

**PLATINUM METAL MINERALIZATION OF THE SOUTH URALS MAGMATIC COMPLEXES:
GEOLOGICAL AND GEODYNAMIC CHARACTERISTICS OF FORMATIONS,
PROBLEMS OF THEIR GENESIS, AND PROSPECTS**

I.R. Rakhimov ¹✉, **D.E. Saveliev** ¹, **A.V. Vishnevskiy** ^{2,3}

¹Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 16/2 Karl Marx St, Ufa 450077, Republic of Bashkortostan, Russia

²Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

³Novosibirsk State University, 1 Pirogova St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. In the South Urals, we have identified and investigated two platinum-bearing formations – ophiolite chromite-bearing complexes, and the Khudolaz differentiated mafic-ultramafic complex with sulfide Cu-Ni mineralization. The ophiolite chromite-bearing complexes include fragments of the upper mantle and lower crust of the Paleouralian Ocean, which were induced by collision onto the edge of the East European platform. The origin of the Khudolaz complex is related a mantle plume activity. Here, we review and compare the main features of platinum-metal mineralization (PMM) in these two formations.

The article presents the results of mineralogical and geochemical studies of PMM associated with chromite and sulfide Cu-Ni ores. In association with chromitites, two types of PMM are distinguished: (1) predominating refractory platinoids in chromitites of the mantle unit of the section, and (2) predominating platinum and palladium in chromitites of the transitional wehrlite-clinopyroxenite complex. Compositions of platinum group minerals (PGM) and relations between their elements and host minerals suggest that the minerals of the ophiolite chromite-bearing complexes are of a restite origin, while the Khudolaz complex results from a combination of magmatic processes and solid-phase redistribution of material. Palladium (michenerite, froodite, merenskyite, borovskite, sudburyite) and platinum (sperrylite, moncheite) minerals are found in magmatic sulfide ores of the Khudolaz complex, which were subjected to hydrothermal metasomatization. Texture observations using electron microscope and optical (reflected light) images, as well as LA ICP MS analyses of sulfides suggest late- and post-magmatic crystallization of PMM in three phases: (1) immiscible metalloid or highly fractionated residual sulfide melts trapped in sulfides; (2) segregation of isomorphous impurities of platinum group elements (PGE) and chalcogenide elements from sulfide solid solutions; and (3) interaction of hydrothermal fluids with soluble sulfides.

Prospective for PMM are extended bodies of disseminated chromitites in marginal dunites of the Kraka and Nurali massifs, and wehrlite-clinopyroxenite complexes of the same massifs containing PGE (above 500 ppb). In the Khudolaz complex, promising PMM bodies are low-metasomatized parts of sulfide ore bodies (1 ppm of Σ PGE and above) located in the largest massifs, Severny Buskun and Zapadny Karasaz. Exocontact zones of these intrusions are also promising for PMM.

KEYWORDS: South Urals; magmatism; ophiolites; gabbro; sulfides; platinum metal mineralization (PMM)

FUNDING: This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 18-35-00391) and performed under the State Assignment on Topics No 0252-2017-0012 and No 0246-2019-0078, and partially under Topic 0301200057819000038_104987 of the priority directions of scientific research of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan.

RESEARCH ARTICLE

Received: June 19, 2020

Revised: September 2, 2020

Correspondence: Ildar R. Rakhimov, rigel92@mail.ru

Accepted: September 14, 2020

FOR CITATION: Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Vishnevskiy A.V., 2021. Platinum metal mineralization of the South Urals magmatic complexes: geological and geodynamic characteristics of formations, problems of their genesis, and prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (2), 409–434. doi:10.5800/GT-2021-12-2-0531

ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЮЖНОГО УРАЛА: ГЕОЛОГО-ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФОРМАЦИЙ, ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА И ПЕРСПЕКТИВЫ

И.Р. Рахимов¹, Д.Е. Савельев¹, А.В. Вишневецкий^{2,3}

¹ Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2, Республика Башкортостан, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

АННОТАЦИЯ. Выделены и охарактеризованы две платиноносные формации Южного Урала – офиолитовые комплексы, несущие хромитовое оруденение, и худолазовский дифференцированный комплекс, специализированный на сульфидное Cu-Ni оруденение. Первые представляют собой фрагменты верхней мантии и низов коры Палеоуральского океана, обдурцованные в результате коллизии на край Восточно-Европейской платформы. Второй объект – дифференцированный ультрабазит-базитовый комплекс, образование которого связывается с мантийным плюмом. Выполнен обзор и сопоставление главных особенностей платинометалльной минерализации (ПММ) в двух формациях.

Проведены минералого-геохимические исследования ПММ, ассоциирующей с хромитовым и сульфидным Cu-Ni оруденением. В ассоциации с хромититами выделены два типа платинометалльной минерализации: 1) с преобладанием тугоплавких платиноидов в хромититах мантийной части разреза и 2) с преобладанием платины и палладия в хромититах переходного верлит-клинопироксенитового комплекса. Состав и характер взаимоотношений минералов платиновой группы (МППГ) с окружающими минералами позволяют предположить релактивный генезис для минералов первой ассоциации и сочетание магматических процессов и твердофазного перераспределения материала при образовании минералов второй ассоциации. В ликвидационных сульфидных рудах худолазовского комплекса, претерпевших гидротермальную метасоматизацию, выявлены минералы Pd (майчнерит, фрудит, меренскиит, боровскит, садберриит) и Pt (сперрилит, мончеит). Результаты структурных наблюдений в электронно-микроскопических и оптических (отраженный свет) изображениях, а также ЛА ИСП МС (лазерная абляция с масс-спектрометрией в индуктивно связанной плазме) анализы сульфидов свидетельствуют в пользу поздней и постмагматической кристаллизации платинометалльных минералов в три ступени: 1) из несмешиваемых металлоидных или высокофракционированных остаточных сульфидных расплавов, захваченных сульфидами; 2) за счет сегрегации из сульфидных твердых растворов изоморфных примесей элементов платиновой группы (ЭПГ) и халькогенидных элементов; 3) за счет взаимодействия гидротермальных флюидов с веществом растворяющихся сульфидов.

Перспективными в отношении ПММ являются протяженные тела вкрапленных хромититов, локализованные в краевых дунитах массивов Крака и Нурали, а также верлит-клинопироксенитовые комплексы тех же массивов с содержанием элементов платиновой группы более 500 мг/т. В худолазовском комплексе перспективными являются слабометасоматизированные части рудных тел сульфидов наиболее крупных массивов (Северный Бускун, Западный Карасаз), содержащие до 1 г/т Σ ЭПГ и более, а также экзоконтактовые зоны этих интрузий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Южный Урал; магматизм; офиолиты; габбро; сульфиды; платинометалльная минерализация

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-35-00391) в рамках Госзадания по темам № 0252-2017-0012 и № 0246-2019-0078, а также частично – темы ПННИ АНРБ № 0301200057819000038_104987.

1. ВВЕДЕНИЕ

Платинометалльная минерализация Урала широко известна в связи с Платиноносным поясом – крупной региональной структурой, протягивающейся от Среднего до Приполярного Урала и включающей концентрически-зональные ультрамафит-мафитовые массивы [Ivanov, 1997; и др.]. На Южном Урале платинометалльная минерализация (ПММ) изучена менее детально, и в настоящее время здесь не выявлено ни одного месторождения элементов платиновой группы (ЭПГ). Между

тем здесь известны две перспективные в плане платиноносности магматические формации – хромитоносные гипербазиты офиолитовых комплексов (массивы Крака и Нурали) и сульфидоносный расслоенный худолазовский комплекс. Первые приурочены к субмеридиональным гипербазитовым поясам Главного Уральского разлома и более западной Зилаирской зоны, а второй развит восточнее – в центральной части Западно-Магнитогорской зоны, также имеющей субмеридиональное простираение.

Изучение коренной платиноносности офиолитовых ультрамафитов Южного Урала проводилось с 1960-х гг. [Fominykh, Khvostova, 1970; Shumikhin et al., 1987], но заметных положительных результатов при этом получено не было. Наиболее продуктивными работы стали с 1990-х гг., когда была установлена платиноносность полосчатого комплекса Нуралинского массива [Dmitrenko et al., 1992; Smirnov, Volchenko, 1992; Moloshag, Smirnov, 1996; и др.], в пределах которого были выявлены Западно-Шерамбайское и Приозерное рудопроявления и охарактеризована ПММ [Moloshag, Smirnov, 1996; Grieco et al., 2007; Zaccarini et al., 2004], а также хромититов массива Крака [Snachev et al., 2001; и др.].

Худолазовский дифференцированный комплекс в отношении платиноносности изучался слабо. В известных ранних работах [Buchkovsky et al., 1974; Salikhov et al., 2001] приводятся лишь единичные результаты определений концентраций ЭПГ в сульфидных рудах. Авторами данной работы впервые была выявлена ПММ сульфидных руд худолазовского комплекса [Rakhimov et al., 2018].

В статье приводятся результаты минералого-геохимических исследований пород и руд, в которых была выявлена платинометалльная минерализация. Обсуждаются и сопоставляются модели формирования ПММ в хромитовых офиолитах и расслоенном сульфидном комплексе, их связь с геодинамическими процессами и перспективы в отношении ЭПГ.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучено более 400 шлифов и аншлифов пород и руд на оптических микроскопах Полам Р-311 и Carl Zeiss Axioskop 40 А. Содержание элементов платиновой группы в хромититах определялось в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) методом ИСП МС с предварительной подготовкой проб согласно [Men'shikov et al., 2016] (аналитик Ю.В. Сокольникова). Определения Pt, Pd, Rh, Ru, Ir в породах худолазовского комплекса были выполнены во ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) методом ИСП МС в коллоидно-солевом растворе деионизированной воды, содержащем частицы фракции исследуемой пробы с размерами 1–1000 нм. Величина пределов обнаружения составляет, мкг/л: 0.02 (Pt), 0.03 (Pd), 0.005 (Ag), 0.005 (Rh), 0.02 (Ru), 0.006 (Ir).

Изучение минералов платиновой группы выполнялось на сканирующих электронных микроскопах Tescan Vega 3 и Mira 3 в ИПСМ РАН (г. Уфа), ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс) и ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Химический состав минералов определен в режиме энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием приставки X-MAX 50 mm фирмы Oxford Instruments с напряжением 20 кВ, силой тока 15 нА, вакуумом 0.05 Па и диаметром пучка 2 мкм; пределы допускаемой относительной погрешности измерений $\pm 3\%$. Обработка спектров проводилась в программном комплексе INCA Energy.

Анализ микроэлементного состава сульфидов выполнялся на масс-спектрометре Agilent 7700x, оборудованном приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213 (ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик Д.А. Артемьев). Диаметр лазерного пучка составлял 30–60 мкм, частота – 5 Гц, энергия на поверхности образца 4–5 Дж/см². Для калибровки использовались международные стандарты MASS-1 и UQAC.

3. ХРОМИТ-ПЛАТИНОНОСНАЯ ОФИОЛИТОВАЯ ФОРМАЦИЯ ЮЖНОГО УРАЛА

3.1. Краткая геологическая характеристика

В составе офиолитовых комплексов традиционно выделяют мантийную и коровую составляющие, граница между которыми рассматривается как вещественное выражение древней границы Мохоровичича. Мантийный разрез офиолитов – нижняя часть офиолитовых комплексов, включающая перидотиты (лерцолиты и/или гарцбургиты) с подчиненными телами дунитов. Коровый разрез офиолитов – верхняя часть офиолитовых комплексов, состоящая из пород габбрового состава, комплекса параллельных даек, пиллоу-лав и глубоководных осадков. Переходный мантийно-коровый комплекс – относительно маломощный горизонт между габброидами (вверху) и краевыми дунитами (внизу) – имеет существенно пироксеновый состав (верлиты, клинопироксениты, вебстериты и т.п.) и шлирово-полосчатое строение, поэтому иногда в литературе именуется «полосчатым комплексом». Все это представлено и на офиолитовых комплексах Нурали и Крака.

Наиболее типичными для Южного Урала являются удлиненные в меридиональном направлении зоны, сложенные серпентинитами [Saveliev et al., 2008]. Меланжевые зоны были сформированы на конечных этапах тектонического скучивания материала в коллизионной обстановке в верхней части земной коры. Внутри зон меланжа встречаются линзовидные блоки, сохранившие черты первичного строения. Одним из таких сохранившихся блоков является Нуралинский массив в северной части Учалинского района Республики Башкортостан (рис. 1). С запада на восток в разрезе массива сменяют друг друга мантийные перидотиты, переходный мантийно-коровый комплекс и габброиды. Восточная часть тектонически нарушена и превращена в меланжевую зону, где в серпентинитах встречаются блоки габброидов, вулканитов и кремнистых осадков – коровой части разреза офиолитов.

Наиболее крупным и хорошо сохранившимся комплексом мантийных перидотитов в российской части Южного Урала являются массивы Крака (рис. 2). Они состоят из четырех близко расположенных тел почти изометричной формы, общая площадь выходов ультрамафитов составляет 900 км². Типичный для офиолитов разрез представлен на массиве Средний Крака. На трех других массивах габброиды встречаются только в виде даек. В строении мантийного разреза массивов Крака преимущественным распространением пользуются шпинелевые перидотиты. Повсеместно они

обнаруживают признаки высокотемпературной деформации, которая имела место при подъеме кристаллического вещества верхней мантии в составе офиолитового диапира [Saveliev, 2018].

На массивах Нурали и Крака расположены многочисленные мелкие месторождения и рудопоявления хромититов. Большинство из них приурочено к дунитам мантийной части разреза, при этом в мощных дунитовых телах встречаются протяженные плоские тела

вкрапленных хромититов, тогда как короткие линзовидные и столбообразные залежи массивных и густо-вкрапленных хромититов отделяются от окружающих перидотитов незначительными по мощности дунитовыми оболочками (envelopes) [Saveliev, 2018].

Незначительная часть хромититовых проявлений локализована в породах переходного мантийно-корового комплекса, сложенного преимущественно породами верлит-клинопироксенитового состава, а также

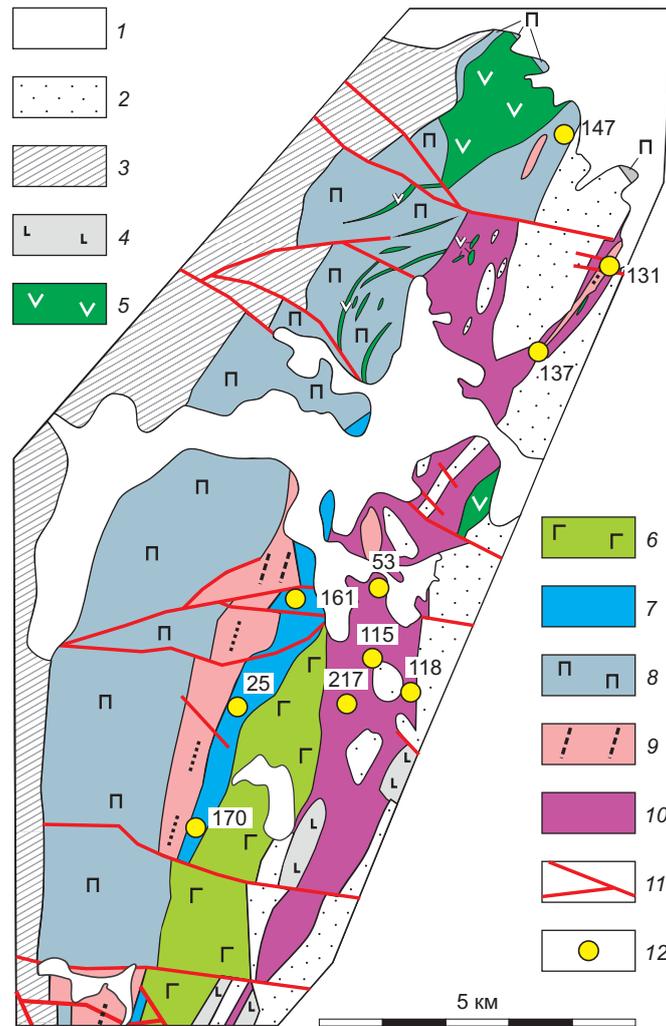


Рис. 1. Схема геологического строения Нуралинского массива и расположение изученных хромититовых проявлений (составлена по [Shumikhin, 1980], с изменениями по [Saveliev, Ankusheva, 2018]).

1 – четвертичные аллювиальные и озерные отложения; 2 – палеозойские осадочные породы Западно-Магнитогорской зоны; 3 – докембрийские осадочные и метаморфические породы зоны Уралтау; 4 – вулканогенные породы Западно-Магнитогорской зоны; 5 – субвулканические тела габбро и диабазов; 6–10 – Нуралинский офиолитовый комплекс, в том числе: 6 – габброиды, 7 – верлиты и клинопироксениты, 8 – шпинелевые и шпинель-плаггиоклазовые перидотиты, 9 – дуниты, 10 – серпентиниты; 11 – поперечные разрывные нарушения; 12 – проявления хромититов (25 – Восточно-Нуралинское, 53 – Шерамбайское, 115 – Сарусакульское, 118 – Восточно-Сарусакульское, 131 – Курманкульское, 137 – Аттестинское, 147 – Мокрая Яма, 161 – Западно-Шерамбайское, 170 – Приозерное, 217 – Южно-Сарусакульское).

Fig. 1. Schematic geological map showing the Nurali massif and locations of studied chromitite occurrences (after [Shumikhin, 1980] with additional data from [Saveliev, Ankusheva, 2018]).

