentinites from a quarry at Mt. Poklonnaya of the Karabash serpentinite massif is studied using optical and electron microscopy. In addition to previously known native osmium and laurite, eight minerals of platinum group elements (PGE) are found: isoferroplatinum, irarsite, iridium, naldrettite, cuproiridisite, sperrillite, tolovkite and erlichmannite. It is found that magnesioalumochromite is the early magmatic Cr-spinel and magnesiochromite and ferrichromite are late magmatic. The earliest native iridium and native osmium are replaced by PGE sulfides, arsenides and stibnides. Magnesiochromite is associated with native gold, Ni chalcogenides (gersdorffite, millerite, pentlandite, heaslewoodite) and chalcopyrite. The formation of Cr-magnetite, magnetite, native iron, native nickel, galena and barite is related to serpentinization. Carbonates (calcite and dolomite), brucite, andradite, sepiolite and an unidentified Ca-silicate formed at the latest stage of serpentinization. Secondary Ni minerals (gaspeite, nepuite, «garnierite») are most likely the products of the latest mineral-forming process.

Keywords: South Urals, Karabash massif, Cr-spinel, PGE minerals, native gold, Ni chalcogenides, serpentinization.

Введение

Карабашский массив серпентинитов в современном рельефе образует субмеридиональную гряду невысоких гор (с юга на север – гг. Карабаш, Золотая, Поклонная (ранее – Лысая)) и является северным продолжением Таловского серпентинитового массива. Оба массива структурно располагаются в зоне Главного Уральского Глубинного Разлома (ГУГР). В обоих массивах выявлены проявления хромититов, которые ввиду небольших масштабов до сих пор остаются недоразведанными (Мазур и др., 1961ф; Варлаков и др., 1993, Савельев и др., 2008).

Медные руды добывались в районе Карабаша с начала XVIII в., позднее здесь стали разрабатывать россыпное, затем коренное золото; эпизодически добывались и хромиты. По данным партии треста «Уралхимруда» под руководством А.И. Ласькова, учтенные запасы хромитовых руд в Карабашских месторождениях на 1930 г. составляли ~8 тыс. т. К середине XX в. было отработано 29 месторождений с содержанием Cr_2O_3 до 30–40 мас. % во вкрапленных и до 39–50 мас. % в массивных рудах (Мазур и др., 1961ф). Отмечалось преобладание линзообразных тел хромититов протяженностью 3–40 м и мощностью 0.5–10 м, удлинённых вдоль простирания Карабашского массива. В 1990-х гг. отдельные проявления хромитов эпизодически отработывались для нужд Челябинского электрометаллургического комбината. Многочисленными исследователями отмечались находки минералов платиновой группы (МПГ) в золотоносных россыпях Миасского района, в том числе и расположенных в Карабашском районе, и ставился вопрос об их источнике (Zaykov et al., 2017, Зайков и др., 2017). Однако данных о содержании элементов платиновой группы (ЭПГ) в хромититах Карабашского массива в открытом доступе нет, а минералогия ЭПГ практически не изучена (Зайков и др., 2012).

Карабашский массив включает три линзовидных тела аподунит-апогарцбургитовых серпентинитов, залегающих среди метаморфизованных вул-

каногенно-осадочных пород (рис. 1) в зоне ГУГР. Субмеридиональная линза хромититов на северо-восточном склоне Поклонной Горы вскрыта карьером длиной ~50 м в 2005–2006 гг. в 70 м восточнее Поклонного креста с координатами $55^{\circ}47'08''$ с.ш., $60^{\circ}25'29''$ в.д. В 2019 г. в дне карьера еще сохранялась линза хромитита длиной ~7 м при «ширине» до 2 м. К 2021 г. сохранился коренной выход хромитита размером менее 1 м длиной и до 20 см шириной. Характеристика минерального состава хромититов, включая МПГ и сопутствующую минерализацию в серпентинитах, и является целью статьи.

Материалы и методы исследования

Для исследования минерального состава хромититов использовано 33 образца, отобранных из отвалов и стенок карьера в 2019 и 2021 гг. Предварительное описание выполнено с использованием стереомикроскопов МБС-10 и Stemi CZ (В.И. Попова, В.А. Попов, М.А. Рассомахин). Для оптико-микроскопического изучения (AxioScope A.1, Е.В. Белогуб) изготовлено 20 аншлифов и два шлифа. Для получения тяжелого концентрата отобраны пробы из вкрапленных руд (~40 кг) и массивных хромититов (~70 кг). Из проб после дробления до –1 мм получен тяжелый концентрат путем отмычки в воде и доводки в бромформе. Из тяжелого концентрата под стереомикроскопом извлечены зерна МПГ, из которых после предварительного изучения морфологии изготовлены полированные препараты. Химический состав минералов определен при помощи СЭМ Tescan Vega3 с ЭДС Oxford Instrument X-act, при ускоряющем напряжении 20 кВ и времени набора 120 с (М.А. Рассомахин), микрзерна некоторых минералов диагностированы по ЭД-спектрам. Для хромшпинелидов и серпентинитов получены рентгенограммы (дифрактометр Shimadzu XRD-6000, Cu-анод, графитовый монокроматор, П.В. Хворов). Химический состав вмещающих пород определен классическим методом «мокрой» химии для двух штучных проб (М.Н. Маляренко,

Для цитирования: Попова В.И., Белогуб Е.В., Рассомахин М.А., Попов В.А., Хворов П.В. Минералогия хромититов Поклонной горы Карабашского массива на Южном Урале. Минералогия, 8(4), 15–33. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-2

For citation: Popova V.I., Belogub E.V., Rassomakhin M.A., Popov V.A., Khvorov P.V. Mineralogy of chromitites of mount Poklonnaya of the Karabash massif, South Urals. Mineralogy, 8(4), 15–33. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-2.

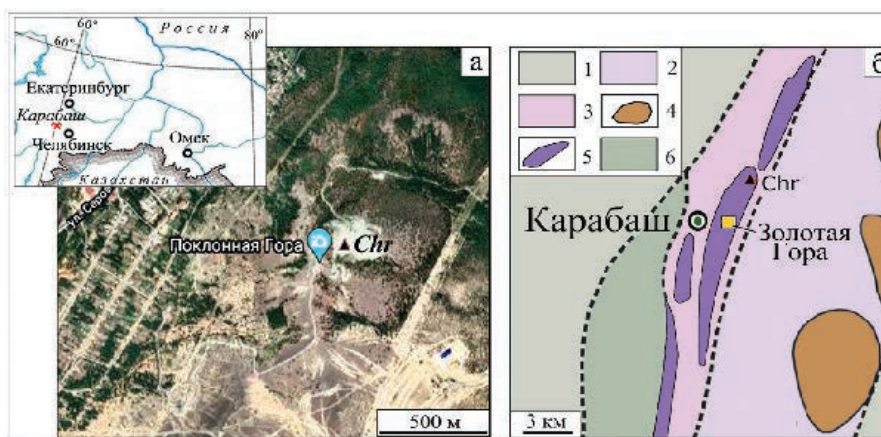


Рис. 1. Географическое положение хромитового карьера (Chr) на Поклонной Горе Карабашского массива (а) и геологическая схема района месторождения Золотая Гора (б).

1 – допалеозойские метаморфические породы зоны Уралтау, Уфалейский блок; 2 – допалеозойские метаморфические породы ильмено-вишневогорского комплекса; 3 – палеозойские вулканогенно-осадочные породы зоны ГУГР (O₂); 4 – диориты, плагиограниты, гранодиориты (O₂); 5 – метагипербазиты дунит-гарцбургитовой формации (O₂); 6 – метагипербазиты дунит-верлит-клинопироксенит-габбровой формации (O₃). Схема по Г.Г. Кораблёву и В.И. Ленных (Белогуб и др., 2003), с изменениями.

Fig. 1. Geographical position of chromite quarry (Chr) on Mt. Poklonnaya of the Karabash massif (a) and geological scheme of the Zolotaya Gora deposit (b).

1 – Pre-Paleozoic metamorphic rocks of the Uraltau Zone, Ufaley block; 2 – Pre-Paleozoic metamorphic rocks of the Ilmeny-Vishnevogorsk complex; 3 – Paleozoic volcanosedimentary rocks of the Main Uralian Fault Zone (Middle Ordovician); 4 – diorite, plagiogranite, granodiorite (Middle Ordovician); 5 – metaultramafic rocks of dunite-harzburgite association (Middle Ordovician); 6 – metaultramafic rocks of dunite-wehrlite-clinopyroxenite-gabbro association (Upper Ordovician). Scheme was composed by G.G. Korablev and V.I. Lennykh, modified after (Belogub et al., 2003).

Т.В. Семенова). Все аналитические работы выполнены в Институте минералогии ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН. Фотографии всех полированных препаратов, использованных в работе, приведены в электронном приложении (ЭП) 1, фотографии в обратно-рассеянных электронах (BSE), не вошедшие в статью, – в ЭП 2.

После общего описания породообразующих минералов вмещающих пород и хромититов, в статье приведена характеристика второстепенных и редких минералов в соответствии с минералогической классификацией, внутри классов – в алфавитном порядке. Неноменклатурные разновидности минералов при первом упоминании даны курсивом (Кривовичев, 2021). Разновидности хромита даны по (Павлов, Григорьева-Чупрынина, 1973; Флейшер, 1990). На рисунках использованы следующие аббревиатуры: Brs – брусит, Ca – кальцит, Chr – хромит (все разновидности), Chl – клинохлор, Dol – доломит, Erl – эрликманнит, Grs – герсдорфит, Irs – ирарсит, Mil – миллерит, Mt – магнетит (включая хроммагнетит), Os – осмий, Srp – серпентин.

Результаты исследования

Главные минералы серпентинитов и хромититов

Серпентиниты, вмещающие хромитовую линзу, в основном серовато-зеленые различных оттенков, встречаются коричневатые и белые разновидности. Серпентиниты массивные, иногда пятнистые за счет включений хромшпинелидов и магнетита (рис. 2а), часто рассланцованы. В серпентинитах присутствуют серпентин-карбонатные, карбонатные и хлоритовые прожилки различной мощности (рис. 2б, рис. 3). В карьере среди рассланцованных серпентинитов встречены редкие будины темно-зеленых плотных массивных пород. В одной из будин сохранился контакт серпентинита с массивным хромититом, вблизи которого в серпентините развиты единичные кристаллы доломита (рис. 2в). Химический состав массивных серпентинитов соответствует дуниту (табл. 1), в минеральном составе абсолютно преобладает пластинчатый антигорит и присутствуют прожилки хлорита (рис. 3). В отвале карьера обнаружена деформиро-