1 – quaternary alluvial and lacustrine sediments; 2 – Paleozoic sedimentary rocks of the West Magnitogorsk zone; 3 – Precambrian sedimentary and metamorphic rocks of the Uraltau zone; 4 – volcanic rocks of the West Magnitogorsk zone; 5 – subvolcanic gabbro and diabase bodies; 6–10 – Nurali ophiolite complex: 6 – gabbroids, 7 – wehrlites and clinopyroxenites, 8 – spinel and spinel-plagioclase peridotites, 9 – dunites, 10 – serpentinites; 11 – faults; 12 – chromitite occurrences (25 – East Nurali, 53 – Sherambay, 115 – Sarusakkul, 118 – East Sarusakkul, 131 – Kurmankul, 137 – Attestinskoe, 147 – Mokraya Yama, 161 – West Sherambay, 170 – Priozyornoe, 217 – South Sarusakkul).

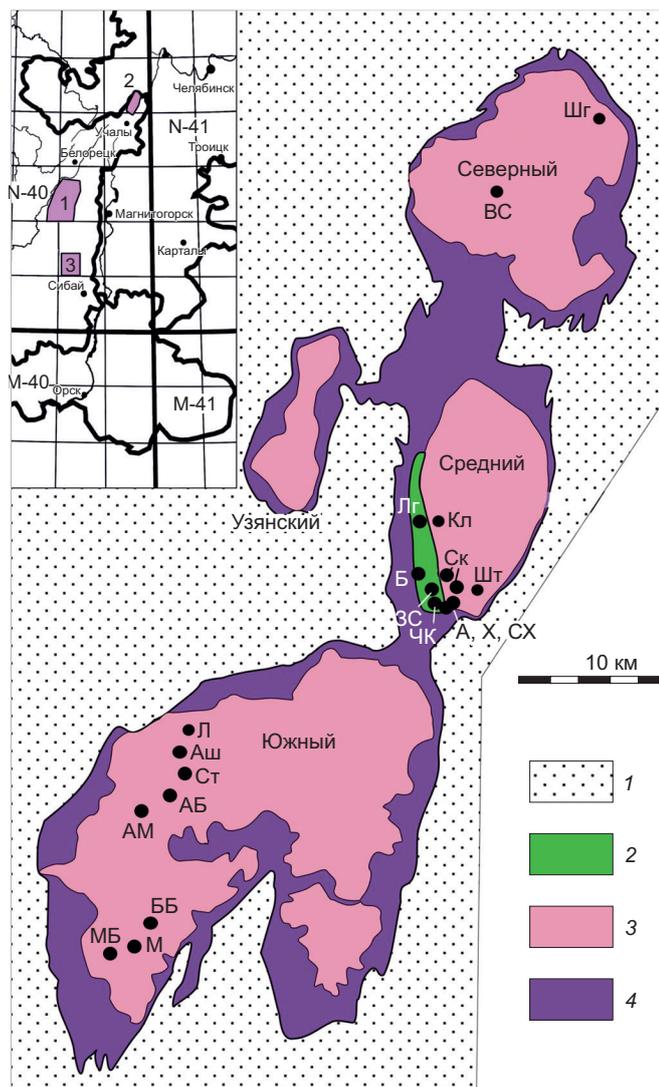


Рис. 2. Схема геологического строения массивов Крака и расположение изученных хромититовых проявлений (по [Snachev et al., 2001], с изменениями).

1 – вмещающие палеозойские осадочные и вулканогенно-осадочные породы; 2–4 – оphiолитовая ассоциация: 2 – габброиды и ультрамафиты переходного мантийно-корового комплекса, 3 – шпинелевые перидотиты с подчиненными телами дунитов, 4 – серпентиниты.

Буквами на схеме обозначены исследованные проявления хромитовых руд: Шг – Шигаево, ВС – Верхнесарангинское, Кл – Ключевское, Сл – Саксейское, ЗС – Западно-Саксейское, Лг – Логиновское, ЧК – Черноключенское, МБ – Малый Башарт, Б – Бабай, А – Акбура, Х – Хамитовское, СХ – Северо-Хамитовское, Аш – Ашкарка, Ст – Ситновское, АБ – Большой Апшак, АМ – Малый Апшак, ББ – Большой Башарт, М – им. Менжинского, Л – Лактыбаш. На врезке – обзорная схема Южного Урала с границами регионов М 1:200000, цифрами обозначены описанные объекты: 1 – Крака, 2 – Нурали, 3 – Худолаз.

Fig. 2. Schematic geological map showing the Kraka massifs and locations of studied chromitite occurrences (modified after [Snachev et al., 2001]).

1 – Paleozoic sedimentary and volcanic-sedimentary host rocks; 2–4 – ophiolite assemblage: 2 – gabbroids and ultramafic rocks of transitional mantle-crust complex, 3 – spinel peridotites with subordinate dunite bodies, 4 – serpentinites.

Cr-ore occurrences (letters): Шг – Shigaevo, ВС – Upper Saranga, Кл – Klyuchevskoe, Сл – Saksey, ЗС – West Saksey, Лг – Loginovskoe, ЧК – Cherny Klyuch, МБ – Maly Bashart, Б – Babay, А – Akbura, Х – Khamit, СХ – North Khamit, Аш – Ashkarka, Ст – Sitnovskoe, АБ – Bolshoy Apshak, АМ – Maly Apshak, ББ – Bolshoy Bashart, М – Menzhinsky, Л – Laktybash. Inset – schematic map of the South Urals (scale 1:200000) showing locations of studied objects: 1 – Kraka, 2 – Nurali, 3 – Khudolaz.

в зонах серпентинитового меланжа. В верлит-клинопироксенитовом комплексе распространены вкрапленные полосчатые хромититы либо шпирсы и штокверки тонких прожилков хромититов массивной текстуры. В серпентинитах встречаются мелкие гнездовидные и будинообразные залежи массивных хромититов.

3.2. Геохимия ЭПГ оphiолитовых массивов

Средние содержания элементов платиновой группы в хромититах различных комплексов массивов Крака и Нурали приведены в табл. 1. Хромититы большей части рудопоявлений содержат платиноиды в количестве более 100 мг/т. Близкие средние содержания суммы ЭПГ в хромититах были получены при изучении платиноносности Кемпирсайского массива [Distler et al., 2008]. Однако, в отличие от проявлений мантийного разреза массивов Крака и Нурали, в хромититах Кемпирсая в значительной степени преобладают тугоплавкие платиноиды. Обращает на себя внимание тот факт, что в некоторых хромититах мантийного разреза массивов Крака содержание палладия повышено до 150 мг/т.

В ряде изученных проявлений концентрация платиноидов превышает 1 г/т, причем наиболее высокие средние содержания установлены в хромититах переходного мантийно-корового комплекса (Западно-Шерамбайское, Приозерное, Западно-Саксейское, Логиновское) и рудопоявлениях меланжевой зоны (Черноключенское, Бабай, Хамитовское), пространственно тяготеющих к ультрамафитам верлит-клинопироксенитового комплекса массива Средний Крака.

На диаграммах рис. 3 показаны кривые распределения содержания ЭПГ относительно хондрита. В хромититах мантийного разреза массивов Крака фиксируется специфический характер распределения, заключающийся в постепенном возрастании хондрит-нормированного отношения в ряду $Os < Ir < Rh \approx Pd$ при резкой отрицательной аномалии Pt. Близкий характер кривой установлен в хромититах Черноключенского проявления в меланже, что может указывать на его образование за счет хромититов мантийного разреза.

В коровом разрезе массива Средний Крака расположено два проявления, в обоих преобладают относительно легкоплавкие платиноиды (PPGE), при этом для

Таблица 1. Средние содержания элементов платиновой группы в хромититах массивов Крака и Нурали (мг/т)
Table 1. Average PGE bulk composition of chromitites of the Kraka and Nurali massifs (ppb)

№ п/п	Массив	Комплекс	Объект	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	ΣЭПГ
1	Крака	мантийный	Малый Башарт	9.0	31.9	22.6	11.3	1.0	24.1	99.9
2	Крака	мантийный	Шатран	3.6	11.0	23.3	6.3	5.3	16.0	65.6
3	Крака	мантийный	Придорожное	5.2	18.9	34.4	6.3	3.1	8.9	76.8
4	Крака	мантийный	Ключевское	11.0	18.6	33.5	10.2	0.6	4.5	78.4
5	Крака	мантийный	Правый Саксей	4.1	16.9	20.0	12.8	4.2	69.1	127.1
6	Крака	мантийный	Левый Саксей	3.4	35.8	14.8	10.7	4.7	35.6	105.0
7	Крака	мантийный	№33	5.4	20.1	18.8	5.2	1.2	17.1	67.8
8	Крака	мантийный	Лактыбаш	2.7	24.0	61.6	27.5	8.1	154.2	278.0
9	Нурали	мантийный	Мокрая Яма	6.5	37.6	117.2	17.2	14.1	46.0	238.6
10	Нурали	мантийный	Нуралинское	8.6	19.8	57.6	9.9	0.7	3.3	100.0
11	Нурали	мантийный	Аттестинское	2.5	15.9	50.4	10.3	1.4	37.2	117.6
12	Нурали	мантийный	Курманкульское	12.3	24.3	11.0	7.7	3.8	7.4	66.4
13	Крака	коровый	Западно-Саксейское	5.0	47.0	20.0	47.0	2103.0	200.0	2417.0
14	Крака	коровый	Логиновское	59.0	104.0	215.0	52.0	429.0	295.0	1154.0
15	Нурали	коровый	Западно-Шерамбайское*	69.0	96.0	52.0	197.0	7469.0	1793.0	9676.0
16	Нурали	коровый	Приозерное**	2261.0	665.0	2654.0	88.0	144.0	84.0	5896.0
17	Крака	меланж	Бабай***	73.0	114.0	59.0	н/о	1737.0	5.0	1987.0
18	Крака	меланж	Хамитовское***	32.0	51.0	38.0	н/о	580.0	5.0	706.0
19	Крака	меланж	Черноключенское	152.0	95.0	107.0	33.0	11.0	165.0	562.0
20	Крака	меланж	Апшак Большой***	26.0	49.0	52.0	н/о	154.0	86.0	367.0
21	Крака	меланж	Апшак Малый***	9.0	14.0	17.0	н/о	116.0	66.0	222.0
22	Нурали	меланж	Восточно-Сарусаккульское	3.9	12.7	173.7	15.5	4.2	0.6	210.6
23	Нурали	меланж	Южно-Сарусаккульское	26.3	41.8	30.6	8.9	5.3	15.4	128.3
24	Нурали	меланж	Шерамбайское	4.1	69.5	134.0	27.2	97.7	25.3	357.7
25	Нурали	меланж	Сарусаккульское	10.0	23.2	83.1	10.1	9.1	9.2	144.6

Примечание. н/о – элемент не определялся; при составлении использованы данные работ: * – [Zaccarini et al., 2004], среднее из 2 ан.; ** – [Grieco et al., 2007], среднее из 8 ан.; *** – [Snachev et al., 2001].

Note. н/о – not analyzed; data from: * – [Zaccarini et al., 2004] (average of 2 analyses), ** – [Grieco et al., 2007] (average of 8 analyses), *** – [Snachev et al., 2001].

Западно-Саксейского проявления характерен резкий положительный пик платины при подчиненной роли палладия и низких содержаниях остальных ЭПГ. Сходное распределение установлено на проявлениях Бабай и Хамитовское из меланжевой зоны. Для Логиновского проявления характерно монотонное повышение хондрит-нормированных значений ЭПГ с максимальной величиной для палладия.

Хромититы корового разреза Нуралинского массива демонстрируют контрастные типы распределения платиноидов: 1) типичная «коровая кривая» с максимумом платины, полностью аналогичная распределению в Западно-Саксейском проявлении, установлена в Западно-Шерамбайском проявлении, 2) «отрицательный наклон» кривой с максимумом хондрит-нормированных значений для IPGE выявлен в Приозерном проявлении. В хромититах меланжа ведущая роль принадлежит IPGE при $Ru > Ir > Os$ и низких содержаниях Pt и Pd.

В целом, наиболее высокие содержания платиноидов отмечаются в хромититах Приозерного, Западно-Шерамбайского, Западно-Саксейского и Логиновского проявлений.

3.3. Минералогия ЭПГ офиолитовых хромититов

Платинометалльная минерализация установлена в хромититах проявлений, расположенных в мантийном и коровом разрезе офиолитовых комплексов, а также в хромититах зон меланжа обоих массивов (табл. 2).

В мантийном разрезе массива Крака МПГ установлены в следующих объектах: Шатран, Саксей, Верхне-сарангинское, Малый Башарт и им. Менжинского. Они представлены мельчайшими зернами твердых растворов тугоплавких платиноидов сложного состава, сульфидов ряда лаурит-эрликманит, аваруита с включениями самородного рутения и арсенидов никеля, меди и железа с примесями платины, палладия и иридия

(рис. 4). Размеры зерен обычно не превышают первых микрометров.

Значительно более представительными являются находки МПГ в хромититах верлит-клинопироксенитового комплекса массива Средний Крака (рис. 5). На Западно-Саксейском рудопроявлении преимущественным распространением пользуются твердые растворы состава Pt-Fe-Cu-(Ni) (около 70 %). Они представлены либо идиоморфными зернами размером 1–7 мкм, либо ксеноморфными более крупными сростками.

В некоторых случаях зафиксированы сростания упомянутых выше фаз Pt-Fe-Cu-(Ni) с сульфидом платины, обогащенным железом (куперитом?), иногда эти сростки окаймляются пирротином или пентландитом. Сульфид платины характеризуется вариациями соотношения сера / металлы и состава катионов, его выделения составляют около 25 % от общего количества зерен МПГ. Наряду с платиной, в составе минерала отмечено присутствие значимых количеств железа (от 2.33 до

23.19 мас. %) и небольших примесей меди (до 3.77 мас. %) и никеля (до 2.48 мас. %). Обогащенный медью сульфид платины обнаружен в тесном сростании с фазой состава Pt-Ir-Rh-As-S.

Другие выделения минералов ЭПГ в хромититах Западно-Саксейского проявления встречаются значительно реже описанных выше (5–10 % от общего количества) и представлены платиносодержащим пентландитом, минералами ряда лаурит-эрликманит, твердым раствором состава Os-Ir-Ru-Fe-Ni (гексаферрумом) и фазой состава Pt-Ni-Rh-Cu-Pd-As-Sb в виде мельчайшего включения в пентландите.

В хромититах Логиновского проявления обнаружены собственные минералы рутения, осмия, платины и палладия. Минералы изоморфного ряда лаурит-эрликманит образуют включения в хромите. В интерстициях хромшпинелидов встречены зерна платины, а также твердых растворов на основе Ni-Fe-Co, характеризующиеся неоднородным составом и включающие

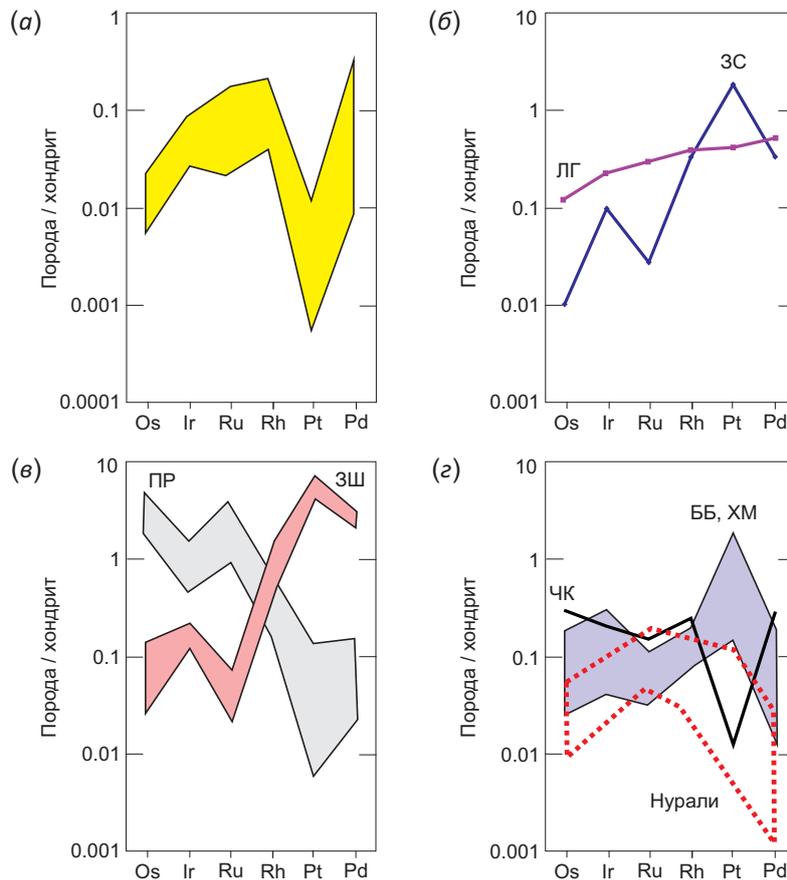


Рис. 3. Распределение элементов платиновой группы в хромититах Крака и Нурали по отношению к их концентрации в хондрите.

(а), (б) – массивы Крака: (а) – хромититы мантийного разреза, (б) – хромититы корового разреза; (в) – хромититы корового разреза Нуралинского массива; (г) – хромититы зон меланжа; концентрации элементов платиновой группы в хондрите С1 взяты из работы [McDonough, Sun, 1995]. ЛГ – Логиновское, ЗС – Западно-Саксейское, ПР – Приозерное, ЗШ – Западно-Шерамбайское, ЧК – Черноключенское, ББ – Бабай, ХМ – Хамитовское проявление.

Fig. 3. Chondrite-normalized patterns of PGE in chromitites of the Kraka and Nurali massifs.

(а), (б) – Kraka: (а) – mantle unit, (б) – crust unit; (в) – Nurali crust unit; (г) – mélange zones. PGE compositions of chondrite C1 after [McDonough, Sun, 1995]. ЛГ – Loginovskoe, ЗС – West Saksey, ПР – Priozyornoe, ЗШ – West Sherambay, ЧК – Cherny Klyuch, ББ – Babay, ХМ – Khamitovskoe.

Таблица 2. Химический состав минералов ЭПГ из хромититовых проявлений массивов Крака и Нурали (мас. %)

Table 2. Chemical compositions of PGE minerals from chromitite occurrences in the Kraka and Nurali massifs (wt. %)

№ п/п	Fe	Ni	Cu	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Pb	As	S	Сумма	Кристаллохимические формулы	Минерал
1	20.35	0.48	2.18	-	-	-	-	-	76.99	-	-	-	100.0	$Pt_{0.987}Fe_{0.908}Cu_{0.085}Ni_{0.02}$	тетраферроплатина
2	29.33	-	-	-	-	-	-	-	70.67	-	-	-	100.0	$Fe_{2.955}Pt_{2.045}$	н.о.
3	11.08	-	-	-	-	-	-	-	88.92	-	-	-	100.0	$Pt_{2.092}Fe_{0.908}$	железистая платина
4	11.25	-	1.80	-	-	-	-	-	86.95	-	-	-	100.0	$Pt_{1.982}Fe_{0.893}Cu_{0.125}$	железистая платина
5	2.33	-	2.31	-	-	-	-	-	81.86	-	-	13.50	100.0	$(Pt_{0.913}Fe_{0.091}Cu_{0.079})_{1.082}S_{0.918}$	куперит?
6	6.61	0.87	1.31	-	-	-	-	-	76.66	-	-	14.55	100.0	$(Pt_{0.785}Fe_{0.236}Cu_{0.041}Ni_{0.029})_{1.092}S_{0.908}$	куперит?
7	7.05	2.39	-	53.61	-	-	20.13	15.88	-	-	-	-	99.05	$Ru_{0.599}Fe_{0.142}Os_{0.120}Ir_{0.093}Ni_{0.046}$	гексаферрум
8	6.74	1.96	-	53.22	-	-	20.40	16.70	-	-	-	-	99.02	$Ru_{0.602}Fe_{0.138}Os_{0.123}Ir_{0.099}Ni_{0.038}$	гексаферрум
9	0.64	-	1.11	-	14.87	-	-	43.36	-	-	26.39	12.57	98.95	$(Ir_{0.592}Rh_{0.379}Cu_{0.045}Fe_{0.03})_{1.046}(S_{1.03}As_{0.923})_{1.953}$	ирарсит
10	0.67	-	-	-	9.63	-	-	51.52	-	-	24.78	11.55	98.15	$(Ir_{0.756}Rh_{0.263}Fe_{0.034})_{1.053}(S_{1.017}As_{0.931})_{1.948}$	ирарсит
11	1.06	-	-	31.05	-	-	24.06	8.70	-	-	-	32.93	97.79	$(Ru_{0.604}Os_{0.249}Ir_{0.089}Fe_{0.037})_{0.979}S_{2.021}$	лаурит
12	1.04	-	-	31.21	-	-	24.76	7.87	-	-	-	33.13	98.0	$(Ru_{0.604}Os_{0.255}Ir_{0.08}Fe_{0.036})_{0.976}S_{2.024}$	лаурит
13	-	-	-	9.01	2.63	-	57.27	2.3	-	-	-	28.79	100.0	$(Os_{0.681}Ru_{0.202}Rh_{0.058}Ir_{0.027})_{0.967}S_{2.033}$	эрликманит
14	-	-	-	-	-	45.95	-	-	-	54.05	-	-	100.0	$Pd_{3.115}Pb_{1.885}$	плюмбопалладинит
15	-	-	1.04	57.28	2.99	-	-	-	-	-	-	38.68	100.0	$(Ru_{0.934}Rh_{0.048}Cu_{0.027})_{1.01}S_{1.99}$	лаурит
16	1.07	-	1.54	55.42	1.90	-	-	-	-	-	-	40.06	100.0	$(Ru_{0.884}Cu_{0.039}Rh_{0.03}Fe_{0.031})_{0.98}S_{2.02}$	лаурит
17	1.66	-	4.89	51.66	1.55	-	-	-	-	-	-	40.25	100.0	$(Ru_{0.812}Cu_{0.121}Fe_{0.047}Rh_{0.024})_{1.01}S_{1.99}$	лаурит
18	-	-	-	4.87	0.61	-	34.88	56.26	3.23	-	-	-	99.85	$Ir_{0.535}Os_{0.335}Ru_{0.088}Pt_{0.03}Rh_{0.011}$	иридий осмиевый
19	-	-	-	5.22	0.80	-	46.86	45.84	0.42	-	-	-	99.14	$Os_{0.451}Ir_{0.436}Ru_{0.094}Rh_{0.014}$	осмий рутениево-иридиевый
20	-	-	-	6.65	0.45	-	54.28	38.04	-	-	-	-	99.42	$Os_{0.516}Ir_{0.358}Ru_{0.119}Rh_{0.008}$	осмий рутениево-иридиевый
21	2.27	-	4.63	-	0.23	19.86	-	-	70.69	-	-	1.49	99.7	$Pt_{0.55}Pd_{0.28}Cu_{0.11}Fe_{0.06}$	палладистая платина
22	2.33	-	4.38	-	0.68	17.42	-	-	73.11	-	-	1.96	100.0	$Pt_{0.57}Pd_{0.25}Cu_{0.11}Fe_{0.06}Rh_{0.01}$	палладистая платина
23	17.95	1.58	1.65	-	1.31	3.52	-	-	72.58	-	-	1.17	99.94	$Pt_{0.47}Fe_{0.41}Pd_{0.04}Ni_{0.03}Cu_{0.03}Rh_{0.02}$	железистая платина
24	19.15	1.36	1.65	-	1.85	3.85	-	-	70.91	-	-	1.80	100.0	$Pt_{0.45}Fe_{0.42}Pd_{0.05}Ni_{0.03}Cu_{0.03}Rh_{0.02}$	железистая платина

Примечание. 1–14 – массив Крака, 15–24 – массив Нурали; часть данных заимствована из работ [Saveliev et al., 2014, 2015].

Note. 1–14 – Kraka, 15–24 – Nurali; some data from [Saveliev et al., 2014, 2015].

значимые количества ЭПГ, в частности иридия, платины, осмия, родия и рутения.

Наряду с наиболее широко распространенными интерметаллидами платиноидов с Fe, Cu, Ni, были встречены соединения с ртутью и свинцом (рис. 5). Плюмбопалладинит встречен совместно с пентландитом, пирротинном, железистым никелем и магнетитом в составе сложных псевдоморфоз по неизвестному минералу, который образует идиоморфные и округлые выделения в хромите. В некоторых случаях отмечаются тесные сростания плюмбопалладинита, потарита и платины.

В хромититах зон меланжа платиноиды обнаружены в составе нескольких минеральных фаз. Твердые растворы рутения, осмия и иридия встречены в виде отдельных зерен «кристалломорфных» очертаний размером 2–15 мкм внутри серпентиновых выделений в хромитите, непосредственно на контакте с хромитом либо внутри зерен хромита, но всегда с небольшой серпентиновой оторочкой. Сульфиды ряда лаурит – эрликманит встречены в виде включений непосредственно в зернах хромита, для них характерен размер в первые микроны. В составе минерала концентрация рутения (28–31 мас. %) несколько выше, чем осмия (24–25 мас. %), отмечается присутствие иридия в количестве 7–9 %. Наиболее крупные выделения сульфоарсенида, близкого по составу к ирарситу, наблюдаются на границе серпентинового включения и хромита (до 20–25 мкм).

В хромититах мантийного разреза массива Нурали ПММ обнаружена на месторождениях Мокрая Яма [Saveliev et al., 2017] и Нуралинское (неопубликованные материалы Г.Г. Дмитренко). Преимущественным распространением здесь пользуются сульфиды ряда лаурит-эрликманит и твердые растворы тугоплавких платиноидов, часто с железом и никелем (гексаферрум). Часто эти минералы встречаются во взаимных сростаниях (рис. 6, а, б), размер выделений не превышает первых микрометров.

Наиболее обильная ПММ на массиве Нурали приурочена к небольшим хромититовым телам среди пород верлит-пироксенитового комплекса и неоднократно описана в литературе [Moloshag, Smirnov, 1996; Zaccarini et al., 2004; Grieco et al., 2007; Saveliev et al., 2017; и др.]. Для двух рудопоявлений с высокими концентрациями ЭПГ характерна различная геохимическая специализация и резко отличающиеся парагенезисы МПГ. Существенно тугоплавкая ПММ в хромититах Приозерного рудопоявления представлена интерметаллидами Os–Ru и Ni–Fe–Ir–Ru–Os состава, сульфидами рутения и осмия (лаурит-эрликманит), родиевым пентландитом, а также оксидами Ru–Os–Ir–Fe (рис. 6). Вкрапленные мелкозернистые хромититы Западно-Шерамбайского рудопоявления содержат обильную вкрапленность минералов платины и палладия: интерметаллидов системы Pt–Pd–Cu, палладистой платины, железистой платины (рис. 6, в, г), сульфидов

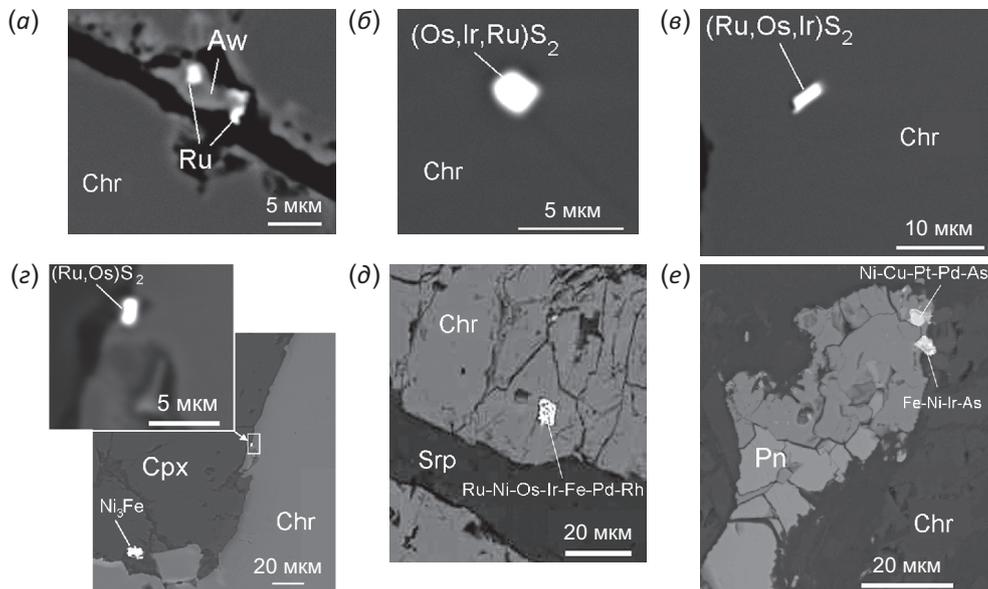


Рис. 4. Выделения минералов платиновой группы в хромититах мантийного разреза массивов Крака.

(а) – включения самородного рутения в аварuite (Саксей); (б, в) – включение лаурита (RuS_2-OsS_2) в хромите (Шатран); (г) – лаурит на границе клинопироксена и хромита (Верхнесарангинское месторождение); (д) – включение интерметаллида в хромите (Малый Башарт); (е) – выделения арсенидов с примесями ЭПГ в пентландите месторождения им. Менжинского. Aw – аварuite, Chr – хромит, Cpx – клинопироксен, Pn – пентландит, Srp – серпентин.

Fig. 4. PGM inclusions in chromitites of the mantle unit, Kraka massifs.

(а) – native ruthenium in awaruite (Saksey), (б, в) – laurite-erlichmanite (RuS_2-OsS_2) in chromite (Shatran), (г) – laurite between chromite and clinopyroxene (Verkhne-Saranginskoe deposit), (д) – intermetallic inclusion in chromite (Maly Bashart), (е) – Fe-Ni arsenides with PGE impurities in pentlandite (Menzhinsky). Aw – awaruite, Chr – chromite, Cpx – clinopyroxene, Pn – pentlandite, Srp – serpentine.

платиноидов (куперита (PtS), лаурита-эрликманита), сплавов Pt-Pd-Fe-Cu-Ni, потарита (PdHg), Pt-Pd-содержащих аваруита и вайрауита (CoFe).

Платинометаллическая минерализация в последние годы также установлена в многочисленных мелких про-

явлениях, приуроченных к серпентинитовому меланжу Нуралинского массива: Шерамбайском и в трех Сарусаккульских [Saveliev et al., 2019]. Мельчайшие выделения МПГ часто находятся в срастаниях с сульфидами и сульфохлоридами никеля (миллеритом, хизлевудитом,

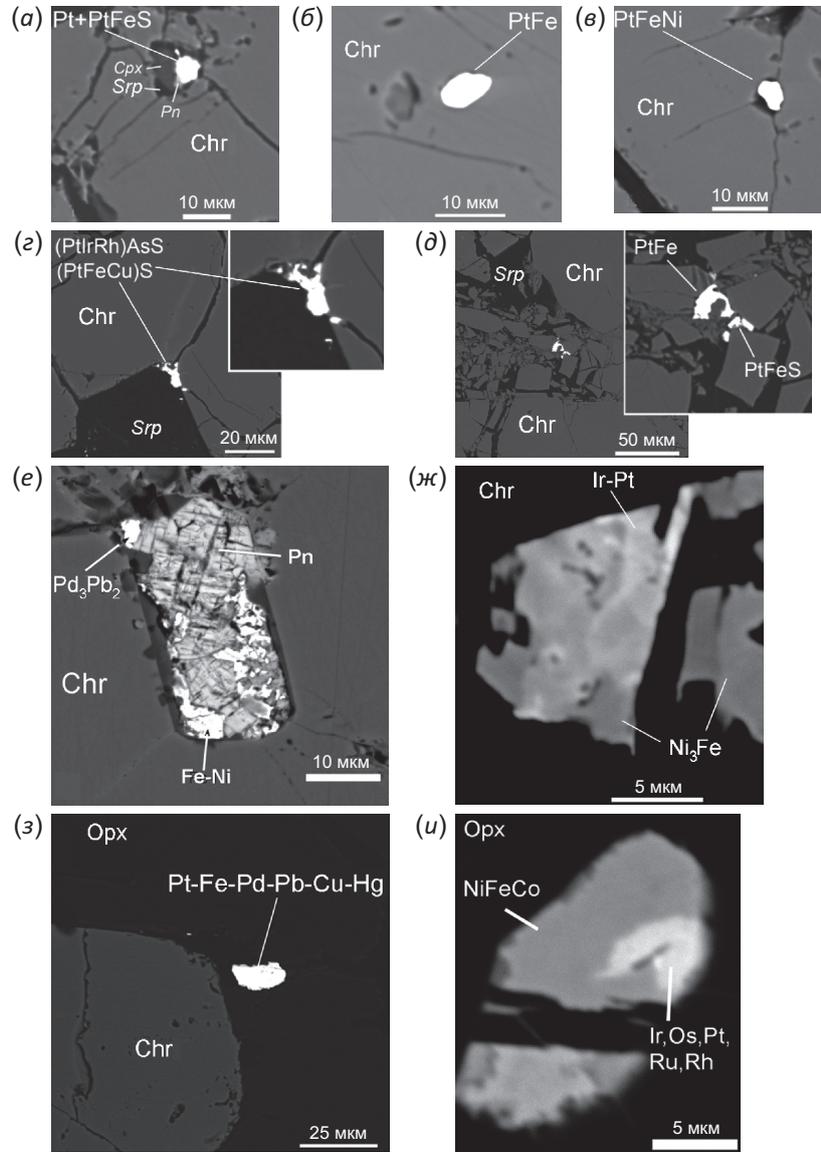


Рис. 5. Выделения минералов платиновой группы в хромититах переходного мантийно-корового верлит-клинопироксенитового комплекса массива Средний Крака.

(а) – сросток куперита? (PtFeS) и платины в силикатном включении в зерне хромита; (б) – включение железистой платины в хромите; (в) – выделение железистой платины в силикатном включении в хромите; (з) – сросток МПГ на границе силикатного включения и зерна хромита; (д) – ксеноморфные выделения куперита? и железистой платины в силикатном цементе раздробленных зерен хромита ((а-д) – Западно-Саксейское проявление); (е) – выделение плумбопалладинита (Pd₃Pb₂), пентландита и аваруита в псевдоморфозе по неизвестному сульфиду внутри зерна хромита (по [Saveliev et al., 2014]); (ж) – участок зерна аваруита, обогащенный иридием и платиной; (з) – ЭПГ-содержащий интерметаллид в ортопироксене близ зерна хромита; (u) – участок зерна аваруита, обогащенный платиноидами ((е-u) – Логиновское проявление). Оpx – ортопироксен, остальные обозначения см. в подписи к рис. 4.