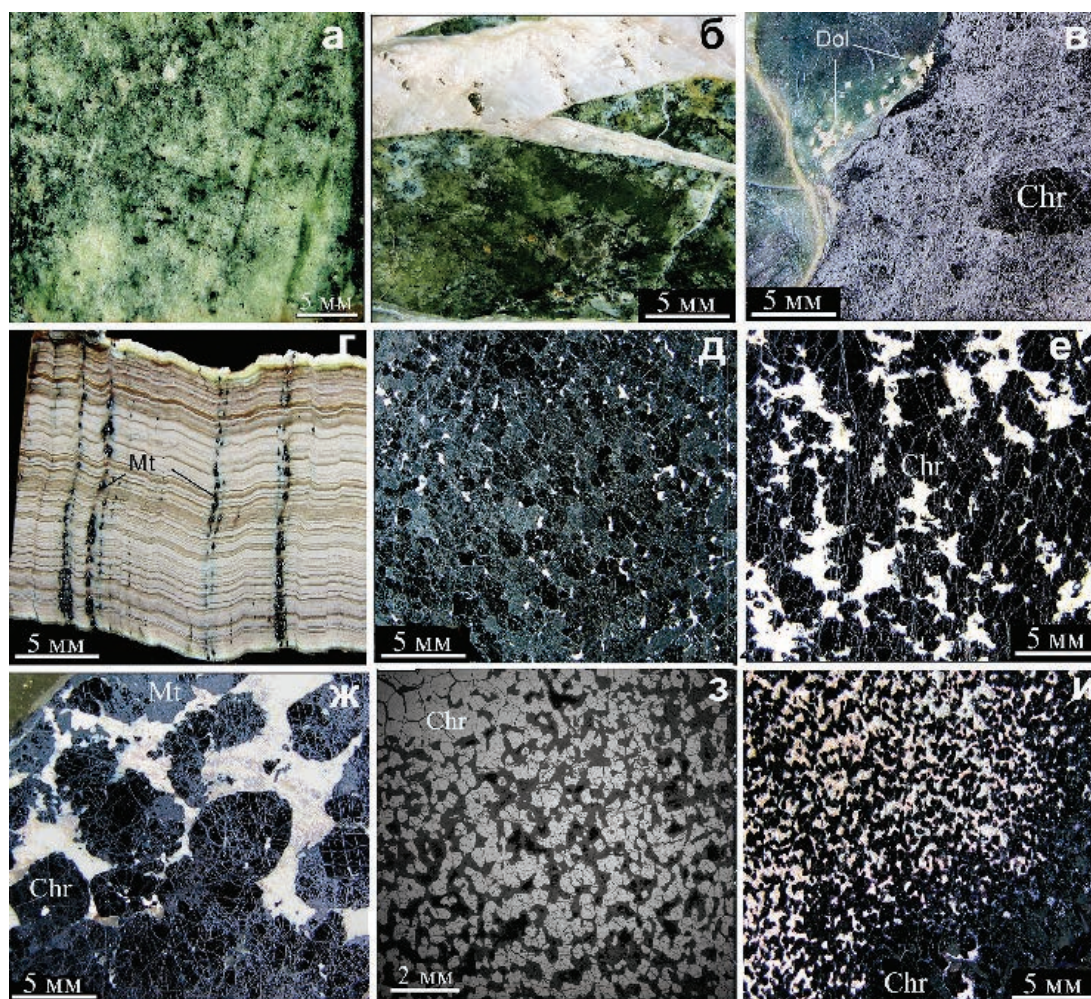


Рис. 2. Текстуры и структуры серпентинитов (а-г) и хромититов: а – массивный серпентинит с вкрапленностью магнетита; б – серпентин-карбонатный прожилок в серпентините; в – контакт массивного хромитита с серпентинитом; г – деформированный прожилок антигорита с магнетитом; д-и – хромититы: д – массивный, е – неравномерно-вкрапленный, ж – нодулярный, з – равномерно-вкрапленный, и – переход массивного во вкрапленный.

а-ж, и – макрофото, з – BSE-фото.

Fig. 2. Structures and textures of serpentinites (a-g) and chromitites: а – massive serpentinite with disseminated magnetite; б – serpentine-carbonate veinlet in serpentinite; в – contact of serpentinite with massive chromitite; г – deformed vein of antigorite with magnetite; д-и – chromitites: д – massive, е – unevenly disseminated, ж – nodular, з – evenly disseminated, и – transition of massive to disseminated chromite.

а-ж, и – macrophoto, з – BSE-image.

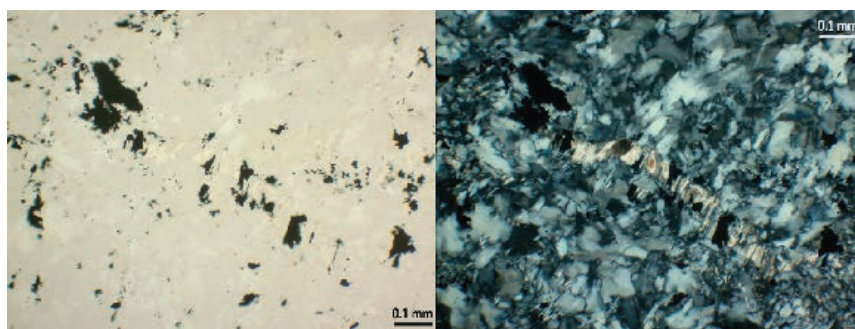


Рис. 3. Аподунитовый серпентинит: агрегат антигорита с включениями магнетита и прожилком хлорита. Проходящий свет. Слева – без анализатора, справа – с анализатором.

Fig. 3. Serpentine after dunite: antigorite aggregate with magnetite inclusion and chlorite vein. Transmitted light. Left – without analyzer, right – with analyzer.

Химический состав аподунитового серпентинита из хромитового карьера Поклонной Горы (мас. %) Таблица 1
Chemical composition of serpentinite after dunite from chromite quarry of Mt. Poklonnaya (wt. %) Table 1

№ п/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O [*]	ппп	CO ₂	Сумма
1	42.81	<0.05	0.79	1.57	41.62	0.30	0.03	0.07	0.01	0.03	<0.10	12.44	<0.10	99.67
2	37.83	<0.05	0.94	7.90	38.28	2.42	0.11	0.37	0.02	<0.01	0.15	11.68	0.70	99.70

Примечание. Содержание P₂O₅ < 0.05 мас. %.

Note. The P₂O₅ content is < 0.05 wt. %.

Химический состав минералов группы серпентина (1–6) и хлорита (7–9) (мас. %) Таблица 2
Chemical composition of minerals of the serpentine (1–6) and chlorite (7–9) groups (wt. %) Table 2

№ ан.	MgO	FeO	NiO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O*	Сумма
1	39.82	3.87	—	—	1.99	40.30	12.61	98.59
2	41.35	1.72	—	0.59	1.09	42.30	12.84	99.89
3	39.19	4.78	—	2.17	4.06	37.11	12.68	99.99
4	38.92	4.76	—	2.07	3.41	36.84	12.47	98.47
5	41.32	1.47	—	0.61	0.73	41.93	12.71	98.77
6	40.38	1.71	0.32	1.23	1.89	40.72	12.68	98.93
7	36.37	1.31	—	1.41	13.34	33.90	12.70	99.03
8	35.41	0.29	—	6.79	10.35	33.26	13.80	99.90
9	35.59	0.59	—	5.01	13.95	31.78	12.68	99.70
№ ан.	Эмпирические формулы, Σ _{катионов} = 10							
1	(Mg _{5.64} Fe _{0.31} Al _{0.05})Σ _{6.0} (Si _{3.83} Al _{0.17})Σ _{4.0} O ₁₀ (OH) ₈							
2	(Mg _{5.75} Fe _{0.13} Al _{0.07} Cr _{0.04})Σ _{5.99} (Si _{3.95} Al _{0.05})Σ _{4.0} O ₁₀ (OH) ₈							
3	(Mg _{5.50} Fe _{0.34} Cr _{0.16})Σ _{6.0} (Si _{3.50} Al _{0.46} Fe ³⁺ _{0.04})Σ _{4.0} O ₅ (OH) ₄							
4	(Mg _{5.58} Fe _{0.26} Cr _{0.16})Σ _{6.00} (Si _{3.54} Al _{0.38} Fe ³⁺ _{0.08})Σ _{4.0} O ₅ (OH) ₄							
5	(Mg _{5.80} Fe _{0.12} Cr _{0.05} Al _{0.03})Σ _{6.0} (Si _{3.95} Al _{0.05})Σ _{4.0} O ₁₀ (OH) ₈							
6	(Mg _{5.69} Fe _{0.14} Cr _{0.09} Al _{0.06} Ni _{0.02})Σ _{6.0} (Si _{3.85} Al _{0.15})Σ _{4.0} O ₁₀ (OH) ₈							
7	Mg ₅ (Al _{0.68} Cr _{0.11} Mg _{0.11} Fe _{0.10})Σ _{1.00} [(Al _{0.80} Si _{3.20} O ₁₀](OH) ₈							
8	Mg ₅ (Cr _{0.52} Al _{0.37} Mg _{0.08} Fe _{0.02})Σ _{0.99} [(Al _{0.80} Si _{3.20} O ₁₀](OH) ₈							
9	Mg ₅ (Al _{0.56} Cr _{0.38} Fe _{0.04} Mg _{0.02})Σ _{1.00} [(AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₈							

Примечание. H₂O* рассчитано по стехиометрии. Прочерк — компонент не обнаружен.

Note: H₂O* is calculated by stoichiometry. Dash — not detected

ванная жила мощностью около 2 см, состоящая из около 140 тонких нерегулярно чередующихся белых, светло-коричневых и коричневых зон антигорита с секущими поперечными жилками тонкозернистого магнетита (рис. 2г) и единичными микро-включениями брусита и галенита. В серпентинитах незначительно развито ожелезнение по трещинам.

В минеральном составе серпентинитов Карабашского массива и Поклонной Горы ранее опико-микроскопическими методами были установлены преобладающий **антигорит** и более редкие **лизардит** и **хризотил** (Мазур и др., 1961ф, Варлаков, 1993; Спиридонов, Плетнев, 2002; Бажин и др., 2010). По составу минералы группы серпентина различаются содержаниями Al₂O₃, FeO, Cr₂O₃ и NiO, что послужило основанием для условного

отнесения серпентина к определенному минеральному виду. Минимальное количество примесей свойственно антигориту (табл. 2, ан. 1, 2), максимальное количество железа и хрома предполагается для хризотила (табл. 2, ан. 3, 4). Главные отражения рентгенограммы антигорита (ЭП 1, обр. 2): (d, Å; I, %): 7.305 (100) и 3.634 (82). Для лизардита и хризотила характерно смещение первого базального отражения в малоугловую область до 7.33 Å (ЭП 1, обр. 12).

Хлорит развит, преимущественно, в интерстициях хромшпинелидов в массивных хромититах, где он образует агрегаты с серпентином. Реже хлорит образует прожилки и включения в серпентините (рис. 2, ЭП 1, обр. 3–6, 9–11, 13, 17). Химический состав хлорита соответствует **клинохлору**

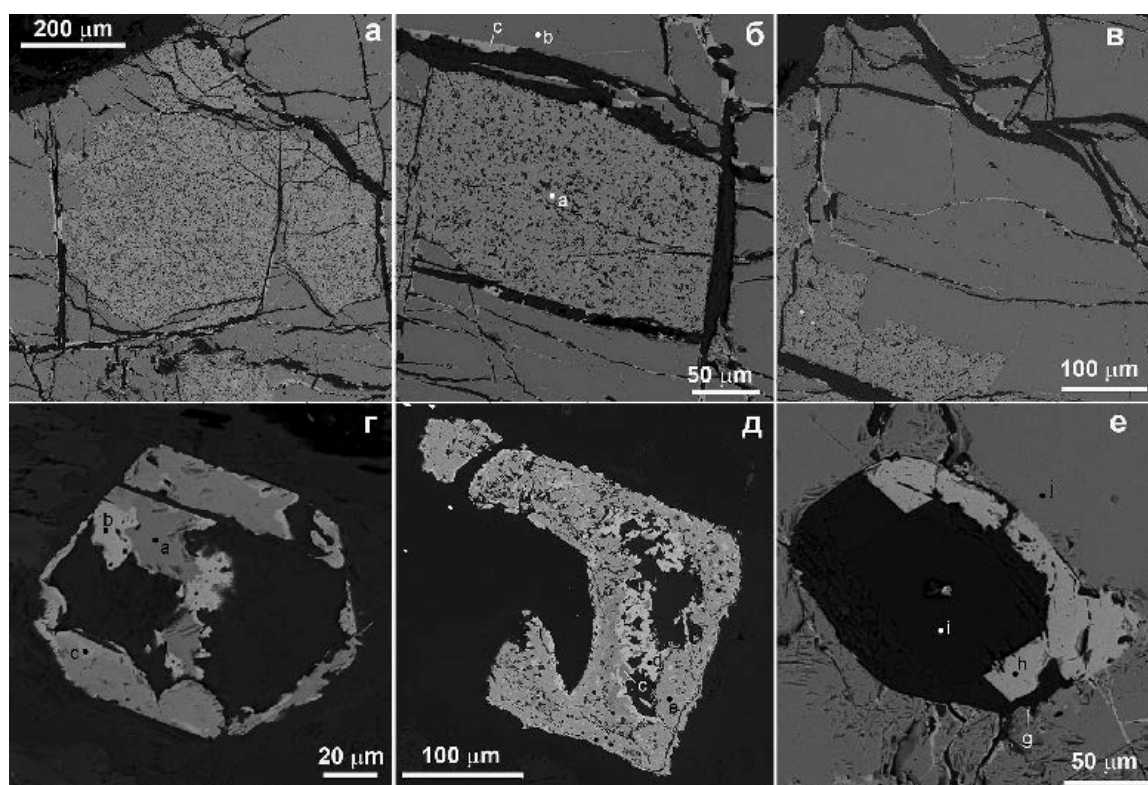


Рис. 4. Морфологические разновидности хромшпинелидов: а–в – массивный хромит-1 и пористый хромит-2 в массивных хромититах; г – скелетный кристалл хромита-1 (а), замещаемый хромитом-2 (с) и хроммагнетитом (б), в хлорит-серпентиновом агрегате; д – скелетный кристалл хромита-1 (с), замещенный хромитом-2 (е) и хроммагнетитом (г); е – кристаллы хроммагнетита (h), растущие во включении серпентина (i) в массивном хромите-1 (j) с включением лаурита (g).