Fig. 5. PGM inclusions in chromitites of the transitional mantle-crust wehrlite-clinopyroxenite complex of the Central Kraka massif. (а) – cooperite (?) (PtFeS)-platinum intergrowth in silicate inclusion in chromite grain; (б) – Fe-bearing platinum inclusion in chromite; (в) – Fe-bearing platinum in silicate inclusion in chromite; (з) – complex PGM intergrowth between silicate and chromite grain; (д) – xenomorphic intergrowths of cooperite (?) and Fe-bearing platinum in silicate cement of crushed chromite grains ((а-д) – West Saksey); (е) – plumbopalladinite (Pd₃Pb₂), pentlandite and awaruite after unknown sulfide in chromite grain (after [Saveliev et al., 2014]); (ж) – awaruite grain, patchy enriched in Ir and Pt; (з) – PGE-containing intermetallic compound in orthopyroxene near chromite grain; (u) – awaruite grain partly enriched in PGE ((е-u) – Loginovskoe). Opx – orthopyroxene; see other signs in the caption of Fig. 4.

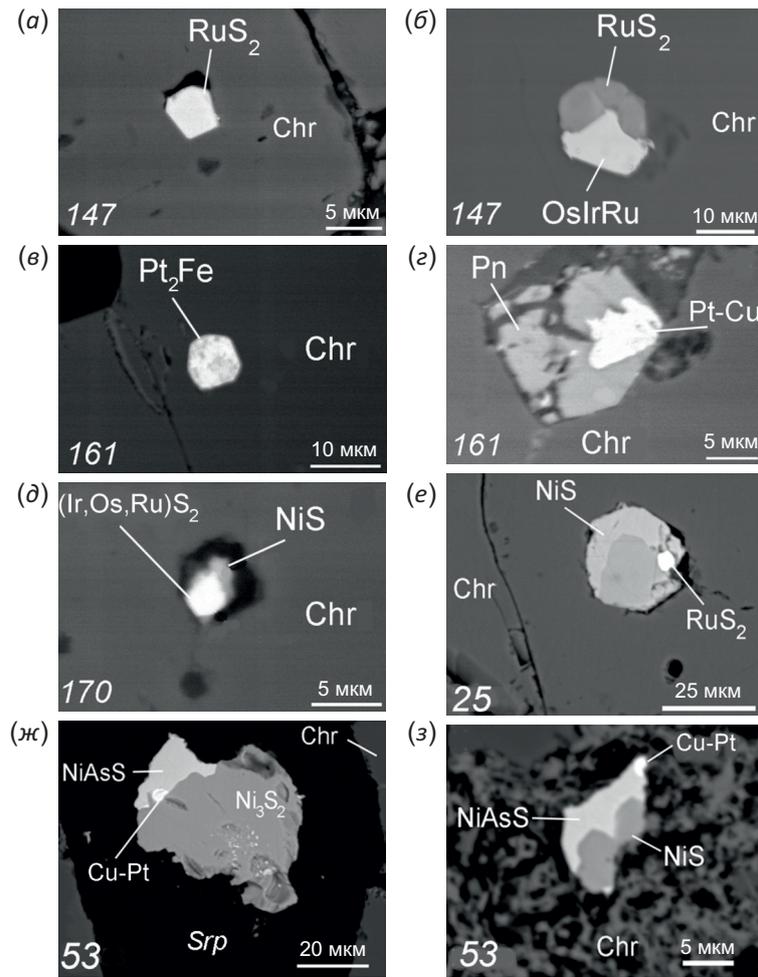


Рис. 6. Выделения минералов платиновой группы в хромититах Нуралинского массива. (а) – лаурит (RuS_2) в зерне хромита; (б) – сросток лаурита и рутениридосмина в хромите; (в) – включение железистой платины в хромите; (г) – сросток медистой платины с пентландитом в хромите; (д) – сросток сульфида IPGE с миллеритом в хромите; (е) – включение лаурита в миллерите; (ж) – выделение платинистой меди на границе герсдорфита и хизлевудита; (з) – выделение платинистой меди в сростке миллерита и герсдорфита. Цифры в нижних левых углах изображений соответствуют номерам рудопроявлений на геологической схеме (см. рис. 1).

Fig. 6. PGM inclusions in chromitites of the Nurali massif. (а) – laurite (RuS_2) in chromite grain; (б) – laurite–rutheniridosmine intergrowth in chromite; (в) – Fe-bearing platinum inclusion in chromite; (г) – Cu-bearing platinum-pentlandite intergrowth in chromite; (д) – IPGE sulfide-millerite intergrowth in chromite; (е) – laurite inclusion in millerite; (ж) – Pt-bearing copper grains between gersdorffite and heazlewoodite; (з) – Pt-bearing copper in millerite-gersdorffite intergrowth. Left bottom of each panel: numbers correspond to those in the schematic geological map (see Fig. 1).

герсдорфитом) (рис. 6, е–з). В составе МПГ преобладают твердые растворы тугоплавких платиноидов, реже встречаются минералы платины, родия и самородная медь с существенной примесью платины и палладия. Необходимо отметить, что все эти проявления расположены в области питания золотоносных россыпей верховьев долины р. Миасс, содержащих платиновые минералы [Zaykov et al., 2016].

4. СУЛЬФИДНО-ПЛАТИНОНОСНАЯ УЛЬТРАБАЗИТ-БАЗИТОВАЯ ФОРМАЦИЯ ЮЖНОГО УРАЛА (ХУДОЛАЗОВСКИЙ КОМПЛЕКС)

4.1. Краткая геологическая характеристика

Расслоенные базит-ультрабазитовые комплексы, являющиеся главным источником Ni, Pd и Pt в мире,

обычно объединяют один крупный и/или несколько средних по размерам массивов, обладающих дифференцированным внутренним строением (Скергаард, Норильский, Йоко-Довыренский, Мончеплутон) [Naldrett, 2003]. Худолазовский комплекс (U–Pb изотопный возраст 325–329 млн лет) состоит из более чем 50 мелких интрузий, отдельные группы которых (однородные штоки роговообманковых плагиоперидотитов, дифференцированные хонолиты плагиоперидотит-троктолит-габбрового состава, однородные габброидные хонолиты) соотносятся с соответствующими породами типичных расслоенных серий [Salikhov et al., 2012; Rakhimov, 2017]. Большая часть массивов локализована в пределах Худолазовской мульды (рис. 7), характеризующейся асимметричным пологим строением.

Интрузии приурочены к системе разрывных нарушений северо-восточного простирания, пересекающей мульду и протягивающейся далеко за ее пределами [Salikhov, Pshenichny, 1984].

Главные типы пород худолазовского комплекса – оливин-роговообманковые, оливиновые и безоливиновые габбро, роговообманковые плагиоперидотиты и троктолиты. Однако большая часть пород оказалась преобразована гидротермально-метасоматическими процессами, что отразилось и на сульфидных парагенезисах [Rakhimov et al., 2019]. Рудные тела линзовидной формы, представленные прожилково-вкрапленной минерализацией пентландит-халькопирит-пирротинового и халькопирит-пиритового состава, были

вскрыты скважинами разведочного бурения преимущественно в оливиновых кумулатах донных частей интрузий [Buchkovsky et al., 1974; Salikhov, Pshenichny, 1984]. Известно 15 рудопроявлений, из которых наиболее крупным считается Северо-Бускунское, где мощность рудного тела составляет до 26.3 м, а размеры в плане до (25–60)×600 м. Концентрации рудных элементов в нем достигают: Ni – 1.30 % (в среднем 0.45 %), Cu – 1.10 % (в среднем 0.37 %) и Co – 0.20 % (в среднем 0.02 %). Размеры отдельных сульфидных сростков достигают 1–3 см (рис. 8, а). Из всех рудопроявлений разрабатывалось только Сунар-Узякское, где до 1940-х гг. велась добыча меди из окисленных Cu–Ni руд [Buchkovsky et al., 1974].

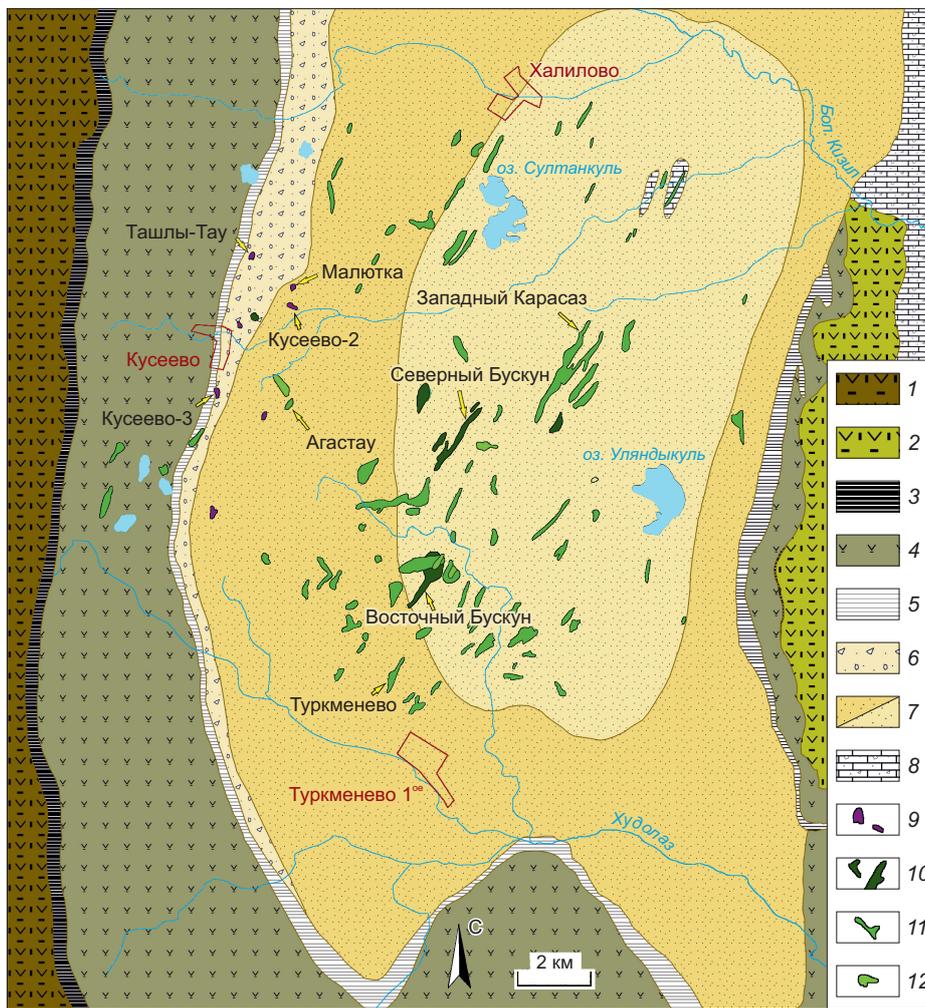


Рис. 7. Схематическая геологическая карта Худолазовской мульды (по [Rakhimov, 2020b]).

(1)–(8) – стратифицированные вулканогенно-осадочные отложения: 1 – ирендыкской свиты (D_2ef_1), 2 – карамалыташской свиты (D_2ef_2), 3 – ярлыкаповской свиты (D_2ef_2), 4 – улутауской свиты ($D_{2-3}zv-f$), 5 – мукасовской свиты (D_3f), 6 – биягодинской свиты (D_3f-fm), 7 – нижней подсвиты (D_3fm_{1-2}) / верхней подсвиты ($D_3fm_2-C_1t_1$) зилаирской свиты, 8 – березовской свиты (C_1t-v); (9)–(12) – массивы худолазовского комплекса: 9 – перидотиты и габбро-перидотиты, 10 – оливиновые габбро, 11 – безоливиновые габбро, 12 – диориты.

Fig. 7. Schematic geological map of Khudolaz trough (after [Rakhimov, 2020b]).

(1)–(8) – stratified volcanogenic-sedimentary deposits: 1 – Irendyk suite (D_2ef_1), 2 – Karamalytash suite (D_2ef_2), 3 – Yarlykapovo suite (D_2ef_2), 4 – Ulutau suite ($D_{2-3}zv-f$), 5 – Mukasovo suite (D_3f), 6 – Biyagoda suite (D_3f-fm), 7 – Lower subsuite (D_3fm_{1-2}) / upper subsuite ($D_3fm_2-C_1t_1$) of Zilair suite, 8 – Beryozovskiy suite (C_1t-v); (9)–(12) – massifs of the Khudolaz complex: 9 – peridotites and gabbro-peridotites, 10 – olivine gabbro, 11 – olivine-free gabbro, 12 – diorites.

4.2. Геохимия ЭПГ худолазовского комплекса

Существующие единичные определения концентраций Pt и Pd (Pt до 0.4 г/т, Pd до 0.9 г/т [Buchkovsky et al., 1974; Salikhov et al., 2001]) в сульфидных рудах Северо-Бускунского рудопроявления не позволяют понять закономерности их распределения. Авторами настоящей статьи выполнены дополнительные анализы ЭПГ в интрузивных и вмещающих (туфопесчаники биягодинской и зилаирской свит верхнего девона [Maslov, Artyushkova, 2010]) породах. Значимые содержания ЭПГ были выявлены в сульфидсодержащих интрузивных и контактово-метасоматизированных вмещающих породах (табл. 3), при этом спектры их распределения довольно близки (рис. 9). Во всех пробах наблюдается превышение Pd над Pt и в основном 0.1–уровень концентрации палладия относительно хондрита, тогда как концентрации платины сильно варьируются (0.001–0.100). Варьируются и нормированные содержания Rh, а концентрации Ru и Ir во всех пробах близки к значению 0.01 от хондритового стандарта.

Наибольшие суммарные концентрации ЭПГ в интрузивных породах наблюдаются в обр. 3484 (малоизмененный сульфидизированный роговообманковый плагиоферидотит) из рудного тела массива Малютка (0.19 г/т Pd и 0.09 г/т Pt, табл. 3). В сильно измененном образце 3466+3467 из того же рудного тела концентрации ЭПГ в несколько раз ниже (0.08 г/т Pd и 0.02 г/т Pt). В сравнении с этим рудным образцом платиноидами обогащен обр. 3492 – метасоматизированное эндоконтактовое габбро из подрудного горизонта (0.16 г/т Pd и 0.05 г/т Pt), содержащее незначительную халькопирит-пиритовую вкрапленность (~ 0.1 об. %). При этом Pd/Pt отношение возрастает от 2 до 33.

Максимальная концентрация Rh (0.07 г/т) установлена в образце K₁₈-114 из гидротермально и гипергенно

измененных пород верхней части массива Ташлы-Тау. Эти породы содержат псевдоморфозы лимонита по сульфидам, обогащенные Ni и Cu. Отметим, что кварцевые жилы из ороговикованных туфопесчаников экзоконтактной зоны массива Ташлы-Тау содержат лимонитовые

Таблица 3. Концентрации ЭПГ в рудоносных породах массивов худолазовского комплекса и во вмещающих их породах по данным ИСП МС (мг/т)

Table 3. PGE concentrations in ore-bearing rocks of the Khudolaz complex and host rocks (ICP MS data, ppb)

№	Образец	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Pd/Pt
1	K ₁₈ -111*	11	3.9	54	<2	<2	>27
2	3466+3467	12	2.2	80	<2	17	4.7
3	3484	8.9	3.4	190	3.3	92	2.1
4	3492	9.1	2.1	160	2.6	4.9	32.6
5	3494	9.2	<2	46	<2	2.8	16.4
6	K ₁₈ -114*	12	72	71	<2	8.5	8.3
7	3777	9.6	3.8	64	<2	11	5.8
8	3783	8.8	<2	74	<2	2.5	29.6
9	3789	10	3	700	5	81	8.6
10	K ₁₈ -113a*	9	<2	69	2.9	8.3	8.3
11	K ₁₈ -113b*	9.6	<2	61	2	15	4.1
12	3681	5.9	<2	82	<2	4.9	16.7
13	K ₁₈ -60*	8.7	17	120	<2	2.1	57.1

Примечание. * – образцы из обнажений, остальные – из керна; 1–4 – массив Малютка, 5 – породы экзоконтакта массива Малютка, 6–8 – массив Ташлы-Тау, 9–11 – породы экзоконтакта массива Ташлы-Тау, 12 – массив Северный Бускун, 13 – массив Агастау.

Note. * – samples from outcrops; other – core samples. Massifs: 1–4 – Malyutka; 5 – Malyutka exocontact zone; 6–8 – Tashly-Tau; 9–11 – Tashly-Tau exocontact zone; 12 – Severnyy Buskun; 13 – Agastau.

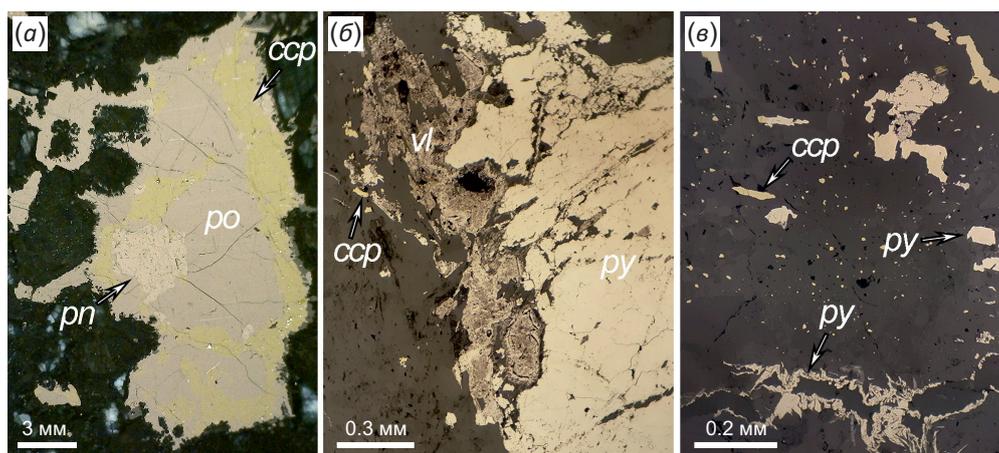


Рис. 8. Сульфиды в рудоносных массивах худолазовского комплекса (отраженный свет).

(а) – первичное пентландит-халькопирит-пирротитовое выделение; (б) – виоларит-пиритовая псевдоморфоза с остаточным халькопиритом; (е) – переотложенные агрегаты пирита с халькопиритом. Сср – халькопирит, pn – пентландит, po – пирротин, py – пирит, vl – виоларит.

Fig. 8. Sulfides in ore-bearing massifs of the Khudolaz complex (reflected light).

(а) – primary pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite aggregate; (б) – violarite-pyrite pseudomorph with residual chalcopyrite; (е) – re-precipitated pyrite with chalcopyrite. Сср – chalcopyrite, pn – pentlandite, po – pyrrhotite, py – pyrite, vl – violarite.

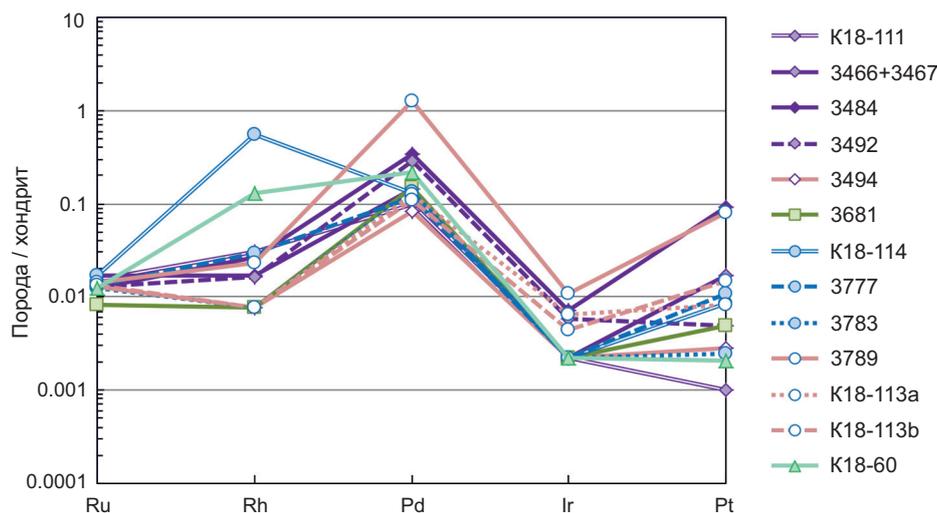


Рис. 9. Нормированная диаграмма распределения ЭПГ в рудоносных интрузиях худолазовского комплекса и во вмещающих породах (из табл. 3). Состав хондрита по [McDonough, Sun, 1995].

Fig. 9. Normalized PGE diagram for ore-bearing intrusions of the Khudolaz complex and host rocks (data from Table 3). Chondrite composition from [McDonough, Sun, 1995].

псевдоморфозы по сульфидам, в которых методом EDXS были определены Pd (до 0.32 мас. %), Rh (до 0.03 %), Cu (до 3.60 %), Ni (до 0.70 %) [Rakhimov et al., 2020]. Максимальная концентрация палладия (0.70 г/т) зафиксирована в обр. 3789 – сульфидизированном роговике из ближней экзоконтактовой зоны массива Ташлы-Тау, в котором были выявлены собственные минералы палладия и палладиистый кобальтин [Rakhimov et al., 2020].

4.3. Геохимия ЭПГ сульфидов худолазовского комплекса

Гидротермально-метасоматические процессы привели к частичному или полному растворению и замещению первичных сульфидов (пирротина, халькопирита, пентландита) (см. рис. 8, б), а также переотложению новых сульфидов (пирита, халькопирита) (см. рис. 8, в). Пирротин и пентландит были замещены пиритом и виоларитом соответственно, халькопирит обычно замещен вторичными силикатами (хлоритом, амфиболом, альбитом, кварцем). Вторичные процессы привели к уменьшению первичных размеров сульфидных агрегатов. В табл. 4 представлены результаты анализа ЛА ИСП МС перечисленных сульфидов.

Пирротин в слабоизмененных или неизмененных сульфидных агрегатах содержит умеренные примеси Ni и Co и низкое количество ЭПГ и халькогенидов (Te, As, Bi, Sb), являющихся минералообразующими лигандами в МПГ. Пирит, псевдоморфно замещающий пирротин (py_1), в целом наследует геохимические особенности последнего. При этом в пирите наблюдается увеличение средних содержаний Ni и Co, а также снижение концентраций ЭПГ и ряда халькофильных элементов, особенно Te. Величина Te/Sb резко падает – с 278 до 4. Переотложенный пирит (py_2) характеризуется принципиально иными геохимическими особенностями:

концентрации Ni и Co в нем примерно в 30 раз ниже, чем в py_1 , а содержания Cu, Zn, As, Sb, Hg, Pb, Sn, Te, Pt, Au возрастают.

В халькопирите из первичных агрегатов ($ссп_1$) также отмечаются низкие содержания ЭПГ и халькофильных элементов. Переотложенный халькопирит ($ссп_2$) более обогащен Co, Sb, Ag, Au, Hg, Pb, Bi, но имеет низкие концентрации ЭПГ (кроме Pt), As, Se, Te. Величина Te/Sb снижается с 380 до 3.

Пентландит характеризуется наибольшими концентрациями ЭПГ среди сульфидов, а содержания халькогенидов в них схожи. В виоларите, замещающем пентландит, концентрации ЭПГ понижены, но повышаются содержания таких халькофильных элементов, как Sb, Au, Hg, Pb, Bi. Виолариту также свойственно более высокое количество Co в сравнении с замещаемым пентландитом. Величина Te/Sb в среднем снижается в 50 раз – со 100 до 2.

4.4. Минералогия ЭПГ худолазовского комплекса

Платинометалльная минерализация была выявлена в шести массивах худолазовского комплекса (Кусеево-2, Кусеево-3, Ташлы-Тау, Малютка, Северный Бускун, Западный Карасаз) (см. рис. 7). Во всех из них ПММ практически идентична. Минералы ЭПГ обычно встречаются в виде субмикронных (до 14 мкм) включений изометричного и призматического облика в сульфидах, редко – в окосульфидной силикатной матрице. Из минералов палладия были обнаружены майчнерит ($PdBiTe$ и $Pd(Bi, Sb)Te$), фрудит ($PdBi_2$), меренскиит ($PdTe_2$) и Pd–Pt–Te–Bi, фазы, близкие к меренскииту и мончеиту, садбериит ($PdSb$) и боровскит (Pd_3SbTe_4), платины – сперрилит ($PtAs_2$), мончеит ($Pt(Te, Bi)_2$). Важнейшей особенностью их распределения является приуроченность Sb-содержащих фаз к измененным или вторичным сульфидам, а, соответственно, бессурьмянистые

Таблица 4. Средние концентрации сидерофильных и халькофильных элементов в сульфидах худолазовского комплекса по данным ЛА ИСП МС (г/т)

Table 4. Average concentrations of siderophile and chalcophile elements in sulfides of the Khudolaz complex (LA ICP MS data, ppm)

Элемент	po n=29	py ₁ n=10	py ₂ n=7	ссп ₁ n=26	ссп ₂ n=3	pn n=19	vl n=11
Co	138	330	10	1.2	3	14900	24470
Ni*	7200	9300	334	55	53	323400	289520
Cu*	8	5	11	343590	339800	40	23
Zn	7	6	10	499	395	4	58
As	15	14	15	64	18	123	69
Se	80	60	13	63	37	61	72
Ru	0.03	<	<	<	<	0.05	<
Rh	0.01	<	<	0.02	<	0.05	0.02
Pd	0.01	<	<	0.03	<	4	0.5
Ag	5	0.2	0.08	27	93	3	4
Cd	0.04	<	<	38	13	2	0.2
In	0.02	<	0.04	1.2	0.7	0.01	<
Sn	0.9	0.09	2	1.0	1.5	0.6	1.7
Sb	0.03	0.03	0.20	0.05	0.50	0.07	0.80
Te	9	0.1	0.7	19	1.7	7	1.7
Os	0.04	<	<	0.02	<	0.03	<
Ir	0.03	<	<	0.03	<	0.02	0.03
Pt	0.01	<	0.06	0.05	0.08	0.10	0.03
Au	0.03	<	0.2	0.04	0.2	0.06	1.4
Hg	0.3	0.3	2.4	2.3	13	0.4	7
Pb	20	1	2.3	7.2	10	6	48
Bi	0.6	0.3	<	0.5	1.2	0.4	9.0
Te/Sb	278	4	4	380	3	100	2

Примечание. * – Ni в пентландите и виоларите, Cu в халькопирите и вся сера даны из результатов микронзондовых определений; обозначения минералов см. в подписи к рис. 8; < – ниже предела обнаружения.

Note. * – Ni in pentlandite and violarite, Cu in chalcopyrite, and sulfur contents according to EPMA data; abbreviated names of minerals – see the caption to Fig. 8; < (value) – below limit of detection.

МПП встречаются только в первичных сульфидах. Изучено около 50 зерен МПП, которые чаще всего локализованы в халькопирите и пирротине.

По типу структурного контроля локализации зерен МПП выделены группы: 1) в однородных зернах сульфидов без видимых дефектов структуры или фазовых переходов в них (рис. 10, а, б); 2) на границах минералов или в ламелях распада сульфидных твердых растворов (рис. 10, в, г); 3) в трещинах и продуктах замещения сульфидов (рис. 10, д, е, з, и). На рис. 10, г, показано зерно фрудита, приуроченное к ламели троилита в пирротине. На рис. 10, е, представлено зерно Sb-майчнерита, расположенное, с одной стороны, в трещине, с другой – на продолжении проекции ламели халькопирита

в пирротине. Во вторичных сульфидах или в силикатной матрице, заместившей первичные сульфиды, МПП были встречены в единичных случаях (рис. 10, з, и).

Среди изученных ассоциаций МПП наиболее распространены минералы системы Pd–Pt–Te–Bi–As–(Sb) с трехатомной кристаллохимической формулой. Среди них часто определяются нестехиометричные фазы, иногда содержащие Ag, Pb и другие халькофильные элементы, которые, вероятно, представляют собой в одних случаях наноразмерные сростания совместно кристаллизующихся минералов, в других – сложно диагностируемые структуры распада халькогенидных твердых растворов. К примеру, на рис. 10, ж, представлен сросток гессита со сперилитом. В табл. 5 приведены характерные составы МПП в породах худолазовского комплекса.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Охарактеризованные выше особенности ПММ хромитиноносных и сульфидоносной магматических формаций показывают, что ассоциации МПП даже в коровой части хромитиноносных офиолитов кардинально различаются с ассоциациями худолазовского комплекса, несмотря на преимущественное развитие минералов палладия и платины. Это связано с существенными различиями в источниках и механизмах формирования ПММ в них. При этом массивы Крака и худолазовского комплекса в настоящее время расположены всего в 60 км друг от друга, но приурочены к разным структурным зонам – Зилаирской к западу от Уралтау и к Западно-Магнитогорской – к востоку, соответственно.

5.1. Геодинамическая обстановка формирования платиноносных формаций

Геодинамическая интерпретация обстановки формирования ПММ офиолитов неразрывно связана с таковой хромититовых залежей, внутри которых она локализуется, и вмещающих ультрамафитов. В геотектонической истории формирования офиолитов четко выделяются два этапа. Первый этап связан с высокотемпературным пластическим течением перидотитов верхней мантии, их частичным плавлением и реакцией с просачивающимися расплавами [Ringwood, 1981; Kelemen et al., 1992; и др.]. На данном этапе были сформированы хромититы «мантийного разреза» как реститы, подверженные реоморфической дифференциации [Saveliev, 2018], либо как продукты взаимодействия реститов и расплавов базальтового или бонинитового состава [González-Jimenez et al., 2014]. На этом же этапе были сформированы небольшие хромититовые тела переходного мантийно-корового комплекса как дифференциаты мобилизованных из мантии расплавов [Coleman, 1979].

Второй этап связан с тектоническим выведением массивов в верхние части земной коры в твердом состоянии. Он сопровождался дезинтеграцией ультрамафитов и образованием серпентинитовых меланжей вдоль их контактов. С этим этапом связано преобразование первичных хромититовых тел, образованных

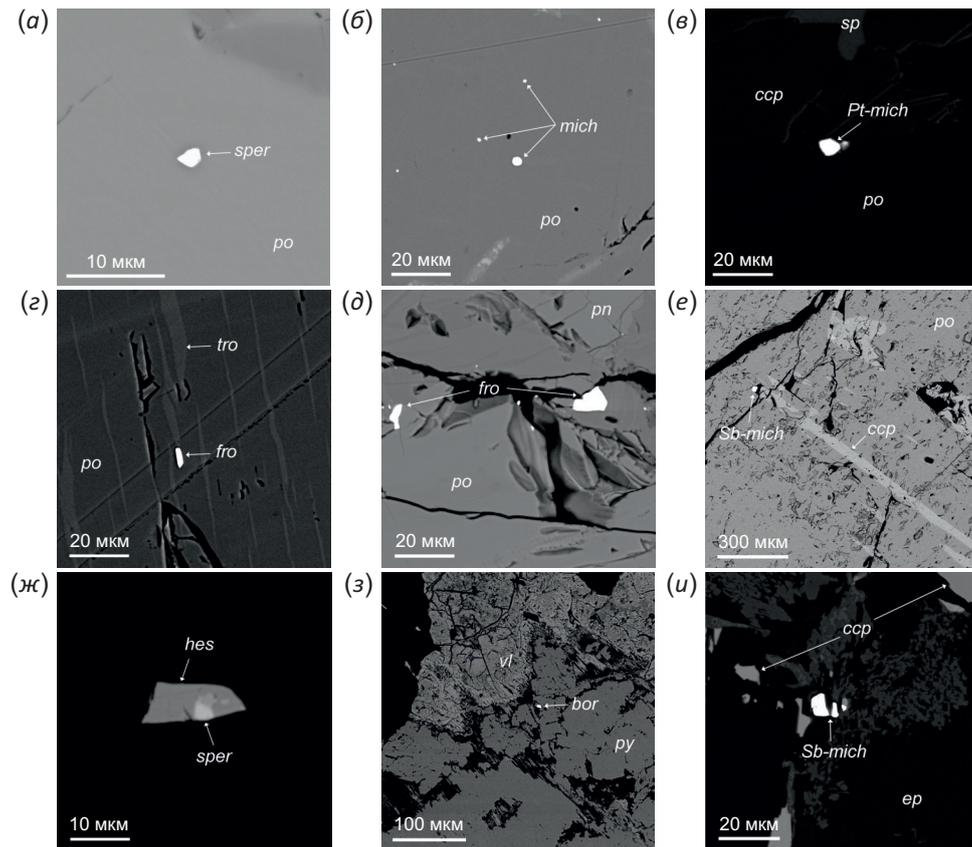


Рис. 10. BSE-изображения зерен МПГ в рудоносных породах худолозовского комплекса.

(а) – сперрилит в пирротине; (б) – вкрапленность майчнерита в пирротине; (в) – майчнерит на границе халькопирита и пирротина; (г) – зерно фрудита вдоль ламели троилита; (д) – вкрапленность фрудита вдоль трещины в пирротине; (е) – зерно Sb-майчнерита в трещине в пирротине; (ж) – сростание гессита со сперрилитом; (з) – зерно боровскита в пирите; (и) – вкрапленность Sb-майчнерита во вторичной силикатной матрице. Bor – боровскит, ep – эпидот, fro – фрудит, hes – гессит, mich – майчнерит, sper – сперрилит, остальные обозначения см. в подписи к рис. 8. Часть фото представлена в статье [Rakhimov et al., 2018].

Fig. 10. BSE images of PGM grains in ore-bearing rocks of the Khudolaz complex.

(a) – sperrylite in pyrrhotite; (b) – michenerite impregnation in pyrrhotite; (c) – michenerite between chalcopyrite and pyrrhotite; (d) – froodite grain along the troilite lamella; (e) – Sb-michenerite grain in the crack in pyrrhotite; (ж) – hessite-sperrylite intergrowth; (з) – borovskite grain in pyrite; (и) – Sb-michenerite impregnation in the secondary silicate matrix. Bor – borovskite; ep – epidote, fro – froodite; hes – hessite; mich – michenerite; sper – sperrylite; see other signs in the caption to Fig. 8. Several images from [Rakhimov et al., 2018].

на первом этапе, и возможная ремобилизация элементов платиновой группы.

Геохимические исследования ультрамафитов и хромититов массивов Крака и Нурали показали, что они являются представителями «офиолитов лерцолитового типа» [Nicolas et al., 1971; Savelieva, 1987]. Геодинамическая интерпретация первого этапа для данных массивов связывается большинством исследователей с корневой зоной рифтогенной обстановки, переходной от континентального к океаническому рифтогенезу [Savelieva, 1987; Snachev et al., 2001; и др.].