Здесь и далее: буквы в скобках – точка анализа.

Fig. 4. Types of Cr-spinels: а–в – massive chromite-1 and porous chromite-2 in massive chromitite; г – skeletal chromite-1 crystal (a) replaced by chromite-2 (c) and Cr-magnetite (b) in chlorite-serpentine aggregate; д – skeletal chromite-1 crystal (c) replaced by chromite-2 (e) and Cr-magnetite (g); е – Cr-magnetite crystals (h) in serpentine inclusion (i) in massive chromite-1 (j) with laurite inclusion (g).

Hereinafter: letters in parentheses – analytical point.

$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ и характеризуется небольшими примесями FeO и Cr_2O_3 (табл. 2, ан. 8, 10). Розовато-фиолетовый кеммерерит с содержанием Cr_2O_3 6.79 мас. % (табл. 2, ан. 9) встречается в виде тонкой просечки в хромитите.

Хромититы характеризуются разнообразными текстурами, среди которых преобладают массивная (рис. 2д), пятнистая и неясно-полосчатая (рис. 2е), встречается нодулярная (рис. 2ж), равномерная густо-вкрапленная (рис. 2з). Хромшпинелиды занимают 30–70 % площади сечений исследованных образцов. Массивные и вкрапленные хромититы могут постепенно переходить друг в друга (рис. 2и). Структура массивных хромититов разнотекстурированная, гипидиоморфнотекстурированная, образована зернами хромшпинелидов размером от

1–2 мм до 5–20 мм, интерстиции которых заполнены преимущественно минералами группы серпентина и клинохлором и в меньшей степени карбонатами (кальцитом, доломитом). Редко встречаются Cr-содержащий клинохлор (кеммерерит), Ni-содержащий серпентин (непуит), андрадит, брусит, а также редкие карбонаты и сульфаты Ni и гидроксиды Fe.

В массивных хромититах выделяется две морфологические разновидности хромшпинелида – плотный хромит-1 и пористый хромит-2 (рис. 4). Взаимоотношения между ними не всегда однозначны (рис. 4а, б), однако иногда хромит-2 замещает хромит-1 (рис. 4в). Обе разновидности замещаются хроммагнетитом по трещинам и контактам между зернами (рис. 4б, в). С хромитом-2 и хроммагнети-

том часто ассоциирует хлорит (ЭП 2). К контактам зерен хромита-1 и хромита-2, хромита-1 и хроммагнетита, хромита и силикатных минералов приурочены редкие включения сульфидов Ni, Cu и ЭПГ. В трещинах в хромите в ассоциации с серпентином встречаются самородные железо и никель. Единичное включение самородного золота обнаружено в хромите-2.

Вкрапленные хромититы содержат субгедральные, иногда скелетные кристаллы хромита-1, частично (рис. 4г) или полностью (рис. 4д) замещенные хромитом-2 и хроммагнетитом. Хроммагнетит может образовывать, помимо псевдоморфоз по хромиту, собственные идиоморфные кристаллы (рис. 4е).

Химический состав хромита-1 соответствует **алюмохромиту** (магнезиоалюмохромиту, #Mg 0.70–0.77, #Cr 0.68–0.75), хромита-2 – **магнезиохромиту** (#Mg 0.67–0.71, #Cr 0.83–89) и **феррихромиту** (#Mg 0.63–0.45, #Cr 0.97–1.00). Содержания Al_2O_3 закономерно снижаются от магнезиоалюмохромита к феррихромиту, при этом возрастают магнезиальность и хромистость. В магнезиоалюмохромите иногда присутствуют незначительные примеси MnO, ZnO и SiO_2 , в магнезиохромите – SiO_2 , в феррихромите – SiO_2 , TiO_2 , ZnO, NiO и MnO (табл. 2). Для хроммагнетита характерны примеси MgO и NiO, редко – Al_2O_3 , для магнетита – Cr_2O_3 , MgO, MnO. Результаты анализов и эмпирические формулы хромшпинелидов и магнетита приведены в таблице 3.

Редкие минералы хромититов и серпентинитов

Простые элементы выявлены в виде редких мелких включений или тонких жилок в хромшпинелидах, а также в тяжелом концентрате, полученном из сплошных и вкрапленных хромититов.

Самородные железо и никель в ассоциации с серпентином выявлены в тонких жилках, секущих магнезиоалюмохромит (рис. 5а), частично замещенный магнезиохромитом и хроммагнетитом. Размеры выделений самородных металлов не превышают первых микрометров. Микрозерна самородного никеля выявлены также в тяжелом концентрате. Состав самородного железа (мас. %): Fe 94.81, Cr 4.19, Mn 0.79, Σ 99.79, отвечает формуле $Fe_{0.95}Cr_{0.04}Mn_{0.01}$. Самородный никель содержит (мас. %) Ni 93.23, Cr 2.71, Fe 2.50, Zn 0.98 (Σ 99.42), эмпирическая формула $Ni_{0.93}Cr_{0.03}Fe_{0.03}Zn_{0.01}$.

Самородное золото размером ~4.5 мкм (рис. 5б) встречено в виде единичного включения в магнезиохромите из нодулярного хромитита (ЭП 1, препарат 6). Примеси в его составе не обнаружены.

Самородные платиноиды в виде отдельных мелких зерен или сростков выявлены только в тяжелом концентрате. **Сплав Pt-Fe**, состав которого соответствует **изоферроплатине** Pt_3Fe , найден в виде единичного зерна размером 200 мкм (рис. 5в) в тяжелом концентрате из вкрапленных руд. Состав сплава (мас. %): Pt 90.17, Pd 1.0, Fe 8.83, Σ = 99.42 соответствует формуле $(Pt_{2.94}Pd_{0.06})_{3.00}Fe_{1.00}$.

Самородный иридий с существенной примесью осмия (осмирид, невянскийит) составляет центральную часть свободного зерна (рис. 5г) с краевыми зонами самородного осмия, каймой ирарсита и микровключениями купроиридита и толовкита. Также самородный иридий (рис. 5е) встречен в центральной зоне зерна самородного осмия в сростке с купроиридситом, толовкитом, ирарситом и эрликманитом. Химический состав обоих зерен самородного иридия близок (мас. %): Ir 63.11–63.59; Os 35.30–35.16; Ru 1.20–1.02; Fe 0.23–0.17; Σ 99.84–99.94, формулы $Ir_{0.62}Os_{0.35}Ru_{0.02}Fe_{0.01}$ и $Ir_{0.63}Os_{0.35}Ru_{0.02}Fe_{0.01}$, соответственно.

Самородный осмий с примесью иридия (иридосмин, сысертскит) образует краевую зону вокруг самородного иридия (рис. 5г), характеризуется составом (мас. %): Os 51.17, Ir 45.99, Fe 1.56, Ni 0.79, Ru 0.46, Σ 99.97 с формулой $Os_{0.49}Ir_{0.43}Fe_{0.05}Ni_{0.02}Ru_{0.01}$. Другое зерно самородного осмия (рис. 5д, е) образует волокнистым агрегатом эрликманита с «коркой» ирарсита и толовкита (рис. 5е). Состав самородного осмия из этого агрегата (рис. 5е) (мас. %): Os 55.73, Ir 43.09, Ru 0.96, Fe 0.23, Σ 100.01, формула $Os_{0.55}Ir_{0.42}Ru_{0.02}Fe_{0.01}$.

Халькогениды цветных металлов и ЭПГ представлены сульфидами, сульфоарсенидами, стибнидами и встречены в виде редких мелких и тонких включений в хромшпинелидах, преимущественно, на контакте зерен хромшпинелидов, на контакте хромита с силикатами, а также в серпентине, хлорите, редко – в агрегатах карбонатов с хлоритом или серпентином.

Галенит PbS в тонком сростке с баритом диагностирован по ЭД-спектру в агрегате магнетита из тонкозональной жилы серпентина (ЭП 1, обр. 2) (рис. 6).

Герсдорфит NiAsS образует тонкие включения размером до 2 мкм в миллерите, иногда в виде

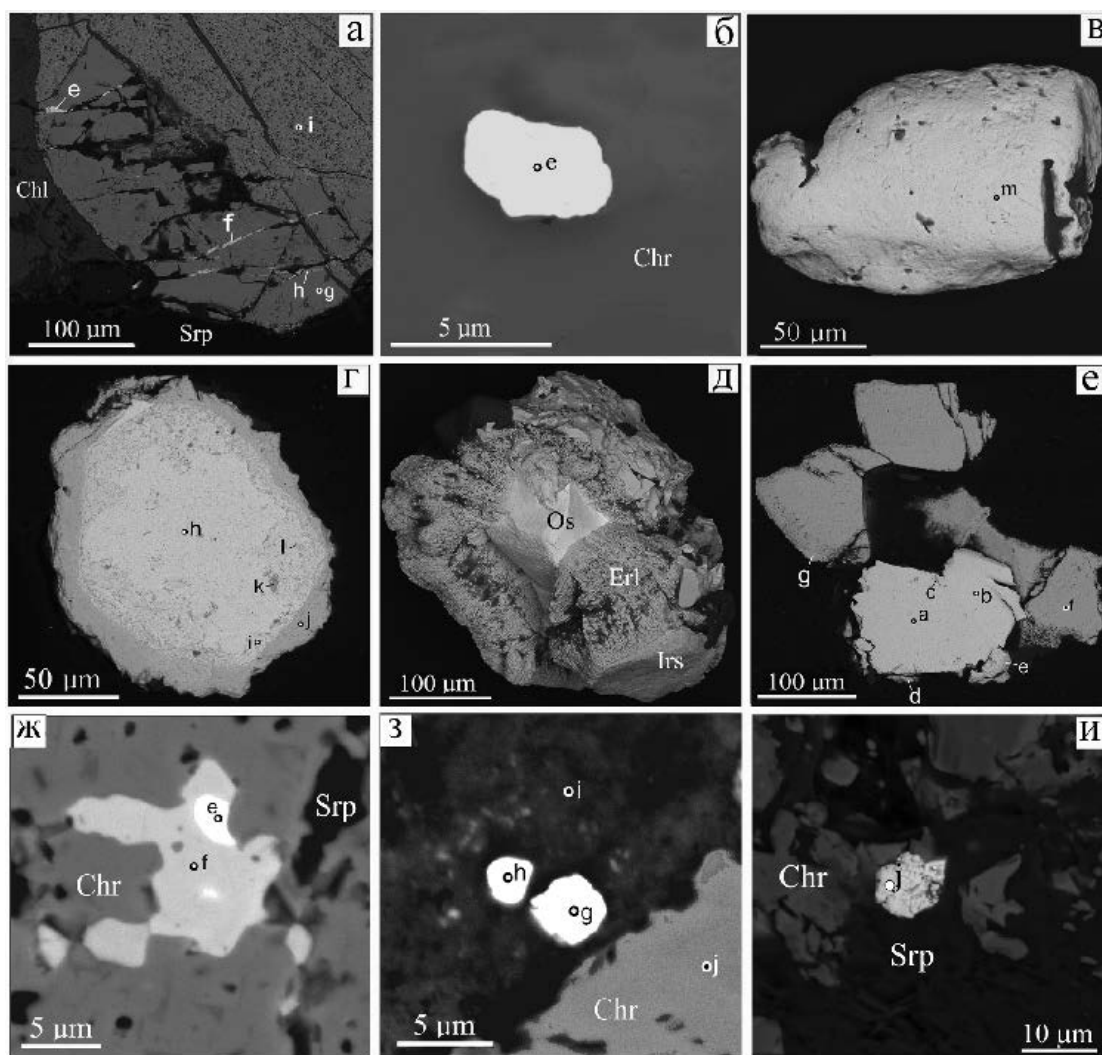


Рис. 5. Морфология самородных металлов и минералов благородных металлов: а – прожилки самородных железа (f) и никеля (e) в магнезиохромите (g); б – самородное золото (точка e в магнезиохромите (Chr)); в – изоферроплатина (m); г – иридий (h) с краевыми зонами самородного осмия (i), каймой ирарсита (j) и включениями купроиридсита (k) и толовкита (l); д – агрегат самородного осмия (Os), эрликманита (Erl) и ирарсита (Irs); е – сечение агрегата (д) с самородными иридием (a) и осмием (b), купроиридситом (c), толовкитом (d), ирарситом (e, g) и эрликманитом (f); ж – лаурит (e) и миллерит (f) в магнезиохромите; з – эрликманит (h) и ирарсит (g) в серпентине с карбонатами (i); и – эрликманит (j) на контакте магнезиохромита и серпентина.