Второй этап связывается с коллизией, в результате которой блоки мантийного материала были тектонически перемещены в верхние горизонты коры в различных структурных зонах Уральского складчатого пояса: Нуралинский массив – в зоне Главного Уральского разлома, Крака – в Зилаирской мегазоне. Большая часть исследователей считает, что массивы Крака

первоначально располагались также в пределах главной офиолитовой зоны, а затем были шарьированы на запад [Kazantseva, Kamaletdinov, 1969; Savelieva, 1987; Puchkov, 2010]. Согласно альтернативной точке зрения, массивы представляют собой фрагменты корневой части Зилаирской (Медногорско-Кракинской) рифтогенной структуры [Snachev et al., 2001].

Определение абсолютного возраста исследуемых офиолитовых формаций осложнено многими факторами, и различными изотопными методами получен возрастной диапазон от раннего протерозоя до раннего девона [Krasnobaev et al., 2009; Puchkov, 2010; Malitch et al., 2016]. Интерпретация данных значений пока малоприменима для оценки возраста ПММ.

Худолозовский дифференцированный комплекс, несмотря на специфичное геологическое строение, в целом близок по внутреннему строению и составу рудных тел к известным расслоенным комплексам, для

Таблица 5. Химический состав платинометалльных минеральных фаз в рудоносных массивах худолазовского комплекса (мас. %)**Table 5.** Chemical compositions of platinum metal mineral phases in ore-bearing massifs of the Khudolaz complex (wt. %)

№ п/п	Pd	Rh	Pt	Fe	Ni	Cu	As	Te	Bi	Sb	Сумма
1	23.94		1.85	0.66				28.29	46.50		101.24
2	21.92		3.05	0.42			1.28	26.33	47.00		100.00
3	23.13			1.97	0.79	0.98		28.91	44.46		100.24
4	24.30			1.22				25.54	47.63		98.70
5	24.33			2.40	0.81			32.62	30.06	9.26	99.48
6	25.29			1.20	0.69			33.75	27.05	11.90	99.88
7	26.28			1.05		0.28		33.27	24.62	14.08	99.58
8	21.66			2.76	4.28			48.25	16.35	6.70	100.00
9	34.93							50.75	0.44	13.88	100.00
10	20.57			2.36					77.07		100.00
11	20.69			2.50					76.81		100.00
12	20.30			2.44	1.07				76.19		100.00
13	1.39		34.05	2.85	0.74			32.47	28.49		100.00
14	0.97		36.05	0.00	0.69			38.50	24.47		100.68
15	0.81		36.54	0.42	0.61			37.76	24.88		101.03
16	1.24		35.42	1.62	0.76			37.46	25.89		102.40
17			56.34				41.36	2.29			99.99
18			56.82				41.43	1.74			99.99
19			53.90				44.63	1.47			100.00
20			54.79	1.01	0.96		45.22				101.98
21		0.89	54.71	0.92	0.75		44.40				101.67

Формульные единицы в расчете на 3 атома

1	0.98		0.04	0.05				0.96	0.97		3
2	0.91		0.07	0.03			0.08	0.91	1.00		3
3	0.90			0.15	0.06	0.06		0.94	0.88		2.99
4	1.01			0.13				0.89	0.97		3
5	0.90			0.17	0.05			1.01	0.57	0.30	3
6	0.93			0.08	0.05			1.04	0.51	0.38	2.99
7	0.97			0.07		0.02		1.02	0.46	0.45	2.99
8	0.80			0.19				1.48	0.31	0.22	3
9	1.17							1.42	0.01	0.40	3
10	0.96			0.21					1.83		3
11	0.96			0.22					1.82		3
12	0.93			0.21	0.09				1.77		3
13	0.06		0.81	0.24	0.06			1.19	0.64		3
14	0.04		0.89		0.06			1.45	0.56		3
15	0.04		0.89	0.04	0.05			1.41	0.57		3
16	0.05		0.83	0.13	0.06			1.35	0.57		2.99
17			1.00				1.93	0.06			2.99
18			1.02				1.93	0.05			3
19			0.94				2.02	0.04			3
20			0.92	0.06	0.05		1.97				3
21		0.03	0.92	0.05	0.04		1.95				2.99

Примечание. 1–8 – майчнерит, 9 – меренскийит, 10–12 – фрудит, 13 – нестехиометричная фаза, близкая к мончеиту, 14–16 – мончеит, 17–21 – сперрилит; пустая строка – не определено. Анализ 6 был опубликован в статье [Rakhimov et al., 2018], анализы 1, 2, 4, 5 в статье [Rakhimov et al., 2019].

Note. 1–8 – michenerite, 9 – merenskyite, 10–12 – froodite, 13 – non-stoichiometric phase close to moncheite, 14–16 – moncheite, 17–21 – sperryllite; empty row – not determined. Analyses: 1, 2, 4, and 5 – [Rakhimov et al., 2019]; 6 – [Rakhimov et al., 2018].

которых обоснована внутриплитная обстановка формирования, в особенности к норильскому [Rakhimov, 2017]. На Урале явные аналоги худолозовского комплекса не известны, условно таковыми можно считать лишь некоторые протерозойские расслоенные тела, локализованные на западном склоне [Kovalev et al., 2013]. Время формирования пород худолозовского комплекса (325–329 млн лет) отвечает этапу стабилизации Южно-Уральского блока земной коры, соотносимо с «субплатформенным» режимом [Salikhov, Pshenichny, 1984; Salikhov et al., 2019]. Формирование комплекса связывается с деятельностью мантийного плюма в области аккрезированной окраины Восточно-Европейского кратона [Salikhov et al., 2019]. Возраст платинометалльного оруденения, по нашим представлениям, соотносится с возрастом рудовмещающих пород, т.е. 325–329 млн лет.

5.2. Генетическая интерпретация ПММ в офиолитах Южного Урала

Платинометалльная минерализация, выявленная в офиолитовых хромититах массивов Нурали и Крака, различается по геохимической специализации. В проявлениях мантийных разрезов массивов, хромититах зон меланжа и отдельных рудопоявлений в верлит-клинопироксенитовых комплексах (Приозерное) преобладают минералы тугоплавких платиноидов – сульфиды ряда лаурит-эрликманит и твердые растворы Ru–Os–Ir состава. Для большей части хромититовых проявлений, локализованных внутри верлит-клинопироксенитовых комплексов (Западно-Саксейское, Западно-Шерамбайское, Логиновское), характерно преобладание твердых растворов Pt–Fe состава с подчиненной ролью сульфидов и сульфоарсенидов. Аналогичные закономерности в распределении МПГ по разрезу ультрамафитовых массивов характерны для большей части офиолитовых комплексов [Auge, 1988; Melcher et al., 1997; Malitch et al., 2003; González-Jimenez et al., 2009; Badanina et al., 2013; и др.].

В целом, в составе минералов IPGE преобладает рутений (рис. 11), при этом интерметаллиды более характерны для вкрапленных хромититов мантийного разреза (Нуралинское месторождение), а лаурит преобладает в Приозерном проявлении мантийно-корового переходного комплекса того же массива. В меньшей степени распространены сплавы с ведущей ролью в составе иридия или осмия.

Интерметаллиды существенно платинового состава преобладают в большей части проявлений хромититов верлит-клинопироксенитового комплекса. Их состав варьируется в значительном диапазоне (рис. 11, в). Наибольшая плотность фигуративных точек отмечается: 1) между составами изоферроплатины и тетраферроплатины, 2) в области составов с преобладанием железа. В первую группу точек попадают анализы Западно-Шерамбайского и Западно-Саксейского проявлений. Во вторую группу точек попадает значительное число анализов МПГ из проявлений Кракинского

массива – Западно-Саксейского и Логиновского. Многие из них, помимо железа, также обогащены медью и никелем, иногда встречается ферроникельплатина.

В мантийных разрезах изученных массивов преобладают тугоплавкие платиноиды, высокотемпературная природа формирования которых подтверждена экспериментально [Bird, Bassett, 1980; Andrews, Brenan, 2002; и др.]. Считается также, что наличие рутениевого тренда на тройной диаграмме Os–Ru–Ir для твердых растворов свидетельствует о формировании минералов при высоких давлениях, соответствующих глубинам верхней мантии [Bird, Bassett, 1980]. Образование МПГ тугоплавкой триады требует весьма высоких температур (~2000 °C) [Andrews, Brenan, 2002; и др.], что указывает скорее на реститовую (твердофазную?) природу выделений этих минералов в хромититах внутренних частей массивов.

Хромититы зон меланжа были сформированы при тектонической ремобилизации первичных подформных или полосчатых хромититовых тел мантийного разреза, о чем свидетельствует близкий состав хромшпинелидов и минералогия платиноидов [Saveliev et al., 2008]. Большое минералогическое разнообразие этих проявлений связано, скорее всего, с гидротермальной проработкой и образованием более низкотемпературных минеральных фаз МПГ.

Генезис хромит-платинометалльной минерализации в хромититах верлит-клинопироксенитовых комплексов на данной стадии изучения представляется дискуссионным. С одной стороны, приуроченность к «кумулятивной» части разреза предполагает участие магматических процессов как базовых в его формировании. С другой стороны, хромититы имеют признаки «напряженных» структур, а приуроченность выделений МПГ к силикатным обособлениям указывает, скорее всего, на их постмагматическую природу. Одним из вероятных объяснений может быть твердофазное образование собственных минералов МПГ за счет примесных элементов хромшпинелидов, инициируемое рекристаллизацией минерала-хозяина в условиях уплотнения.

5.3. Перспективы промышленного освоения платиноносных офиолитов

Хотя на сегодняшний день неизвестны сколько-нибудь значительные коренные месторождения ЭПГ в офиолитах, они многими исследователями рассматриваются как перспективный источник платиноидов. Например, в работе [Distler et al., 2008] обосновывается высокая практическая значимость платиноносности офиолитовых комплексов на примере изучения платинометалльной минерализации в хромититах Кемпирсайского массива.

Содержания элементов платиновой группы в первые сотни мг/т могут быть промышленно значимыми при соблюдении двух условий: 1) наличии собственных минералов платиноидов, которые могут селективно извлекаться из хромитовых концентратов, 2) наличии

достаточных запасов платиноносных хромититов. Перспективными в этом отношении объектами могут стать протяженные тела вкрапленных хромититов, локализованные в краевых дунитах массивов Крака и Нурали. Кроме того, определенные перспективы связаны с переходными верлит-клинопироксеновыми комплексами тех же массивов, которые включают хромититовые залежи повышенной железистости.

5.4. Генетическая интерпретация ПММ худолазовского комплекса

Результаты ЛА ИСП МС демонстрируют низкий уровень концентраций ЭПГ в первичных сульфидах худолазовского комплекса. К примеру, сульфиды из магматических руд массивов Бушвельд, Цзиньчуань или Норильско-Талнахской группы в 2–10 раз богаче ЭПГ [Holwell, McDonald, 2007; Su et al., 2008; Mansur et al.,

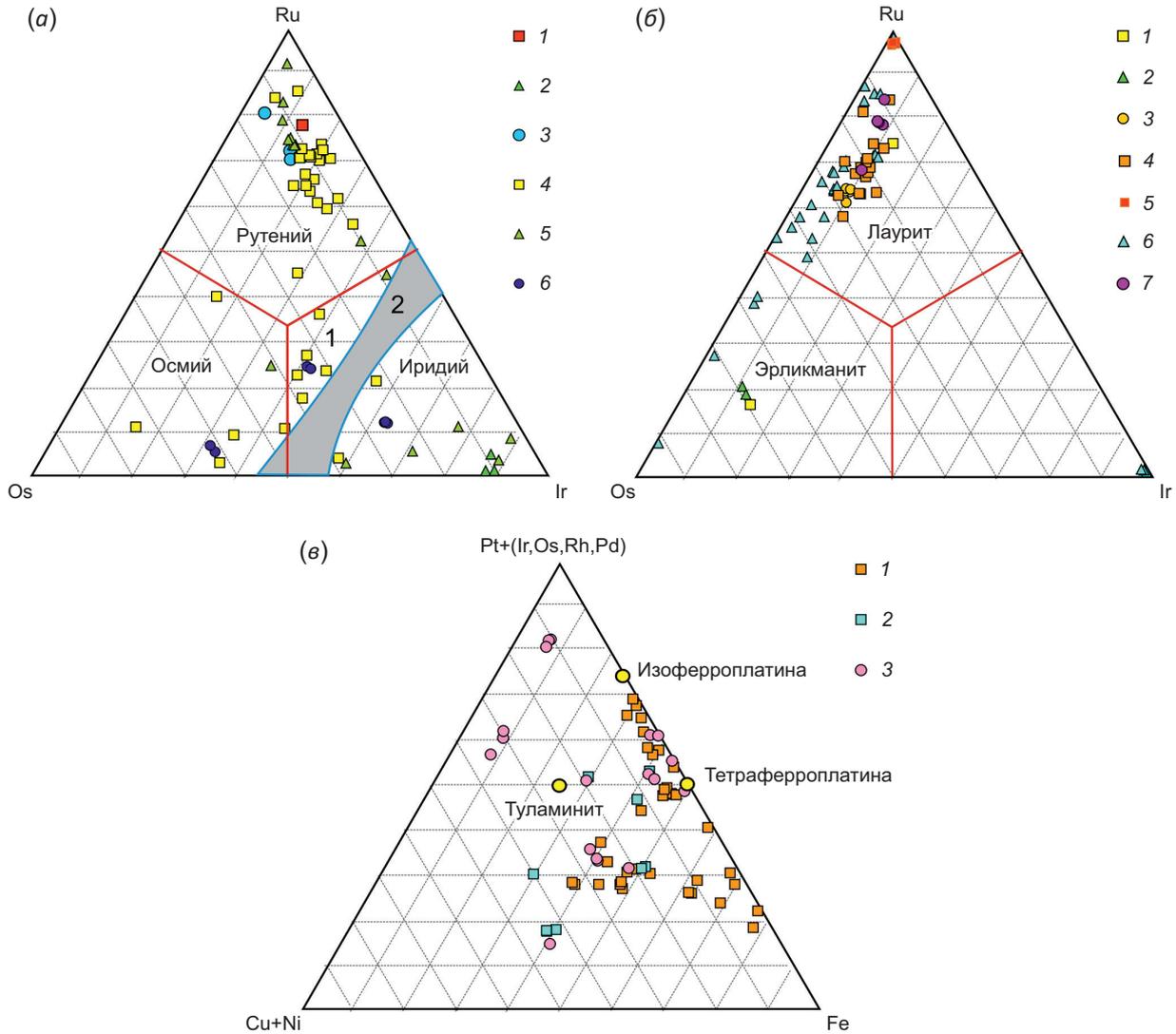


Рис. 11. Химический состав твердых растворов и сульфидов ЭПГ из хромититов массивов Крака и Нурали. (а) – сплавы Os–Ru–Ir состава (ат. %); (б) – сульфиды Os–Ru–Ir (ат. %); (в) – твердые растворы Pt–Fe состава; (а) – поля: 1 – рутениридосмин, 2 – область несмесимости по данным [Harris, Cabri, 1991]. (а) – 1–3 – массивы Крака: 1 – мантийный разрез, 2 – верлит-клинопироксеновый комплекс, 3 – меланж; 4–6 – массив Нурали: 4 – мантийный разрез, 5 – верлит-клинопироксеновый комплекс, 6 – меланж; (б) – 1–3 – массив Крака: 1 – мантийный разрез, 2 – верлит-клинопироксеновый комплекс, 3 – меланж; 4–7 – массив Нурали: 4–5 – мантийный разрез: 4 – Мокрая Яма, 5 – Нуралинское, 6 – верлит-клинопироксеновый комплекс (Приозерное), 7 – меланж; (в) – 1–2 – верлит-клинопироксеновый комплекс массива Крака: 1 – Западно-Саксейское, 2 – Логиновское; 3 – верлит-клинопироксеновый комплекс массива Нурали (Западно-Шерамбайское).

Fig. 11. Chemical compositions of PGE solid solutions and sulfides from chromitites of the Kraka and Nurali massifs. (а) – Os–Ru–Ir alloys (at. %); (б) – Os–Ru–Ir sulfides (at. %); (в) – Pt–Fe solid solutions; (а) – fields: 1 – rutheniridosmine, 2 – immiscibility area (data from [Harris, Cabri, 1991]). (а) – 1–3 – Kraka: 1 – mantle unit, 2 – wehrlite-clinopyroxenite complex, 3 – mélange; 4–6 – Nurali: 4 – mantle unit, 5 – wehrlite-clinopyroxenite complex, 6 – mélange. (б) – 1–3 – Kraka: 1 – mantle unit, 2 – wehrlite-clinopyroxenite complex, 3 – mélange; 4–7 – Nurali: 4–5 – mantle unit: 4 – Mokraya Yama, 5 – Nuralinskoe, 6 – wehrlite-clinopyroxenite complex (Priozhynoe); 7 – mélange. (в) – 1–2 – wehrlite-clinopyroxenite complex of the Kraka massif: 1 – West Saksey, 2 – Loginovskoe; 3 – wehrlite-clinopyroxenite complex of the Nurali massif (West Sherambay).

2019]. Валовый состав ЭПГ малоизмененных сульфидных руд также демонстрирует невысокие концентрации в сравнении с этими же объектами, что может быть вызвано двумя причинами: 1) изначально низким уровнем концентраций ЭПГ в магме; 2) рассеянностью ЭПГ в породах, а не только в сульфидах (из-за высокой чувствительности ЭПГ к гидротермально-метасоматическим изменениям [Prichard et al., 2013; Holwell et al., 2017]). Тем не менее имеющихся концентраций ЭПГ в ассоциациях худолазовского комплекса оказалось достаточно для формирования ПММ.

Представленные в табл. 5 составы изученных платинометаллических минеральных фаз указывают на признаки смешения в системе Pd–Pt–Bi–Te–As. В пользу этого свидетельствуют установленные примеси Te и других элементов в сперрилите, а также примесь As в бессурьмянистом майчнерите, которые не являются результатом захвата матрицы при анализе. Добавление Sb в систему, судя по геохимической эволюции сульфидов, произошло за счет флюидов уже на гидротермальной стадии, поскольку сурьма появляется лишь в МПГ, ассоциирующихся с сильно метасоматизированными сульфидами.

Система Pd–Bi–Te изучена экспериментально [Hoffman, Maclean, 1976], и в диапазоне температур, типичных для позднемагматической стадии кристаллизации (~450–740 °C), для нее характерно широкое разнообразие смешанных составов твердых растворов с выделением трех конечных членов (меренскиита, майчнерита

и фрудита). Проведенные нами исследования показывают, что формирование МПГ могло происходить из более сложных по составу металлоидных фаз, причем как из жидких, так и из твердых. На фазовой треугольной диаграмме (рис. 12) висмутотеллуриды худолазовского комплекса занимают поля фрудита и майчнерита – меренскиита в смеси с котульскитом, т.е. частично смещены с узких полей стабильности синтетических висмутотеллуридов.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что платиноиды, в особенности PPGE, концентрируются в сульфидной жидкости [Mungall, Brenan, 2014]. Они могут находиться в растворенном состоянии в твердых сульфидных фазах либо концентрируются в несмешиваемых халькогенидных расплавах и растворах, а также в высокофракционированной сульфидной жидкости [Ballhaus, Ulmer, 1995; Junge et al., 2015; Cafagna, Jugo, 2016]. По нашему мнению, основная часть зерен МПГ, локализованных в однородной неизменной сульфидной матрице (см. рис. 10, а, б), иногда с установленными сростаниями минералов (см. рис. 10, ж), кристаллизовалась из захваченных сульфидами несмешиваемых халькогенидных (металлоидных) расплавов и/или выделялась при твердофазном распаде последних. Диапазон температур кристаллизации МПГ на этой стадии по результатам изучения взаимоотношений минералов [Rakhimov et al., 2019] и экспериментальным данным [Cafagna, Jugo, 2016] оценивается в 600–450 °C. В дальнейшем при низкотемпературном распаде сульфидных

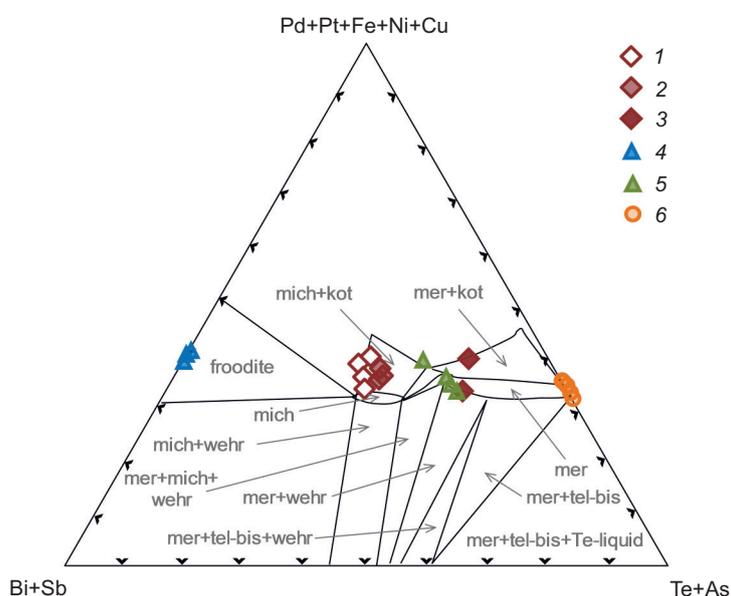


Рис. 12. Тройная диаграмма* (в ат. %) для платинометаллических минеральных фаз системы Pd–Pt–Bi–Te–As–Sb худолазовского комплекса.

1–2 – майчнериты (бессурьмянистый и сурьмянистый); 3 – меренскиит; 4 – фрудит; 5 – мончеит; 6 – сперрилит. Kot – котульскит, mer – меренскиит, tel-bis – теллуrowисмутин, Te-liquid – теллуrowый расплав, wehr – верлит, остальные обозначения см. в подписи к рис. 10. * – поля фаз даны для системы Pd–Bi–Te при 489 °C [Hoffman, Maclean, 1976].

Fig. 12. Ternary diagram* (at. %) for platinum metal mineral phases of Pd–Pt–Bi–Te–As–Sb system in the Khudolaz complex.

1–2 – michenerite (non-antimonic, and antimonic); 3 – merenkyite; 4 – froodite; 5 – moncheite; 6 – sperrrylite. kot – kotulskite; mer – merenkyite; tel-bis – tellurobismuthite; Te-liquid – telluric melt; wehr – wehrlite; see other signs in the caption to Fig. 10. * fields for the Pd–Bi–Te system at 489°C [Hoffman, Maclean, 1976].

твердых растворов за счет сегрегации изоморфных примесей ЭПГ и халькогенидных элементов в ограниченном объеме происходило выделение МПГ (см. рис. 10, г, возможно д и е). Температура их образования, судя по всему, была уже значительно меньше 600 °С. На гидротермальной стадии могло происходить формирование Sb-содержащих МПГ либо за счет замещения сурьмой висмута (например, в майчнерите), либо за счет кристаллизации непосредственно из обогащенного Sb флюида при растворении сульфидов и выносе из них Pd, Te, Bi (см. табл. 3). Об этом свидетельствуют минералогические наблюдения (см. рис. 10, е, з, и), истощение сульфидов в отношении ЭПГ и Te на гидротермальной стадии, в некоторых случаях – Bi и As, а также их значительное обогащение Sb. Обогащение флюида сурьмой, вероятно, происходило при участии вмещающих пород [Rakhimov et al., 2020]. Температура минералообразования на этой стадии оценивается в диапазоне 200–150 °С [Rakhimov et al., 2019].

5.5. Перспективы промышленного освоения платиноносного худолазовского комплекса

Ставшие классическими в сульфидно-платинометалльной геологии и минералогии работы Налдретта с соавторами [Campbell, Naldrett, 1979; Naldrett, 2010] показывают, что формирование богатых ЭПГ магматогенных сульфидных руд зависит от следующих параметров: 1) объема магмы и исходных концентраций ЭПГ в ней, 2) отношения массовой доли силикатного расплава к сульфидной жидкости (R-фактор), 3) степени коровой контаминации родоначального расплава, 4) времени достижения сульфидного насыщения, 5) количества актов внедрения магмы, 6) размеров сульфидных агрегатов, хотя в работе [Mungall, Brenan, 2014] обосновывается, что даже при относительно небольших содержаниях ЭПГ возможно формирование промышленно значимых проявлений платиноидов благодаря чрезвычайно высокой совместимости ЭПГ с несмеси-мым сульфидным расплавом.

По объему изверженного материала (>3 км³) худолазовский комплекс можно считать достаточно крупным. Существующая модель формирования комплекса подразумевает наличие глубинного магматического очага в осевой части Худолазовской мульды, от которого отделялись различно фракционированные порции расплава с образованием самостоятельных мелких массивов [Rakhimov, 2017]. Такое сложное многофазное строение является серьезным препятствием для промышленного освоения комплекса на сульфидные Cu–Ni и ЭПГ руды. Но позитивным моментом здесь является то, что руды приурочены к определенным типам интрузивов, а их геологические параметры между собой сильно не различаются.

Оценка R-фактора должна производиться для каждого массива худолазовского комплекса отдельно. По наблюдаемому в полированных пластинках усредненному соотношению силикатов и сульфидов нами была сделана попытка определения величины R-фактора для

штокообразного массива Малютка [Rakhimov, 2020a]. Полученная величина R=350 свидетельствует о продуктивности массива на промышленное Cu–Ni оруденение, но невысоком потенциале в отношении ПММ [Piercey, 2013; Holwell et al., 2015]. В соответствии с этим, а также с невысоким содержанием ЭПГ в главных сульфидах, руды массива Малютка не могут быть отнесены к малосульфидному типу ПММ.

Еще одним препятствием для возникновения более богатых в отношении ЭПГ руд могла стать ранняя ликвация сульфидного расплава [Rakhimov, 2020b], в результате чего богатые ЭПГ ранние сульфидные капли не достигали верхних горизонтов земной коры и оседали в глубинной магматической камере.

С другой стороны, обогащенность вмещающих пород платиноидами с Σ ЭПГ до 1 г/т и более указывают на гидротермальное перераспределение ЭПГ за счет их выноса из первичных сульфидных руд. Особенно хорошо это наблюдается на примере массива Ташлы-Тау и его экзоконтактовой зоны мощностью до 15–20 м, где также была обнаружена ПММ, представленная Sb-майчнеритом [Rakhimov et al., 2020]. Таким образом, гидротермальные процессы приводят к эффекту, несколько обратному накопительному R-фактору, и масштаб выноса ЭПГ из сульфидных руд еще предстоит оценить. Гидротермальная природа целого ряда проявлений и месторождений ЭПГ в мире убедительно обоснована фактическим материалом [Campos-Alvarez et al., 2012; Duran et al., 2016; и др.].

Исходя из вышесказанного, в худолазовском дифференцированном комплексе наиболее перспективными могут являться малоизмененные сульфидные руды крупных массивов (Северный Бускун, Западный Карасаз, возможно Туркменево) с содержанием Σ ЭПГ до 1 г/т и более, а также экзоконтактово-измененные вмещающие породы, в настоящее время практически неизученные в минералого-геохимическом отношении.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Охарактеризованы две платиноносные формации Южного Урала – офиолитовые комплексы Нурали и Крака, несущие хромитовое оруденение, и худолазовский дифференцированный комплекс, специализированный на сульфидное Cu–Ni оруденение. Первые объединяют фрагменты океанической коры и верхней мантии Палеоуральского бассейна, эксгумированные во время орогенеза. Магматизм худолазовского комплекса связывается с деятельностью мантийного плюма во время субплатформенного режима на Южном Урале.

Проведенные исследования позволили значительно расширить круг объектов, изученных на предмет платиноносности, и выявить потенциально значимые месторождения и рудопоявления, в пределах которых необходимо продолжать работы по изучению благороднометалльной минерализации и определению валовых содержаний платиноидов для построения моделей их перераспределения. Платинометаллическая

минерализация и повышенные валовые концентрации платиноидов установлены на следующих месторождениях и рудопроявлениях: Верхнесарангинском, Малый Башарт, Саксей, Черноключенском, Логиновском, Западно-Саксейском (массивы Крака), Приозерном, Западно-Шерамбайском, Шерамбайском, Южно-Сарусаккульском, Нуралинском, Курманкульском, Мокрая Яма (Нурали), Ташлы-Тау, Северный Бускун, Кусеево-2, Кусеево-3, Западный Карасаз, Малютка (худолазовский комплекс).

Детальные минералого-геохимические исследования позволили охарактеризовать генезис ПММ в офиолитовых массивах и в худолазовском комплексе. В составе хромитоносных офиолитов выделяются: 1) интерметаллиды Ru–Os–Ir состава и сульфиды ряда лаурит-эрликманит в мантийной части разреза, имеющие реститовую природу; 2) сплавы Pt–Fe состава, реже Pd–Rh-содержащие интерметаллиды, в хромититах верлит-клинопироксенитовых комплексов, имеющие признаки магматической и постмагматической, существенно твердофазной, кристаллизации; 3) различные низкотемпературные МПГ (интерметаллиды, сульфиды, сульфоарсениды), образовавшиеся при гидротермально-метасоматической переработке ЭПГ-несущих хромититов. Для худолазовского комплекса также предлагается полигенная модель формирования ПММ. Наиболее ранние выделения платиноидов (сперрилит, мончеит, меренскиит, майчнерит) связаны с кристаллизацией из самостоятельных металлоидных расплавов или высокофракционированных сульфидных расплавов, захваченных сульфидами. Далее при распаде сульфидных твердых растворов выделение МПГ (фрудит, майчнерит) происходило за счет сегрегации изоморфных примесей ЭПГ и халькогенидов в сульфидах. Наконец, на гидротермальной стадии происходила кристаллизация Sb-содержащих МПГ (Sb-майчнерит, боровскит, садберит), вероятно за счет взаимодействия богатого сурьмой флюида и Pd, Bi, Te, вынесенных из растворяющихся первичных сульфидов.

В результате проведенных исследований нами выделены перспективные участки для постановки поисковых работ на платинометалльное оруденение в пределах изученных объектов: 1) полоса краевых дунитов и верлит-клинопироксенитового комплекса массива Средний Крака и аналогичная полоса массива Нурали; 2) массив Северный Бускун (возможно, Западный Карасаз и Туркменево) и его экзоконтактные зоны.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Andrews D.R.A., Brenan J.M., 2002. Phase-Equilibrium Constraints on the Magmatic Origin of Laurite and Os-Ir Alloy. *Canadian Mineralogist* 40 (6), 1705–1716. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.6.1705>.

Auge T., 1988. Platinum-Group Minerals in the Tieboghi and Vourinos Ophiolitic Complexes: Genetic Implications. *Canadian Mineralogist* 26, 177–192.

Badanina I.Yu., Malitch K.N., Lord R.A., Meisel T.S., 2013. Origin of Primary PGM Assemblage in Chromitite from a

Mantle Tectonite at Harold's Grave (Shetland Ophiolite Complex, Scotland). *Mineralogy and Petrology* 107, 963–970. <https://doi.org/10.1007/s00710-013-0271-9>.

Ballhaus C., Ulmer P., 1995. Platinum-Group Elements in the Merensky Reef: II. Experimental Solubilities of Platinum and Palladium in $Fe_{1-x}S$ from 950 to 450 °C under Controlled fS_2 and fH_2 . *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (23), 4881–4888. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00355-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00355-X).

Bird J.M., Bassett W.A., 1980. Evidence of a Deep Mantle History in Terrestrial Osmium-Iridium-Ruthenium Alloys. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 85 (B10), 5461–5470. <http://dx.doi.org/10.1029/JB085iB10p05461>.

Buchkovsky E.S., Perminov G.M., Krestinin B.A., Karavaev I.N., Petrov Yu.N., 1974. Estimation of Nickel Contents of the Main Intrusions of the Khudolaz Complex. In: *The Khudolaz Syncline Report. Scale 1:50000 Prospecting for Sulfide Copper-Nickel Ores. Vol. 1. GosGeolFond, Ufa, 240 p.* (in Russian) [Бучковский Э.С., Перминов Г.М., Крестинин Б.А., Караваев И.Н., Петров Ю.Н. Оценка никеленосности основных интрузий Худолазовского комплекса: Отчет по объекту «Худолазовская синклинали. Поиски масштаба 1:50000 сульфидных медно-никелевых руд». Уфа: ГосГеолФонд, 1974. Т. 1. 240 с.].

Cafagna F., Jugo P.J., 2016. An Experimental Study on the Geochemical Behavior of Highly Siderophile Elements (HSE) and Metalloids (As, Se, Sb, Te, Bi) in a Mss-Iss-Pyrite System at 650 °C: A Possible Magmatic Origin for Co-HSE-Bearing Pyrite and the Role of Metalloid-Rich Phases in the Fractionation of HSE. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 178 (1), 233–258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2015.12.035>.

Campbell I.H., Naldrett A.J., 1979. The Influence of Sulfide:Sulfate Ratios on the Geochemistry of Magmatic Sulfides. *Economic Geology* 74 (6), 1503–1506. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.6.1503>.

Campos-Alvarez N.O., Samson I.M., Fryer B.J., 2012. The Roles of Magmatic and Hydrothermal Processes in PGE Mineralization, Ferguson Lake Deposit, Nunavut, Canada. *Mineralium Deposita* 47, 441–465. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0385-0>.

Coleman R.G., 1979. Ophiolites. Mir, Moscow, 262 p. (in Russian) [Колман Р.Г. Офиолиты. М.: Мир, 1979. 262 с.].

Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A., 2008. Ore Petrology of Chromite-PGE Mineralization in the Kempirsai Ophiolite Complex. *Mineralogy and Petrology* 92, 31–58. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-007-0207-3>.

Dmitrenko G.G., Gorelova E.M., Savelieva G.N., 1992. Platinoid Minerals in Chromites of the Nurali Massif (South Urals). *Doklady Earth Sciences* 324 (2), 403–406 (in Russian) [Дмитренко Г.Г., Горелова Е.М., Савельева Г.Н. Минералы платиноидов в хромитах массива Нурали (Южный Урал) // Доклады Академии наук. 1992. Т. 324. № 2. С. 403–406].

Duran C.J., Barnes S.-J., Corkery J.T., 2016. Geology, Petrography, Geochemistry, and Genesis of Sulfide-rich Pods in the Lac des Îles Palladium Deposits, Western Ontario,

Canada. *Mineralium Deposita* 51, 509–532. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-015-0622-z>.

Fominykh V.G., Khvostova V.P., 1970. On the Platinum Content of Dunites of the Urals. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 191 (2), 374–377 (in Russian) [Фоминых В.Г., Хвостова В.П. О платиноносности дунитов Урала // Доклады АН СССР. 1970. Т. 191. № 2. С. 374–377].