Здесь и на рис. 8–11, BSE-фото.

Fig. 5. Morphology of native metals and precious metal minerals: a – veins of native iron (f) and native nickel (e) in magnesiochromite (g); б – native gold (e); в – isoferroplatinum (m); г – native iridium (h) with marginal zones of native osmium (i), rim of irarsite (j) and inclusions cuproiridsite (k) and tolovkite (l); д – native osmium aggregate with erlichmanite and irarsite intergrowths; е – section of the aggregate (д) with native iridium (a), native osmium (b), cuproiridsite (c), tolovkite (d), irarsite (e, g) and erlichmanite (f); ж – laurite (e) and millerite (f) in magnesiochromite; з – erlichmanite (h) and irarsite (g) in serpentine with carbonates (i); и – erlichmanite (j) at the contact of magnesiochromite and serpentine.

Here and in Figs. 8–11 – BSE-photo.

«цепочек» по зоне роста (рис. 7), изредка ассоциирует с халькопиритом (рис. 9б). Диагностирован по ЭД-спектру (рис. 9б).

Ирарсит IrAsS встречен в виде кайм мощностью до 20 мкм вокруг зональных зерен само-

родных иридия и осмия, извлеченных в тяжелый концентрат (рис. 5г–е), а также в виде тонких выделений в карбонат-хлоритовом (рис. 5з) и серпентин-хлоритовом агрегатах. В составе ирарсита присутствуют Ru, Ni, Sb, Cr, Rh (табл. 4, ан. 1–5).

Таблица 3

Table 3

Химический состав хромшпиннелидов и магнетита (мас. %)

Chemical compositions of Cr-spinels and magnetite (wt. %)

№ п/п	№ обр. (прил. 1)	MgO	FeO*	MnO	ZnO	NiO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Сумма	Формулы, Σ катионов = 3
Магнезиоаломохромит											
1	1	15.20	16.02	2.93	1.63	—	43.81	19.72	0.11	99.81	(Mg _{0.70} Fe _{0.19} Mn _{0.08} Zn _{0.04}) _{Σ1.01} (Cr _{1.07} Al _{0.72} Fe ³⁺ _{0.20} Y _{0.01}) _{Σ2.0} O ₄
2	3	15.09	13.91	—	—	—	55.72	14.46	—	99.18	(Mg _{0.71} Fe _{0.29}) _{Σ1.0} (Cr _{1.39} Al _{0.54} Fe ³⁺ _{0.07}) _{Σ2.0} O ₄
3	3	14.61	13.21	—	—	—	56.72	14.58	—	99.12	(Mg _{0.69} Fe _{0.30}) _{Σ0.99} (Cr _{1.42} Al _{0.51} Fe ³⁺ _{0.04}) _{Σ2.0} O ₄
4	7	15.92	12.38	—	—	—	57.73	13.28	—	99.31	(Mg _{0.75} Fe _{0.25}) _{Σ1.00} (Cr _{1.37} Al _{0.49} Fe ³⁺ _{0.07}) _{Σ2.0} O ₄
5	15	14.92	12.86	1.29	—	—	57.36	13.58	—	100.01	(Mg _{0.70} Fe _{0.27} Mn _{0.03}) _{Σ1.0} (Cr _{1.43} Al _{0.50} Fe ³⁺ _{0.06}) _{Σ1.99} O ₄
6	16	16.61	12.34	—	—	—	55.43	14.82	—	99.20	(Mg _{0.77} Fe _{0.23}) _{Σ1.0} (Cr _{1.37} Al _{0.55} Fe ³⁺ _{0.08}) _{Σ2.0} O ₄
Магнезиохромит											
7	2	13.48	12.48	—	—	—	69.83	3.83	—	99.62	(Mg _{0.67} Fe _{0.33}) _{Σ1.00} (Cr _{1.84} Al _{0.15} Fe ³⁺ _{0.01}) _{Σ2.0} O ₄
8	5	13.59	14.05	—	—	—	70.21	1.65	—	99.50	(Mg _{0.68} Fe _{0.33}) _{Σ1.01} (Cr _{1.87} Al _{0.07} Fe ³⁺ _{0.06}) _{Σ2.0} O ₄
9	5	15.35	10.90	—	—	—	65.08	7.90	0.23	99.46	(Mg _{0.74} Fe _{0.26}) _{Σ1.00} (Cr _{1.66} Al _{0.30} Fe ³⁺ _{0.03}) _{Σ1.99} O ₄
10	6	13.49	16.12	—	—	—	68.69	0.93	—	99.23	(Mg _{0.68} Fe _{0.32}) _{Σ1.00} (Cr _{1.84} Fe ³⁺ _{0.12} Al _{0.04}) _{Σ2.0} O ₄
11	10	13.91	11.76	—	—	—	72.40	1.18	0.14	99.60	(Mg _{0.70} Fe _{0.30}) _{Σ1.00} (Cr _{1.92} Al _{0.05} Fe ³⁺ _{0.01} Ti _{0.01} Si _{0.01}) _{Σ2.0} O ₄
12	9	12.59	15.46	—	—	—	67.56	3.68	—	99.29	(Mg _{0.63} Fe _{0.37}) _{Σ1.00} (Cr _{1.79} Al _{0.15} Fe ³⁺ _{0.06}) _{Σ2.0} O ₄
Феррихромит											
13	8	5.98	46.16	6.19	0.74	0.55	36.19	0.64	0.18	96.63	(Fe _{0.43} Mg _{0.33} Mn _{0.20} Zn _{0.02} Ni _{0.02}) _{Σ1.0} (Cr _{1.07} Fe ³⁺ _{0.90} Al _{0.03}) _{Σ2.0} O ₄
14	11	6.13	45.39	6.54	0.68	0.33	36.72	—	0.23	96.02	(Fe _{0.42} Mg _{0.34} Mn _{0.21} Zn _{0.02} Ni _{0.01}) _{Σ0.90} (Cr _{1.09} Fe ³⁺ _{0.81}) _{Σ2.0} O ₄
15	13	6.49	48.23	—	—	0.84	39.81	1.00	0.18	96.55	(Fe _{0.64} Mg _{0.35}) _{Σ0.99} (Cr _{1.14} Fe ³⁺ _{0.82} Al _{0.04}) _{Σ2.0} O ₄
16	15	7.99	40.83	2.25	—	—	45.50	1.64	—	98.21	(Fe _{0.58} Mg _{0.42}) _{Σ1.0} (Cr _{1.28} Fe ³⁺ _{0.57} Al _{0.07} Mn _{0.07}) _{Σ1.99} O ₄
Хроммагнетит											
17	4	6.28	63.91	—	—	1.50	22.92	0.34	0.08	95.03	(Fe _{0.59} Mg _{0.37} Ni _{0.04}) _{Σ1.00} (Fe ³⁺ _{1.23} Cr _{0.76} Si _{0.01}) _{Σ2.0} O ₄
18	5	6.64	62.32	—	—	1.22	24.27	0.47	—	95.11	(Fe _{0.59} Mg _{0.36} Ni _{0.05}) _{Σ1.00} (Fe ³⁺ _{1.30} Cr _{0.69} Al _{0.02}) _{Σ2.0} O ₄
19	6	5.53	66.02	—	—	1.31	21.82	—	—	94.68	(Fe _{0.59} Mg _{0.37} Ni _{0.04}) _{Σ1.00} (Fe ³⁺ _{1.24} Cr _{0.73} Al _{0.02} Ti _{0.01}) _{Σ2.0} O ₄
20	7	6.26	64.12	—	—	0.88	23.57	—	0.06	94.89	(Fe _{0.63} Mg _{0.32} Ni _{0.04}) _{Σ0.99} (Fe ³⁺ _{1.34} Cr _{0.66}) _{Σ2.0} O ₄
21	9	6.62	61.48	—	—	1.23	25.47	—	0.18	94.98	(Fe _{0.62} Mg _{0.36} Ni _{0.03}) _{Σ1.01} (Fe ³⁺ _{1.29} Cr _{0.71}) _{Σ2.0} O ₄
22	14	5.25	65.48	—	—	1.09	22.92	—	—	94.74	(Fe _{0.68} Mg _{0.29} Ni _{0.03}) _{Σ1.00} (Fe ³⁺ _{1.33} Cr _{0.67}) _{Σ2.0} O ₄
Магнетит											
23	1	2.72	87.34	—	—	1.09	1.42	—	—	92.57	(Fe _{0.80} Mg _{0.16} Ni _{0.04}) _{Σ1.00} (Fe ³⁺ _{1.95} Cr _{0.05}) _{Σ2.0} O ₄
24	2	2.04	88.68	0.55	—	1.16	—	—	—	92.43	(Fe _{0.82} Mg _{0.12} Ni _{0.04} Mn _{0.02}) _{Σ1.00} Fe ³⁺ _{2.00} O ₄
25	11	2.86	87.49	0.44	—	1.00	1.26	—	0.14	93.19	Fe _{0.78} Mg _{0.17} Ni _{0.03} Mn _{0.02}) _{Σ1.00} (Fe ³⁺ _{1.96} Cr _{0.04}) _{Σ2.0} O ₄
26	12	3.16	88.28	0.51	—	0.91	0.35	—	—	93.21	(Fe _{0.79} Mg _{0.18} Ni _{0.03} Mn _{0.02}) _{Σ1.02} (Fe ³⁺ ₂ Cr _{0.10}) _{Σ2.0} O ₄
27	12	3.49	83.35	1.02	—	1.35	3.55	—	—	92.76	(Fe _{0.73} Mg _{0.20} Ni _{0.04} Mn _{0.03}) _{Σ1.0} (Fe ³⁺ _{1.89} Cr _{0.11}) _{Σ2.0} O ₄
28	15	2.39	81.14	—	—	1.24	10.01	—	—	94.78	(Fe _{0.82} Mg _{0.14} Ni _{0.04}) _{Σ1.00} (Fe ³⁺ _{1.69} Cr _{0.31}) _{Σ2.0} O ₄

Примечание. В анализах дополнительно определены (мас. %): TiO₂ 0.21 (ан. 11) и 0.19 (ан. 19); V₂O₅ 0.39 (ан. 1). Количество Fe³⁺ в формулах рассчитано по стехиометрии.

Note. The analysis also contain (wt. %): TiO₂ 0.21 (an. 11) and 0.19 (an. 19); V₂O₅ 0.39 (an. 1). The Fe³⁺ amount in formulas is calculated by stoichiometry.

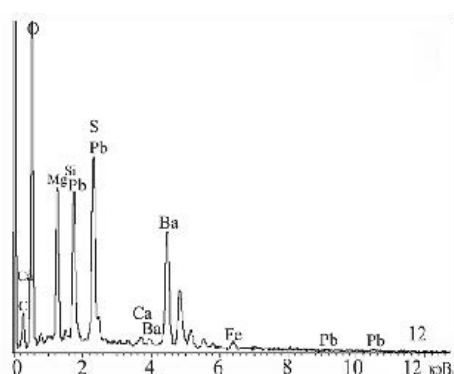


Рис. 6. ЭД-спектр галенита с баритом в серпентине.

Fig. 6. ED-spectrum of galena with barite in serpentine.

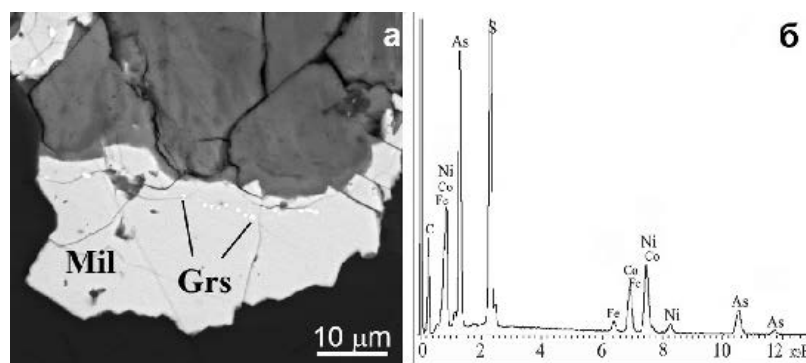


Рис. 7. Включения герсдорфита в миллерите, частично замещенном «гарниеритом», в серпентините: а – BSE-фото; б – ЭД-спектр герсдорфита.

Fig. 7. Inclusions of gersdorffite in millerite partly replaced by «garnierite» in serpentine: а – BSE-photo; б – ED-spectrum of gersdorffite.

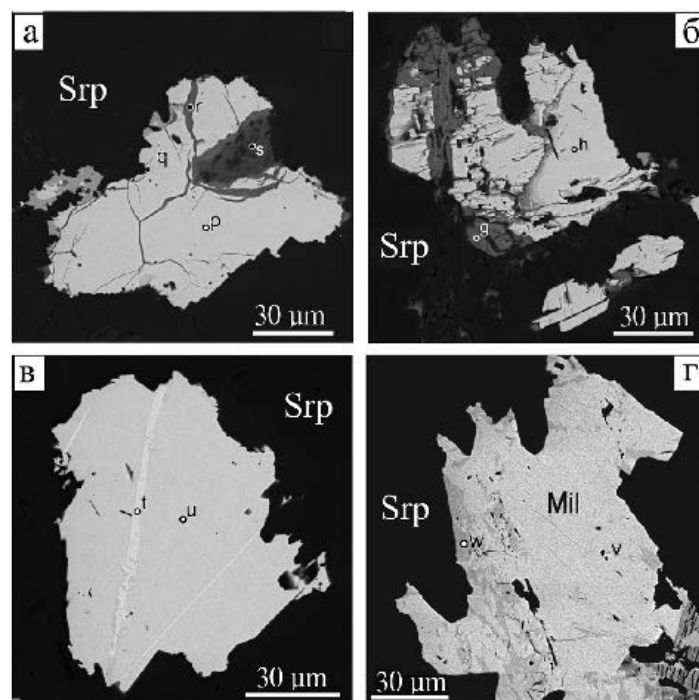


Рис. 8. Миллерит (р, h, u) и ассоциирующие с ним минералы: а – налдреттит (q), непутит (s) и параотуэйит (r); б – гаспеит (g); в – хизлевудит (t), г – сперрилит (v) и пентландит (w).

Fig. 8. Millerite (p, h, u) and associated minerals: а – naldrettite (q), nepuhte (s) and paraotwayite (r); б – gaspeite (g); в – heazlewudite (t), г – sperrilite (v) and pentlandite (w).

Купроиридсит CuIr_2S_4 в виде единичных субмикронных зерен встречен на контакте самородных иридия с осмием в двух зональных агрегатах МПП из тяжелого концентрата, (рис. 5г, е). В составе купроиридсита присутствует примесь Ni (табл. 4, ан. 13, 14).

Лаурит RuS_2 выявлен в виде кристаллов и субгедральных зерен размером до 15 мкм, приуроченных к контактам между хромшпинелидами

и хроммагнетитом, включений в миллерите (рис. 5ж), а также в ассоциации с ирарситом в агрегатах клинохлора и серпентина, иногда с карбонатами, в хромитите (ЭП 1, обр. 5а, 15). В составе зерен лаурита отмечены примеси Os, Ir, Fe, Ni, Cr и As (табл. 4, ан. 6–9).

Миллерит NiS в виде включений до 50–150 мкм встречен преимущественно в серпентините (рис. 8), магнезиохромите, на контакте алю-

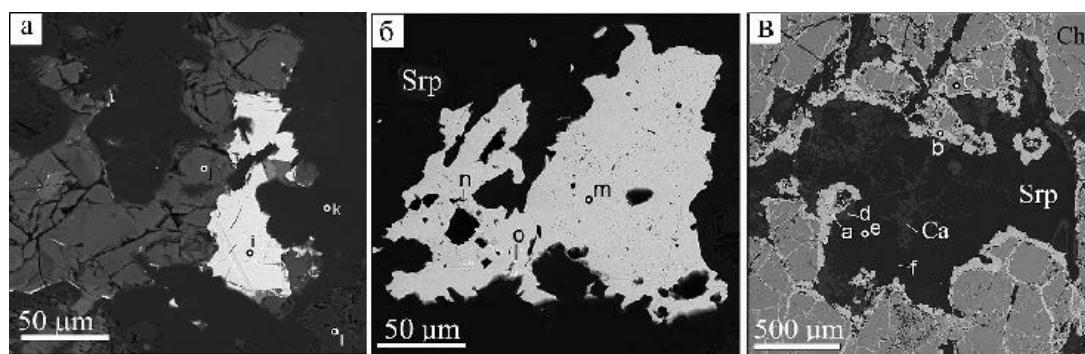


Рис. 9. Акцессорные сульфиды в хромититах: а – пентландит (i), замещенный «гарниеритом» (j) в серпентине (k) с реликтами форстерита (l); б – включения халькопирита (n) и герсдорфита (o) в миллерите (m); в – халькозин (a) на контакте хроммагнетита с агрегатом серпентина и кальцита.

Fig. 9. Accessory sulfides in chromitites: а – pentlandite replaced by «garnierite» (j) in serpentine (k) with relict forsterite (l); б – chalcopyrite (n) and gersdorffite (o) inclusions in millerite (m); в – chalcocite at the contact of Cr-magnetite with serpentine and calcite aggregate.

момагнезиохромита и магнезиохромита. В относительно крупных зернах миллерита выявлены включения хизлевудита, герсдорфита, халькопирита, лаурита, сперрилита, налдреттита, пентландита. Состав миллерита приведен в таблице 5. Иногда по трещинам миллерит замещен вторичными минералами Ni – «гарниеритом», непуитом, гаспеитом и сульфатом, близким к параутэйиту (рис. 7а, б).

Налдреттит Pd_2Sb найден в виде единичного субмикронного включения в миллерите (рис. 8а) среди магнетит-карбонат-серпентинового агрегата (ЭП 1, обр. 12) и характеризуется составом, соответствующим стехиометрической формуле (табл. 4, ан. 15).

Пентландит $(Ni,Fe)_9S_8$ образует зерна сложной формы размером до 80 мкм, преимущественно в хлорит-серпентиновом агрегате (рис. 9а), реже – включения в миллерите (рис. 8г) в хлорит-серпентиновом агрегате с карбонатами (ЭП 2, обр. 12). Пентландит часто замещается силикатами Ni («гарниеритом», рис. 9а). В составе пентландита присутствует Co (табл. 5)

Сперрилит $PtAs_2$ найден в виде единичного субмикронного включения в миллерите (рис. 8г, ЭП 2, обр. 12). В составе сперрилита с подсветкой миллерита определены (мас. %): Pt 18.84; Ni 33.53; Fe 2.53; Co 1.28; As 21.54; S 22.47; Σ 100.19, где расчетная доля сперрилита составила ~42.8 % с приближительной формулой $(Pt_{0.67}Fe_{0.32})_{0.99}As_{2.00}$ ($\Sigma_{\text{анионов}} = 2$).

Толовкит $IrSbS$ выявлен в виде субмикронного включения на контакте самородных иридия и осмия в зональном агрегате из тяжелого концентрата (рис. 5г, е). Толовкит ассоциирует с ирарситом, купроиридситом и эрликманитом. В составе толовкита присутствует As (табл. 4, ан. 16, 17).

Халькозин Cu_2S в ассоциации с хроммагнетитом (ЭП 2, обр. 3), образует каймы вокруг магнезиохромита. Состав халькозина (мас. %): Cu 68.82; Fe 8.58; Cr 1.57; S 20.77; Σ 99.74; эмпирическая формула $(Cu_{1.66}Fe_{0.23}Cr_{0.05})_{1.94}S_1$ ($\Sigma_{\text{анионов}} = 1$), где примеси Fe и Cr обусловлены захватом хроммагнетита (рис. 9в).

Халькопирит $CuFeS_2$ в виде включений размером 1–7 мкм встречен в миллерите (рис. 9б). Состав халькопирита (мас. %): Cu 33.40; Fe 28.96; Ni 1.92; S 34.12; Σ 98.40, отвечает формуле $(Cu_{0.99}Fe_{0.97}Ni_{0.06})_2S_2$ ($\Sigma_{\text{анионов}} = 2$). Примесь Ni, вероятно, обусловлена подсветкой миллерита.

Хизлевудит Ni_3S_2 выявлен в виде тонких (1–3 мкм) пластинчатых вростков длиной 30–60 мкм в миллерите (рис. 8в) среди хлорит-серпентинового агрегата с карбонатами (ЭП 1, обр. 12). Состав хизлевудита приведен в таблице 5.

Эрликманит OsS_2 встречен в ассоциации с ирарситом, купроиридситом и толовкитом в виде каймы вокруг зонального агрегата самородных иридия и осмия из тяжелого концентрата (рис. 5д, е). Эрликманит также встречен в ассоциации с ирарситом (рис. 5з) и в виде неоднородного выделения в хлорит-серпентиновом агрегате с вкрапленным хромитом. В составе эрликманита присутствуют примеси Ir, As, Ru, Ni, иногда – Fe и Cr, вероятно из-за подсветки хромшпинелида (табл. 4, ан. 10–12).

Гидроксиды в исследованных образцах встречались редко и представлены бруситом и лимонитом. **Брусит** $Mg(OH)_2$ обнаружен в карбонат-серпентиновом агрегате в виде скоплений размером до 200 мкм (ЭП 2, обр. 8) на контакте агрегатов маг-

Таблица 4

Table 4

Химический состав халькогенидов элементов платиновой группы (мас. %)

Chemical compositions of chalcogenides of platinum group elements (wt. %)

№ п/п	Os	Ir	Ru	Rh	Pd	Ni	Fe	Cu	S	As	Sb	Cr	Σ	Формула
Ирарсит (Σ _{атомов} = 3)														
1	—	61.30	—	—	—	—	—	—	10.52	21.53	6.23	—	99.58	Ir _{0.97} (As _{0.87} Sb _{0.16} S _{1.00})Σ _{2.03}
2	—	62.26	0.91	—	—	—	—	—	11.06	24.28	1.5	—	100.01	(Ir _{0.95} Ru _{0.03})Σ _{0.98} (As _{0.95} Sb _{0.04} S _{1.01})Σ ₂
3	—	60.51	—	—	—	1.13	—	—	11.29	23.85	3.01	—	99.79	(Ir _{0.91} Ni _{0.06})Σ _{0.97} (As _{0.92} Sb _{0.07} S _{1.01})Σ ₂
4	—	59.46	2.77	—	—	—	—	—	11.75	26.02	—	—	100.0	(Ir _{0.87} Ru _{0.08})Σ _{0.95} (S _{1.03} As _{0.97})Σ _{2.00}
5	—	54.73	2.75	1.26	—	1.72	—	—	11.73	25.14	—	1.73	99.46	(Ir _{0.81} Cr _{0.09} Ni _{0.08} Ru _{0.03} Rh _{0.03} Fe _{0.02})Σ _{1.11} (As _{0.96} S _{1.04})Σ _{2.2}
Лаврит (Σ _{атомов} = 2)														
6	4.60	0.46	55.64	—	—	—	—	—	35.42	3.88	—	—	100.0	(Ru _{0.95} Os _{0.05} Ir _{0.02})Σ _{1.02} (S _{1.91} As _{0.09})Σ _{2.2}
7	2.96	—	54.88	—	—	—	4.52	—	37.63	—	—	—	99.99	(Ru _{0.93} Fe _{0.13} Os _{0.03})Σ _{1.09} S _{Σ2.00}
8	7.02	2.03	54.18	—	—	—	—	—	35.65	1.12	—	—	100.0	(Ru _{0.95} Os _{0.07} Ir _{0.02})Σ _{1.04} (S _{1.97} As _{0.03})Σ ₂
9	31.26	5.59	26.84	—	—	5.43	—	—	30.87	—	—	—	99.99	(Ru _{0.53} Os _{0.32} Ni _{0.17} Ir _{0.05})Σ _{1.17} S _{Σ2}
Эриксманит (Σ _{атомов} = 2)														
10	35.26	30.31	0.70	—	—	1.24	—	—	17.53	14.97	—	—	100.01	(Os _{0.50} Ir _{0.42} Ni _{0.06} Ru _{0.02})Σ _{2.00} (S _{1.47} As _{0.54})Σ _{2.01}
11	54.58	13.92	0.69	—	—	0.69	—	—	19.65	10.07	—	—	99.60	(Os _{0.77} Ir _{0.19} Ni _{0.03} Ru _{0.02})Σ _{1.01} (S _{1.64} As _{0.36})Σ ₂
12*	62.99	6.85	2.33	—	—	2.50	0.74	—	22.69	—	—	1.82	99.92	(Os _{0.94} Ni _{0.11} Cr _{0.10} Ir _{0.10} Ru _{0.07} Fe _{0.04})Σ _{1.36} S _{Σ2}
Купроиридисит (Σ _{атомов} = 7)														
13	—	67.06	—	—	—	1.07	0.36	10.98	20.52	—	—	—	99.99	(Cu _{1.02} Ni _{0.11} Fe _{0.04} Ir _{2.06})Σ _{3.23} S _{Σ3.78}
14	—	65.91	—	—	—	1.02	0.00	9.90	22.15	—	—	—	98.98	(Cu _{0.90} Ni _{0.10} Ir _{1.99})Σ _{2.99} S _{Σ4.01}
Надреттит (Σ _{атомов} = 3)														
15	—	—	—	—	63.77	—	—	—	—	—	36.23	—	100.0	Pd _{2.00} Sb ₁
Толовкит (Σ _{атомов} = 3)														
16	—	55.37	—	—	—	—	—	—	9.30	3.09	32.24	—	100.0	Ir _{0.98} (Sb _{0.90} As _{0.14} S _{0.98})Σ _{2.03}
17	—	54.66	—	—	—	—	—	—	8.22	7.52	29.37	—	99.76	Ir _{0.97} (Sb _{0.82} S _{0.87} As _{0.34})Σ _{2.03}

нетита и магнезиохромита (ЭП 1, обр. 7). Состав брусита (мас. %): MgO 62.21; FeO 0.66; Σ = 62.87; H₂O_{расч.} 37.13, отвечает формуле (Mg_{0.99}Fe_{0.01})(OH)₂

(Σ_{катионов} = 1). **Лимонит** развит незначительно, в трещинах в серпентините, детально не изучен.

Таблица 5

Химический состав сульфидов Ni (мас. %)

Table 5

Chemical composition of Ni sulfides (wt. %)

№ п/п	Ni	Co	Fe	Cr*	Cu	S	Сумма	Формула
Миллерит								
1	59.74	—	0.46	—	—	33.85	94.06	(Ni _{0.96} Fe _{0.01})S
2	62.29	1.08	0.83	—	—	35.59	99.79	(Ni _{0.96} Co _{0.02} Fe _{0.01})S
3	61.17	1.28	1.19	—	—	35.44	99.08	(Ni _{0.94} Fe _{0.02} Co _{0.02})S
4	61.65	0.15	2.36	3.40	—	32.16	99.72	(Ni _{1.05} Co _{0.002} Fe _{0.04})S
5	62.82	—	0.72	2.53	—	33.94	100.01	(Ni _{0.98} Fe _{0.01})S
6	64.37	0.34	0.40	—	—	34.62	99.73	(Ni _{0.98} Co _{0.01} Fe _{0.01})S
7	61.64	2.53	0.46	—	—	34.87	99.50	(Ni _{1.00} Co _{0.002})S
8	61.23	2.65	3.34	—	—	32.23	99.46	(Ni _{1.04} Co _{0.04} Fe _{0.06})S
Пентландит								
9	38.84	8.34	19.52	—	—	32.87	99.56	(Ni _{5.16} Fe _{2.73} Co _{1.11})Σ _{9.0} S ₈
Хизлевудит								
10	72.36	—	0.56	—	0.06	26.81	99.79	(Ni _{2.97} Fe _{0.02} Cu _{0.004})Σ _{2.994} S ₂

Примечание. Матрица: брусит (1), серпентин, хлорит (2, 3, 6–10), магнезиохромит (4, 5). * – подсветка вмещающего минерала.

Note. Matrix: brucite (1), serpentine, chlorite (2, 3, 6–10), magnesiochromite (4, 5). * – influence of host mineral.

Карбонаты (кальцит, доломит, магнезиокальцит, магнезит) присутствуют в серпентиновых и хлоритовых агрегатах исследованных хромититов, иногда образуют в них секущие тонкие жилки. В продуктах изменения сульфидов Ni обнаружен гаспеит.

Кальцит Ca(CO₃) выявлен в большинстве изученных препаратов, где он образует агрегатные скопления и редкие жилки в серпентините (рис. 10а, б), магнетите, магнезиохромите. Для кальцита характерна примесь MgO в количестве 0.45–11.62 мас. %. Анализ с максимальным содержанием MgO (мас. %): CaO 37.23, MgO 15.74, CO₂ 46.45_{расч.}; формула (Ca_{1.26}Mg_{0.74})(CO₃)₂ (Σ_{катионов} = 2) отвечает магнезиокальциту. Примесь SrO 0.49 мас. % зафиксирована в радиальном сростке метакристаллов кальцита в хлорите (рис. 10б). Кальцит без примесей слагает прожилки, секущий серпентинит (ЭП 1, обр. 12).

Доломит CaMg(CO₃)₂ по распространенности близок кальциту и образует отдельные зерна и тонкие прожилки в серпентините и агрегатах хромшпинелидов и магнетита. Встречены зональные зерна доломита с варьирующими содержаниями MgO (ЭП 1, обр. 5), ассоциирующие с Cr-содержащим хлоритом (рис. 10в, г). Состав доломита (мас. %): MgO 20.53, CaO 31.77, CO₂ 47.4_{расч.}; формула (Ca_{1.05}Mg_{0.95})_{2.00}(CO₃)₂ (Σ_{катионов} = 2). В некоторых анализах отмечалась примесь FeO до 0.36 мас. %.

Магнезит Mg(CO₃) встречается относительно редко. Магнезит с примесью Ni встречен среди серпентина с включениями миллерита и продуктов его изменения, по-видимому, включающих гаспеит. Состав агрегата карбонатов (мас. %): MgO 31.31, NiO 38.87, Cr₂O₃ 1.94, FeO 0.53, SO₃ 2.16, SiO₂ 1.12, CO₂ ~24_{расч.}; Σ ~99.93) можно представить как смесь магнезита и гаспеита.

Гаспеит Ni(CO₃) выявлен в прожилке толщиной до 6–10 мкм, секущем миллерит и, возможно, частично его замесивший (рис. 8б). Состав гаспеита (мас. %): NiO 51.26; CoO 1.52; FeO 0.74; MgO 5.15; SiO₂ 1.01; SO₃ 0.61; CO₂ 38.2_{расч.}; Σ 98.49) отвечает формуле (Ni_{0.81}Mg_{0.16}Co_{0.02}Fe_{0.01})Σ_{1.0}(CO₃), исключая примеси SiO₂ и SO₃, обусловленные подсветкой миллерита и вмещающего серпентина. Гаспеит в миллерите среди хлорит-серпентинового агрегата (рис. 10е) содержит (мас. %): NiO 56.57; CoO 1.88; FeO 1.28; CO₂ 35.2_{расч.}; Σ = 94.93 и отвечает формуле (Ni_{0.95}Co_{0.03}Fe_{0.02})Σ_{1.0}(CO₃) (Σ_{катионов} = 1).

Сульфаты (барит и параотуэйт) отмечены в единичных зернах. **Барит** Ba(SO₄) встречен как микровключение в агрегате с галенитом и магнетитом в одном из прожилков в тонкополосчатом прожилке серпентина (ЭП 1, обр. 2). Диагностирован по ЭД-спектру (рис. 6). **Параотуэйт** Ni₄(SO₄)(OH)₆ предположительно определен в составе продуктов изменения миллерита (рис. 8а, ЭП 1, обр. 12). Состав параотуэйта (мас. %): NiO 53.79, CoO 2.15, FeO

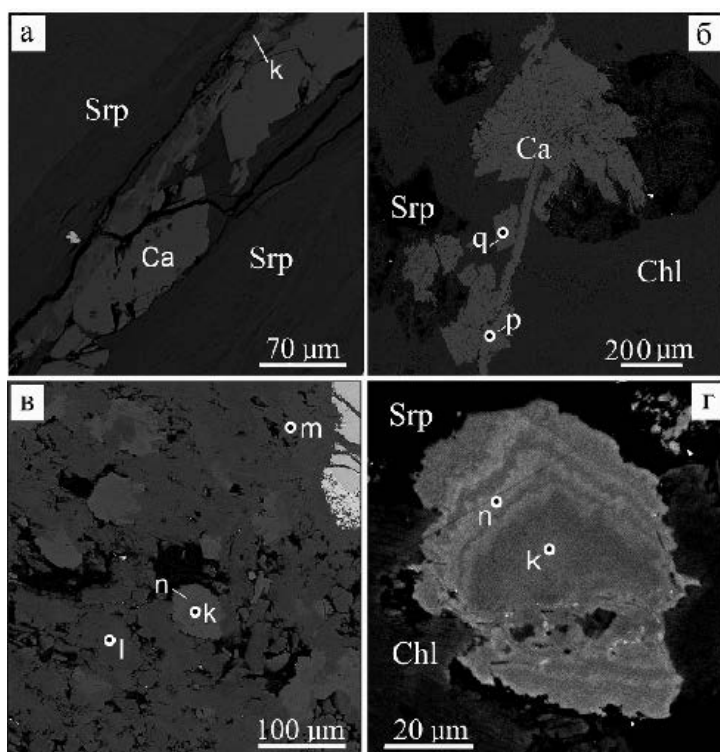


Рис. 10. Морфология карбонатов: а – жила кальцита в серпентине с хлоритом (k); б – агрегат метакристаллов Sr-содержащего кальцита (q, p); в, г – зональное доломит (k)-магнезиокальцитовое (n) зерно в серпентин-хлоритовом агрегате (г – деталь рис. в с повышенным контрастом).

Fig. 10. Morphology of carbonates: а, б – calcite veins in serpentine with chlorite (k); в, г – zoned dolomite (k)-magnesiocalcite (n) grain in serpentine-chlorite aggregate (fig. г – detail of Fig. в with enhanced contrast).

0.57, MgO 0.53, SO₃ 20.75, H₂O_{расч.} 20.80; $\Sigma = 98.59$, соответствует формуле $(\text{Ni}_{3.74}\text{Co}_{0.15}\text{Mg}_{0.07}\text{Fe}_{0.04})_{\Sigma 4.0}(\text{S}_{1.35}\text{O}_{4.04})(\text{OH})_6$ ($\Sigma_{\text{катионов}} = 4$) с заметным избытком S, вероятно, из-за примеси миллерита.

Силикаты встречаются редко и представлены реликтовым форстеритом, андрадитом и вторичными силикатами Ni, как правило, не отвечающими формуле определенного минерального вида. Среди вторичных минералов предположительно определен сепиолит и найден не идентифицированный водный силикат Ca.

Андрадит $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ встречается в отдельных зернах и агрегатах (рис. 11а) среди серпентинита (ЭП 2, обр. 12). Состав андрадита варьирует (мас. %, мин.–макс.): CaO 34.19–34.32, MgO 0.18–0.25, FeO 25.78–27.68, Cr₂O₃ 0.46–2.41, Al₂O₃ 0.23–0.26, SiO₂ 36.30–37.33, TiO₂ 0.0–0.49, $\Sigma = 99.67$ –99.92. Анализ с наименьшим содержанием Cr₂O₃ 0.46 мас. % и без примеси Al характеризуется формулой $(\text{Ca}_{2.97}\text{Mg}_{0.03})_{\Sigma 3.00}(\text{Fe}_{1.87}\text{Cr}_{0.03})_{\Sigma 1.90}(\text{Si}_1\text{O}_4)_3$.

«Гарниерит» (не определенные до минерального вида слоистые силикаты, обогащенные Ni) как продукт изменения сульфидов Ni выявлен

при помощи СЭМ (рис. 7а, 9а, ЭП 1, обр. 8, 12). Состав «гарниерита» изменчив (табл. 6), один анализ удовлетворительно рассчитывается на формулу **непуита** (табл. 6, ан. 1) $(\text{Ni}_{2.03}\text{Mg}_{0.73}\text{Fe}_{0.05}\text{Cr}_{0.05}\text{Ca}_{0.02})_{\Sigma 2.88}(\text{Si}_{2.11}\text{O}_5)(\text{OH})_4$ ($\Sigma_{\text{катионов}} = 5$). Значительный дефицит суммы обусловлен присутствием гидроксильной группы и, вероятно, молекулярной воды.

Сепиолит $\text{Mg}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ предположительно определен в ассоциации с андрадитом и точно не определенным силикатом Ca, встречается в кальцит-доломитовом агрегате среди серпентинита (ЭП 1, обр. 12, рис. 11б). В составе сепиолита присутствует примесь CaO 1.53 мас. % (табл. 6, ан. 4), эмпирическая формула $(\text{Mg}_{3.89}\text{Ca}_{0.20})_{\Sigma 4.09}(\text{Si}_{5.91}\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($\Sigma_{\text{катионов}} = 10$).

Водный силикат Ca (?) найден в виде микро-включения в сепиолите (рис. 11б). Состав зерна, мас. %: CaO 55.17, MgO 2.22, SiO₂ 31.28, Al₂O₃ 0.45, Cr₂O₃ 0.19; Σ 89.3. Соотношение суммы атомных количества (Ca + Mg) и (Si + Al) составляет 2:1, точное определение минерального вида требует проведения дополнительных исследований.

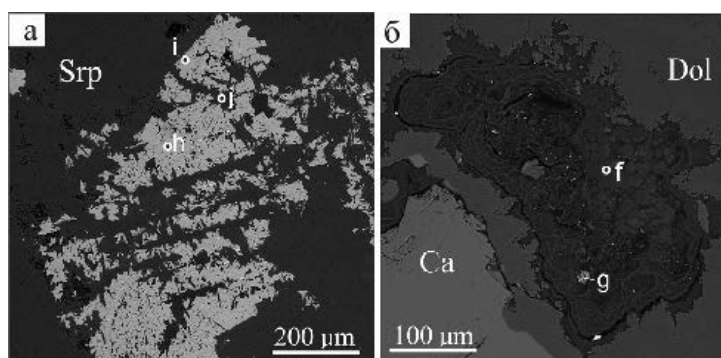


Рис. 11. Редкие силикаты: а – агрегат андрадита (h, i) в серпентине (j); б – сепиолит (f) и Ca-силикат (g) в кальцит-доломитовом агрегате.

Fig. 11. Rare silicates: a – andradite aggregate (h, i) in serpentine (j); б – sepiolite (f) and unidentified Ca-silicate (g) in calcite-dolomite aggregate.

Таблица 6

Химический состав «гарниерита» (1–3) и сепиолита (4) (мас. %)

Table 6

Chemical composition of «garnierite» (1–3) and sepiolite (4) (wt. %)

№ п/п	MgO	FeO	CaO	NiO	Cr ₂ O ₃	CoO	SiO ₂	CuO	SO ₃	Сумма
1	7.43	0.89	0.27	38.18	0.96	–	31.89	–	–	78.62
2	1.73	3.23	0.23	48.10	–	2.82	26.97	0.56	0.79	84.43
3	8.59	4.15	0.47	25.50	–	0.45	46.97	–	–	86.13
4	21.51	–	1.53	–	–	–	48.52	–	–	71.76

Таблица 7

Химический состав форстерита (мас. %)

Table 7

Chemical composition of forsterite (wt. %)

№ п/п	MgO	SiO ₂	CaO	FeO	NiO	Сумма	Формула, $\Sigma_{\text{катионов}} = 3$
1	55.21	42.03	0.20	1.25	0.49	99.18	$(\text{Mg}_{1.96}\text{Fe}_{0.02}\text{Ni}_{0.01}\text{Ca}_{0.01})_{\Sigma 2.00}(\text{Si}_{1.00}\text{O}_4)$
2	55.85	41.89	–	2.17	–	99.92	$(\text{Mg}_{1.97}\text{Fe}_{0.04})_{\Sigma 2.01}(\text{Si}_{0.99}\text{O}_4)$

Форстерит сохраняется в виде мелких реликтов среди серпентинит-хлоритовых агрегатов, вмещающих вкрапленный хромит (рис. 9а). Состав форстерита близок к стехиометрическому (табл. 7).

Обсуждение результатов и выводы

Проведенные исследования позволяют выделить основные этапы формирования хромититов, вскрытых в карьере Поклонной Горы, и вмещающих их пород и сопоставить выявленную последовательность с трендами, известными для других серпентинизированных гипербазитовых массивов Урала.

Наиболее ранним как в хромититах, так и среди вкрапленной минерализации, является магнезиоалюмохромит (хромит-1). Его состав варьирует

(рис. 12) и в целом сходен с установленным для раннемагматического хромита Таловского массива и известными данными по Карабашискому массиву (Попова и др., 1994; Бажин и др., 2010). В близком по составу хромите ранее были обнаружены включения самородного осмия (Зайков и др., 2012).

Взаимоотношения между магнезиохромитом и магнезиоалюмохромитом не всегда однозначны, но в большинстве сечений массивных хромититов магнезиохромит является более поздней фазой. Хромшпинелиды во вкрапленных рудах представлены как магнезиоалюмохромитом, так и магнезиохромитом. Обе эти разновидности могут содержать округлые включения серпентина, близкая к сферической форма которых указывает на их первичный расплавный характер, несмотря на то, что реликты первичных минералов в них не сохранились (рис. 13а). Иногда реликты магнезиохромита,

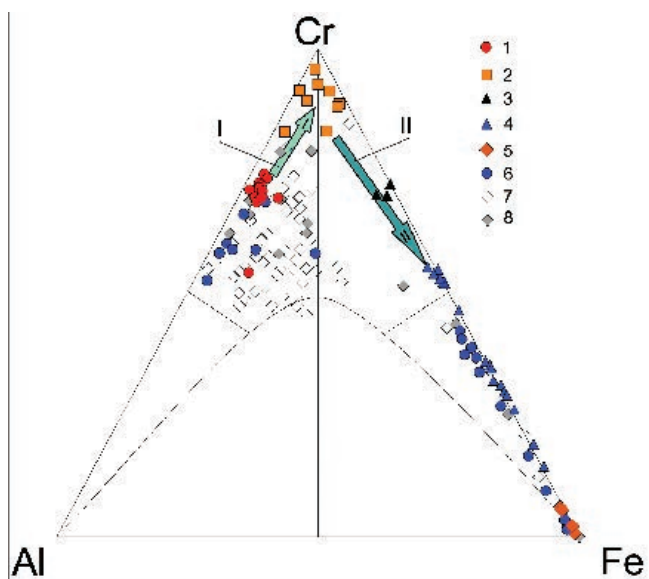


Рис. 12. Состав хромшпинелидов, хроммагнетита и магнетита (ат. %).

1–5 – образцы из хромитового карьера: 1 – хромит-1 (магнезиоалюмохромит); 2 – магнезиохромит; 3 – феррихромит; 4 – хроммагнетит; 5 – магнетит; 6 – Карабашский массив (Бажин и др., 2010); 7, 8 – рудные (7) и акцессорные (8) хромшпинелиды и магнетит Таловского массива (Бажин и др., 2010). Стрелками обозначены эволюционные тренды: I – магматический, II – метаморфический, связанный с серпентинизацией.

Fig. 12. Composition of Cr-spinels, Cr-magnetite and magnetite (at. %).

1–5 – samples from chromitite quarry: 1 – magnesioalumochromite; 2 – magnesiochromite; 3 – ferrichromite; 4 – Cr-magnetite; 5 – magnetite; 6 – Karabash massif (Bazhin et al., 2010); 7, 8 – ore (7) and accessory (8) Cr-spinels and magnetite of the Talovka massif (Bazhin et al., 2010). Evolution trends: I – magmatic, II – metamorphic related to serpentinization.

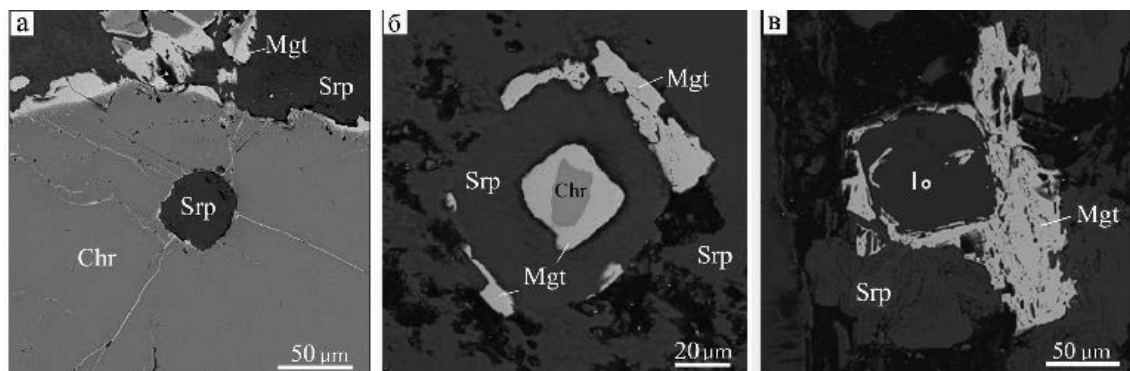


Рис. 13. Псевдоморфозы серпентина по первичным силикатам в ассоциации с хромшпинелидами, замещенными хроммагнетитом: а – округлое включение оливина (?), замещенного серпентином в магнезиохромите с каймой хроммагнетита; б – реликт магнезиохромита в хроммагнетите в псевдоморфозе по идиоморфному кристаллу оливина (?); в – агрегат хроммагнетита вокруг псевдоморфозы серпентина (I) по идиоморфному оливину (?).

Fig. 13. Serpentine pseudomorphoses after primary silicates in association with Cr-spinels replaced by Cr-magnetite: a – rounded olivine (?) inclusion replaced by serpentine in magnesiochromite with a Cr-magnetite rim; б – relict magnesiochromite in Cr-magnetite in pseudomorphose after euhedral olivine crystal (?); в – Cr-magnetite aggregate around serpentine (I) pseudomorphose after euhedral olivine (?).

замещенные хроммагнетитом, образуют включения в псевдоморфозах серпентина по оливину (?) или пироксену (рис. 13б), а сходные по морфологии серпентиновые псевдоморфозы находятся в агрегатах хроммагнетита, по-видимому, заместившего первичный хромит (рис. 13в). Наблюдаемые взаимоотношения минералов могут указывать на совместное образование первичных оливина, пироксена и хромшпинелидов из расплава. Общий тренд – замещение первично-магматических магнезиоалюмохромитов и магнезиохромитов феррихромитом и далее – хроммагнетитом и магнетитом установлен для многих древних гипербазитовых массивов из различных геодинамических обстановок (Costa,

Barriga, 2022 и ссылки в этой статье) Магнезиохромит содержит включения лаурита, хизлевудита, самородного золота. К контактам магнезиоалюмохромита и магнезиохромита часто приурочены зерна миллерита, в котором, в свою очередь, обнаружены включения сперрилита, налдреттита и хизлевудита.

Напрямую синхронизировать образование всех МПГ с разновидностями хромита не удастся. Однако морфология сложных зональных сростков самородных иридия и осмия, а также эрликманнита, ирарсита, купроиридсита и толовкита, извлеченных в тяжелый концентрат, указывает на последовательность смены минеральной формы

ЭПГ от самородных металлов через сульфиды и сульфоарсениды к соединениям с сурьмой. Аналогичная последовательность установлена для МПГ из ультрамафитовых комплексов Платиноносного пояса Урала (Кузьмин и др., 2020; Степанов и др., 2020; и ссылки в этой статье). Ранее было показано, что формирование интерметаллидов ЭПГ, изоферроплатины и минералов ряда лаурит–эрликманнит связано с раннемагматической стадией, в то время как сульфоарсениды, сульфоантимониды, арсениды образовались на позднемагматической стадии (Толстых и др., 2011; Киселева и др., 2014; Tolstykh et al., 2015, Степанов и др., 2020). Наблюдаемые минеральные парагенезисы хромшпинелидов и МПГ в хромититах Карабашского массива указывают на то, что магнезиохромиты и ассоциирующие с ними МПГ и, по-видимому, часть халькогенидов Ni образовались в позднемагматическую стадию.

С процессами серпентинизации связано формирование минералов ряда хроммагнетит–магнетит с широким спектром составов и, частично, сульфидов Ni. Также серпентинизация сопровождалась образованием самородных железа и никеля – процесс, типичный для многих серпентинитовых массивов (Рамдор, 1967). Ассоциация галенита и барита, обнаруженная в деформированной жиле антигорита с секущими агрегатами магнетита, также может быть условно синхронизирована с поздними этапами серпентинизации.

Карбонаты (кальцит, доломит, магнезит) преимущественно обнаружены в жилках, секущих серпентиновые и серпентин-хлоритовые агрегаты, что однозначно свидетельствует о наложенном характере карбонатизации, хотя встречены и совместные хлорит-серпентин-карбонатные агрегаты. Следует отметить, что в Карабашском массиве распространены поздние магнетит-хлорит-кальцитовые жилы с самородным золотом и акцессорной редкоземельной минерализацией (Мурзин и др., 2017), что свидетельствует о широком развитии процессов карбонатизации в массиве.

Брусит и ассоциация сепиолита с неопределенным водным силикатом Ca, формировались позднее вмещающей их серпентиновой матрицы, но редкость находок не позволяет определить их место в общей картине последовательности минералообразования. Гаспеит и силикаты Ni развиты по сульфидам Ni. Соотношение этих минералов с серпентинитами неясно, не исключено формирование этой ассоциации в связи с процессами гипергенеза.

Ряд минералов, охарактеризованных в образцах из хромитового карьера (самородное золото, галенит, герсдорфит, миллерит, пентландит, халькозин, халькопирит, хизлевудит, магнезиохромит, магнезиоалюмохромит, магнетит, феррихромит, хроммагнетит, брусит, доломит, кальцит, магнезит, клинохлор, андрадит, минералы группы серпентина) описаны ранее на месторождении медистого золота Золотая Гора (Спиридонов, Плетнев, 2002).

Дополнительно к минералам, известным в Карабашском массиве, нами выявлено 15 минеральных видов: самородные железо и никель, Fe-Pt сплав, по составу соответствующий изоферроплатине, самородный иридий, ирарсит, купроиридсит, лаурит, налдреттит, сперрилит, толовкит, эрликманнит, гаспеит, параотуэйт, непунит и сепиолит, а также впервые для массива установлен Cr-содержащий клинохлор – кеммерерит.

Сердечно благодарим О.Л. Бусловскую за помощь при проведении полевых работ, М.Н. Маляренко и Т.В. Семенову за выполнение химического анализа и Д.Е. Савельева за консультации.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00880-22-00.

Литература

- Бажин Е.А., Савельев Д.Е., Сначев В.И.** (2010) Габбро-гипербазитовые комплексы зоны сочленения Магнитогорской и Тагильской мегазон: строение и условия формирования. Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 244 с.
- Белогуб Е.В., Удачин В.Н., Кораблев Г.Г.** (2003) Карабашский рудный район (Южный Урал). *Материалы к путеводителю геолого-экологической экскурсии*. Мисс, ИМин УрО РАН, 40 с.
- Варлаков А.С.** (1993) Гипербазиты Челябинской области и их минерогения. *Уральский минералогический сборник* (2), 150–166.
- Зайков В.В., Савельев Д.Е., Котляров В.А., Юминов А.М., Жеребцов Д.А., Галимов Д.М., Судариков М.В.** (2012) Платиноиды в хромитовых рудах Южного Урала. *Металлогения древних и современных океанов – 2012*. С. 176–182.
- Зайков В.В., Попов В.А., Зайкова Е.В., Блинов И.А., Котляров В.А.** (2017) Состав и форма кристаллов платиноидов из россыпей Южного Урала. *Минералогия*, 3(4), 51–56.
- Киселева О.Н., Жмодик С.М., Дамдинов Б.Б., Агафонов Л.В., Белянин Д.К.** (2014) Состав и эволюция платинometалльной минерализации в хромитовых рудах Ильчирского офиолитового комплекса (Оспино-Китойский и Харанурский массивы, Восточный Саян). *Геология и геофизика*, 55(2), 333–349.

Кривовичев В.Г. (2021) Минеральные виды / Под ред. И.В. Пекова. СПб., Изд-во С-Петербургского ун-та, 600 с.

Кузьмин И.А., Паламарчук Р.С., Калугин В.М., Козлов А.В., Варламов Д.А. (2020) Хромит-платиновая минерализация клинопироксенит-дунитового массива Желтая Сопка, Северный Урал. *Минералогия*, 6(4), 46–59.

Мазур З.Р., Хакина Т.И., Ковальчук Т.К., Скорынина А.Н., Даниленко Т.А. (1961ф). Сводка по уральским месторождениям хромита, том 2. Фонды «Челябинскнедра», 278 с.

Мурзин В.В., Варламов Д.А., Пальянова Г.А. (2017) Условия образования золотоносных магнетит-хлорит-карбонатных пород Карабашского массива гипербазитов (Южный Урал). *Геология и геофизика*, 58(7), 1006–1020.

Павлов Н.В., Григорьева-Чупрынина И.И. (1973) Закономерности формирования хромитовых месторождений. М., Наука, 198 с.

Попова В.И., Попов В.А., Клочков И.К. (1994) Хромиты Таловского массива. *Уральский минералогический сборник*, (3), 124–130.

Рамдор П. (1967) Распространенные парагенезисы рудных минералов, возникающие при серпентинизации (с некоторыми данными о находках новых и необычных минералов). *Геология рудных месторождений*, (2), 32–43.

Савельев Д.Е., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А. (2008) Геология, петрология и хромитонность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 320 с.

Спиридонов Э.М., Плетнев П.А. (2002) Месторождение медистого золота Золотая Гора (о золото-родингитовой формации). М., Научный мир, 216 с.

Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Антонов А.В., Козлов А.В., Варламов Д.А., Ханин Д.А., Золотарев (мл.) А.А. (2020) Морфология, состав и онтогенез минералов платиновых металлов в хромититах зональных клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала. *Геология и геофизика*, 61(1), 60–83.

Толстых Н.Д., Телегин Ю.М., Козлов А.П. (2011) Коренная платина Светлоборского и Каменушинского массивов платиноносного пояса Урала. *Геология и геофизика*, 52(6), 775–793.

Флейшер М. (1990) Словарь минеральных видов / Под ред. В.А. Франк-Камецекого. М., Мир, 206 с.

Tolstykh N., Kozlov A., Telegin, Yu. (2015). Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Urals Platinum Belt. *Ore Geology Reviews* 67, 234–243.

Zaykov V.V., Savel'ev D.E., Kotlyarov V.A., Yuminov A.M., Zherebtsov D. A., Galimov D., Sudarikov M.V. (2012) Platinoids in the cromite ores of the South Urals: data on Karabash, Varshavka and Middle Kraka ultramafic massifs. *Metallogeny of the ancient and modern oceans*, 18, 176-182, [In Russian]

Costa I.R., Barriga F. (2022) Chromite Oxidation Patterns Associated to Serpentinization: Case Studies from

the Mid-Atlantic Ridge, the Alter do Chão Massif (NE Alentejo, Portugal) and the Ronda Massif (Spain) *Minerals* 2022, 12, 1300. <https://doi.org/10.3390/min12101300>

References

Bazhin E.A., Saveliev D.E., Snachev V.I. (2010) [Gabbro-ultramafic complexes of a junction zone of the Magnitogorsk and Tagil megazones: structure and forming condition]. Ufa, DisaynPoligrafServis, 244 p. (in Russian)

Belogub E.V., Udachin V.N., Korablev G.G. (2003) [Karabash ore region, South Urals]. *Materialy k putevoditel'yu geologo-ekologicheskoi ekskursii [Guidebook of Geological-Ecological Fieldtrip]*. Miass, IMin UrO RAN, 40 p. (in Russian)

Costa I.R., Barriga F. (2022) Chromite Oxidation Patterns Associated to Serpentinization: Case Studies from the Mid-Atlantic Ridge, the Alter do Chão Massif (NE Alentejo, Portugal) and the Ronda Massif (Spain) *Minerals* 2022, 12, 1300. <https://doi.org/10.3390/min12101300>

Fleisher M. (1990) Dictionary of mineral species / Ed. by V.A. Frank-Kamenetsky. Moscow, Mir, 206 p. (in Russian)

Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Damdinov B.B., Agafonov L.V., Belyanin D.K. (2014) Composition and evolution of PGE mineralization in chromite ores from the Il'chir ophiolite complex (Ospa-Kitoi and Khara-Nur areas, East Sayan). *Russian Geology and Geophysics*, 55 (2), 259–272.

Krivovichev V.G. (2021) [Mineral species] / Ed. I.V. Pekov. SPb., Izdatelstvo S-Petersburgskogo universiteta, 600 p. (in Russian)

Kuzmin I.A., Palamarchuk R.S., Kalugin V.M., Kozlov A.V., Varlamov D.A. (2020) [Chromite-platinum mineralization of clinopyroxenite-dunite massif Zheltaya Sopka, North Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 6(4), 46–59. (in Russian)

Mazur Z.R., Khakina T.I., Kovalchuk T.K., Skorynina A.N., Danilenko T.A. (1961) [Unpublished summary of the Uralian chromite deposits, volume 2]. Funds Chelyabinsknedra, 278 p. (in Russian)

Murzin V.V., Varlamov D.A., Palyanova G.A. (2017) Conditions of formation of gold-bearing magnetite-chlorite-carbonate rocks of the Karabash ultrabasic massif (South Urals). *Russian Geology and Geophysics*, 58(7), 803–814.

Pavlov N.V., Grigoryeva-Chuprynnina I.I. (1973) [Patterns of formation of chromite deposits]. Moscow, Nauka, 198 p. (in Russian)

Popova V.I., Popov V.A., Klochkov I.K. (1994) [Chromites of the Talovka massif]. *Uralskiy mineralogicheskii sbornik [Urals Mineralogical Collection]*, (3), 124–130. (in Russian)

Ramdohr P. (1967) [Abundant assemblages of ore minerals resulting from serpentinization (with some

data on new and atypical minerals)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (2), 32–43. (in Russian)

Savelyev D.E., Snachev V.I., Savelyeva E.N., Bazhin E.A. (2008) [Geology, petrology and chromite potential of gabbro-ultramafic massifs of the South Urals]. Ufa, DesignPolygraphService, 320 p. (in Russian)

Spiridonov E.M., Pletnev P.A. (2002) [Zolotaya Gora deposit of cupriferous gold (about gold-rodingite complex)]. Moscow, Nauchny mir, 216 p. (in Russian)

Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Antonov A.V., Kozlov A.V., Varlamov D.A., Khanin D.A., Zolotarev A.A.Jr. (2020) Morphology, composition, and ontogenesis of platinum-group minerals in chromitites of zoned clinopyroxenite–dunite massifs of the Middle Urals. *Russian Geology and Geophysics*, **61**(1), 47–67.

Tolstykh N., Kozlov A., Telegin, Yu. (2015). Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Urals Platinum Belt. *Ore Geology Reviews*, **67**, 234–243.

Tolstykh N.D., Telegin Yu.M., Kozlov A.P. (2011) Platinum mineralization of the Svetloborsky and Kamenushinsky massifs (Urals Platinum Belt). *Russian Geology and Geophysics*, **52**(6), 603–619.

Varlakov A.S. (1993) [Ultramafic rocks of Chelyabinsk region and their minerageny]. *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik [Urals Mineralogical Collection]*, (2), 150–166. (in Russian)

Zaykov V.V., Savel'ev D.E., Kotlyarov V. A., Yuminov A. M., Zhrebtcov D. A., Galimov D., Sudarikov M.V. (2012) Platinoids in the cromite ores of the South Urals: data on Karabash, Varshavka and Middle Kraka ultramafic massifs. *Metallogeny of the ancient and modern oceans*, 18, 176–182, [In Russian].

Zaykov V.V., Popov V.A., Zaykova E.V., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. (2017) [Composition and morphology of crystals of platinum group minerals from placers of the South Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **3**(4), 51–56. (in Russian)

Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A. and Kraynev, Yu.D. (2017) Gold and platinum group minerals in placers of the South Urals: Composition, microinclusions of ore minerals and primary sources. *Ore geology reviews* 85, 299–320.