González-Jiménez J.-M., Gervilla F., Proenza J.A., Auge T., Kerestedjian T., 2009. Distribution of Platinum-Group Minerals in Ophiolitic Chromitites. *Applied Earth Science* 118 (3–4), 101–110. <https://doi.org/10.1179/174327509X12550990457924>.

González-Jiménez J.M., Griffin W.L., Proenza A., Gervilla F., O'Reilly S.Y., Akbulut M., Pearson N.J., Arai S., 2014. Chromitites in Ophiolites: How, Where, When, Why? Part II. The Crystallisation of Chromitites. *Lithos* 189, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.008>.

Grieco G., Diella V., Chaplygina N.L., Savelieva G.N., 2007. Platinum Group Elements Zoning and Mineralogy of Chromitites from the Cumulate Sequence of the Nurali Massif (Southern Urals, Russia). *Ore Geology Reviews* 30 (3–4), 257–276. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.002>.

Harris D.C., Cabri L.J., 1991. Nomenclature of Platinum-Group-Element Alloys: Review and Revision. *Canadian Mineralogist* 29, 231–237.

Hoffman E.L., MacLean W.H., 1976. Phase Relations of Michenerite and Merenskyite in the Pd-Bi-Te System. *Economic Geology* 71 (7), 1461–1468. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.71.7.1461>.

Holwell A.D., Keays R.R., McDonald I., Williams M.R., 2015. Extreme Enrichment of Se, Te, PGE and Au in Cu Sulfide Microdroplets: Evidence from LA-ICP-MS Analysis of Sulfides in the Skaergaard Intrusion, East Greenland. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 170 (53). <http://dx.doi.org/10.1007/s00410-015-1203-y>.

Holwell D.A., McDonald I., 2007. Distribution of Platinum-Group Elements in the Platreef at Overysel, Northern Bushveld Complex: A Combined PGM and LA-ICP-MS Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 154, 171–190. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0185-9>.

Holwell D.A., Zeinab A., Warda L.A., Smith D.J., Graham S.D., McDonald I., Smith J.W., 2017. Low Temperature Alteration of Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfides as a Source for Hydrothermal Ni and PGE Ores: A Quantitative Approach Using Automated Mineralogy. *Ore Geology Reviews* 91, 718–740. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.025>.

Ivanov O.K., 1997. Concentrically Zoned Pyroxenite-Dunite Massifs of the Urals. Publishing House of the Ural University, Ekaterinburg, 488 p. (in Russian) [Иванов О.К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 1997. 488 с.].

Junge M., Wirth R., Oberthür T., Melcher F., Schreiber A., 2015. Mineralogical Siting of Platinum-Group Elements in Pentlandite from the Bushveld Complex, South Africa. *Mineralium Deposita* 50, 41–54. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-014-0561-0>.

Kazantseva T.T., Kamaletdinov M.A., 1969. On the Allochthonous Occurrence of Hyperbasite Massifs on the Western Slope of the South Urals. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 189 (5), 1077–1080 (in Russian) [Казанцева Т.Т., Камалетдинов М.А. Об аллохтонном залегании гипербазитовых массивов западного склона Южного Урала // Доклады АН СССР. 1969. Т. 189. № 5. С. 1077–1080].

Kelemen P.B., Dick H.J.B., Quick J.E., 1992. Formation of Harzburgite by Pervasive Melt/Rock Reaction in the Upper Mantle. *Nature* 358, 635–641. <https://doi.org/10.1038/358635a0>.

Kovalev S.G., Kovalev S.S., Kotlyarov V.A., 2013. Sulfide Mineralization and Geochemical Specialization of Picrite and Picrodolerite Complexes of the Western Slope of the South Urals. *Geology. Bulletin of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan* 19, 32–46 (in Russian) [Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Котляров В.А. Сульфидная минерализация и геохимическая специализация пикритовых и пикродолеритовых комплексов западного склона Южного Урала // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2013. № 19. С. 32–46].

Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Rusin I.A., 2009. Zirconology of Lherzolites (Uzyansky Kraka Massif, South Urals). *Doklady Earth Sciences* 425 (5), 656–659 (in Russian) [Краснобаев А.А., Русин А.И., Русин И.А. Цирконология лерцолитов (массив Узьянский Крака, Южный Урал) // Доклады АН. 2009. Т. 425. № 5. С. 656–659].

Malitch K.N., Anikina E.V., Badanina I.Y., Belousova E.A., Pushkarev E.V., Khiller V.V., 2016. Chemical Composition and Osmium-Isotope Systematics of Primary and Secondary PGM Assemblages from High-Mg Chromitite of the Nurali Lherzolite Massif, the South Urals, Russia. *Geology of Ore Deposits* 58 (1), 1–19. <https://doi.org/10.1134/S1075701515050037>.

Malitch K.N., Thalhammer O.A., Knauf V.V., Melcher F., 2003. Diversity of Platinum-Group Mineral Assemblages in Banded and Podiform Chromitite from the Kraubath Ultramafic Massif, Austria: Evidence for an Ophiolitic Transition Zone? *Mineralium Deposita* 38, 282–297 <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-002-0308-1>.

Mansur E.T., Barnes S.-J., Duran C.J., Sluzhenikin S.F., 2019. Distribution of Chalcophile and Platinum-Group Elements among Pyrrhotite, Pentlandite, Chalcopyrite and Cubanite from the Noril'sk-Talnakh Ores: Implications for the Formation of Platinum-Group Minerals. *Mineralium Deposita* 55, 1215–1232. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00926-z>.

Maslov V.A., Artyushkova O.V., 2010. Stratigraphy and Correlation of Devonian Deposits of the Magnitogorsk Megazone of the South Urals. DesignPolygraphService, Ufa, 288 p. (in Russian) [Маслов В.А., Артюшкова О.В. Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 288 с.].

McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Melcher F, Grum W, Simon G, Thalhammer TV, Stumpfl E.F., 1997. Petrogenesis of the Ophiolitic Giant Chromite Deposits of Kempirsai, Kazakhstan: A Study of Solid and Fluid Inclusions in Chromite. *Journal of Petrology* 38 (10), 1419–1458. <https://doi.org/10.1093/петрол/38.10.1419>.

Men'shikov V.I., Vlasova V.N., Lozhkin V.I., Sokol'nikova Yu.V., 2016. Determination of Platinum-Group Elements in Rocks by ICP-MS with External Calibration after Cation Exchange Separation of Matrix Elements by KU-2-8 Resin. *Analytics and Control* 20 (3), 190–201 (in Russian) [Меньшиков В.И., Власова В.Н., Ложкин В.И., Сокольникова Ю.В. Определение элементов платиновой группы в горных породах методом ИСП-МС с внешней градуировкой после отделения матричных элементов на катионите КУ-2-8 // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 3. С. 190–201]. <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.3.003>.

Moloshag V.P., Smirnov S.V., 1996. Platinoid Mineralization of the Nuralinsky Hyperbasite-Gabbro Massif (South Urals). *Notes of the Russian Mineralogical Society* 1, 48–54. (in Russian) [Молошаг В.П., Смирнов С.В. Платиноидная минерализация Нуралинского гипербазит-габбрового массива (Южный Урал) // Записки Российского минералогического общества. 1996. № 1. С. 48–54].

Mungall J.E., Brenan J.M., 2014. Partitioning of Platinum-Group Elements and Au between Sulfide Liquid and Basalt and the Origins of Mantle-Crust Fractionation of the Chalcophile Elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 125, 265–289. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.002>.

Naldrett A.J., 2003. Magmatic Sulfide Deposits of Nickel-Copper and Platinum-Metal Ores. Saint Petersburg University Press, Saint Petersburg, 487 p. (in Russian) [Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 487 с.].

Naldrett A.J., 2010. From the Mantle to the Bank: The Life of a Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit. *South African Journal of Geology* 113 (1), 1–32. <https://doi.org/10.2113/gssaaj.113.1-1>.

Nicolas A., Bouchez J.L., Boudier F., Mercier J.C., 1971. Textures, Structures and Fabrics Due to Solid State Flow in Some European Iherzolites. *Tectonophysics* 12 (1), 55–86. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(71\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(71)90066-7).

Piercey S., 2013. Classic Papers in Economic Geology: Campbell and Naldrett (1979) – The Influence of Silicate-Sulfide Ratios on the Geochemistry of Magmatic Sulfides. Online Paper. Available from: <https://stevepiercey.wordpress.com/2013/05/15/classic-papers-in-economic-geology-campbell-and-naldrett-1979-the-influence-of-silicate-sulfide-ratios-on-the-geochemistry-of-magmatic-sulfides/> (Last Accessed 17.06.2020).

Prichard H.M., Knight R.D., Fisher P.C., McDonald I., Zhou M.-F., Wang C.Y., 2013. Distribution of Platinum-Group Elements in Magmatic and Altered Ores in the Jinchuan Intrusion, China: An Example of Selenium Remobilization by Postmagmatic Fluids. *Mineralium Deposita* 48, 767–786. <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0454-7>.

Puchkov V.N., 2010. Geology of the Urals and Cisurals (Topical Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics

and Metallogeny). *DizaynPoligrafServis*, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис. 2010. 280 с.].

Rakhimov I.R., 2017. Geology, Petrology and Ore Content of the Late Devonian-Carboniferous Intrusive Magmatism of the West Magnitogorsk Zone of the South Urals. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ufa, 181 p. (in Russian) [Рахимов И.Р. Геология, петрология и рудоносность позднедевонско-карбонического интрузивного магматизма Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Уфа, 2017. 181 с.].

Rakhimov I.R., 2020a. Mineralogy and Main Petrology Aspects of Malyutka Massif of the Khudolaz Complex (Southern Urals). *Vestnik of Geosciences* 1, 8–18 (in Russian) [Рахимов И.Р. Минералогия и главные аспекты петрологии массива Малютка худолазовского комплекса (Южный Урал) // Вестник геонаук. 2020. № 1. С. 8–18]. <https://doi.org/10.19110/geov.2020.1.2>.

Rakhimov I.R., 2020b. Petrology and Geochemistry of the Tashly-Tau Massif, Khudolaz Differentiated Complex (Southern Urals). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology* 2, 44–57 (in Russian) [Рахимов И.Р. Петрология и геохимия массива Ташлы-Тау, худолазовский дифференцированный комплекс, Южный Урал // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2020. № 2. С. 44–57]. <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2858>.

Rakhimov I.R., Ankusheva N.N., Kholodnov V.V., 2020. Co-Pd-Ag and Th-REE Mineralization of Host Rocks from the Exocontact Zone of Tashly-Tau Massif, Khudolaz Complex (South Urals): Ore Sources and Fluid Inclusions Data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 331 (8), 77–91 (in Russian) [Рахимов И.Р., Анкушева Н.Н., Холоднов В.В. Co-Pd-Ag и Th-REE минерализация вмещающих пород экзоконтактной зоны массива Ташлы-Тау худолазовского комплекса (Южный Урал): условия образования и источники вещества // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 8. С. 77–91]. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2770>.

Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Vishnevskiy A.V., 2019. Sulfide-Platinum Metal Mineralization of Khudolaz Complex Malyutka Altered Gabbro Massif: Hydrothermal Influence to the Mineral Association Types. *Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences* 7, 15–24 (in Russian) [Рахимов И.Р., Савельев Д.Е., Вишнеvский А.В. Сульфидно-платинометалльная минерализация измененных габбро массива Малютка худолазовского комплекса: влияние гидротермальных процессов на тип минеральной ассоциации // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2019. № 7. С. 15–24]. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-7-15-24>.

Rakhimov I.R., Vishnevskiy A.V., Vladimirov A.G., Saveliev D.E., Puchkov V.N., Salikhov D.N., 2018. First Finds of Platinum and Palladium Minerals in Sulfide Ores of the Khudolaz Intrusive Complex (Southern Urals). *Doklady Earth*

Sciences 479, 439–442. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18040153>.

Ringwood A.E., 1981. Composition and Petrology of the Earth's Mantle. Nedra, Moscow, 585 p. (in Russian) [Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 585 с.].

Salikhov D.N., Belikova G.I., Puchkov V.N., Ernst R., Söderlund U., Kamo S., Rakhimov I.R., Kholodnov V.V., 2012. A Nickel-Bearing Intrusive Complex in the South Urals. *Lithosphere* 6, 66–77 (in Russian) [Салихов Д.Н., Беликова Г.И., Пучков В.Н., Эрнст Р., Седерлунд У., Камо С., Рахимов И.Р., Холоднов В.В. Никеленосный интрузивный комплекс на Южном Урале // Литосфера. 2012. № 6. С. 66–77].

Salikhov D.N., Kholodnov V.V., Puchkov V.N., Rakhimov I.R., 2019. Subduction, Collision and Plumes in the Epoch of the Late Paleozoic Magmatism of the Magnitogorsk Zone (the Southern Urals). *Lithosphere* 19 (2), 191–208 (in Russian) [Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р. Субдукция, коллизия и плюмы в эпоху позднепалеозойского магматизма Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. 2019. Т. 19. № 2. С. 191–208]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-191-208>.

Salikhov D.N., Pshenichny G.N., 1984. Magmatism and Mineralization in the Early Consolidation Zone of the Magnitogorsk Megasyntorium. Publishing House of the Bashkir Branch of the USSR Academy of Sciences, Ufa, 112 p. (in Russian) [Салихов Д.Н., Пшеничный Г.Н. Магматизм и оруденение зоны ранней консолидации Магнитогорской эвгеосинклинали. Уфа: Изд-во БФ АН СССР, 1984. 112 с.].

Salikhov D.N., Yusupov S.Sh., Kovalev S.G., 2001. The Resources of the Bashkortostan Republic (Platinum Group Elements). *Ecology*, Ufa, 223 p. (in Russian) [Салихов Д.Н., Юсупов С.Ш., Ковалев С.Г., Бердников П.Г., Хамитов Р.А. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (элементы платиновой группы). Уфа: Экология, 2001. 223 с.].

Saveliev D.E., 2018. Kraka Ultramafic Massifs (South Urals): Features of Structure and Composition of Peridotite-Dunite-Chromitite Assemblages. *Gilem*, Ufa, 304 p. (in Russian) [Савельев Д.Е. Ультрамафитовые массивы Крака (Южный Урал): особенности строения и состава перидотит-дунит-хромититовых ассоциаций. Уфа: Гилем, 2018. 304 с.].

Saveliev D.E., Ankusheva N.N., 2018. Nurali Ophiolite Massif (the Southern Urals): Geological, Structural, and Mineralogical Features. *Bulletin of Perm University. Geology* 17 (3), 228–242. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.228>.

Saveliev D.E., Belogub E.V., Zaikov V.V., Snachev V.I., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., 2014. Platinum-Metal Mineralization in Ultramafic Rocks of the Middle Kraka Massif (South Urals). *Ores and Metals* 6, 33–42 (in Russian) [Савельев Д.Е., Белогуб Е.В., Зайков В.В., Сначев В.И., Котляров В.А., Блинов И.А. Платинометалльная минерализация в ультрамафитах массива Средний Крака (Южный Урал) // Руды и металлы. 2014. № 6. С. 33–42].

Saveliev D.E., Belogub E.V., Zaykov V.V., Snachev V.I., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., 2015. First Occurrences of PGE Mineralization in Ultramafic Rocks of the Middle Kraka Massif,

the Southern Urals. *Doklady Earth Sciences* 460, 103–105. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15020117>.

Saveliev D.E., Nugumanova Ya.N., Gataullin R.A., Sergeev S.N., 2019. Chromitites in the Melange Zone of the Nurali Massif (South Urals). *Geological Bulletin* 1, 77–90 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-6>.

Saveliev D.E., Snachev V.I., Savelieva E.N., Bazhin E.A., 2008. Geology, Petrogeochemistry and Chromite-Bearing Potential of Gabbro-Ultramafic Massifs of the South Urals. DesignPolygraphService, Ufa, 320 p. (in Russian) [Савельев Д.Е., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А. Геология, петрогеохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 2008. 320 с.].

Saveliev D.E., Zaykov V.V., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Kraïnev Yu.D., 2017. Chrome-Spinelides and Accessory Minerals in Chromitites and Ultramafic Rocks of the Nurali Massif (South Urals). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society* 146 (1), 59–83 (in Russian) [Савельев Д.Е., Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. Хромшпинелиды и аксессуарная минерализация в хромититах и ультрамафитах Нуралинского массива (Южный Урал) // Записки Российского минералогического общества. 2017. Т. 146. № 1. С. 59–83].

Savelieva G.N., 1987. Gabbro-Ultrabasic Complexes of the Ural Ophiolites and Their Analogues in the Modern Oceanic Crust. *Nauka*, Moscow, 246 p. (in Russian) [Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М.: Наука, 1987. 246 с.].

Shumikhin E.A., 1980. Report on the Results of General Prospecting for Disseminated Chromite Ores at the Nurali Massif Site for 1978–1980. *Foundations of BTGU*, Ufa, 228 p. (in Russian) [Шумихин Е.А. Отчет о результатах общих поисков вкрапленных хромитовых руд на объекте «Нуралинский массив» за 1978–1980 гг. Уфа: Фонды БТГУ, 1980. 228 с.].

Shumikhin E.A., Zelenina S.S., Melnikov A.A., 1987. Assessment of the Prospects for Platinum-Bearing Ultrabasic and Basic Rocks of the Uchalinsky Ore Region. *Foundations of BTGU*, Ufa, 235 p. (in Russian) [Шумихин Е.А., Зеленина С.С., Мельников А.А. Оценка перспектив платиноносности ультраосновных и основных пород Учалинского рудного района. Уфа: Фонды БТГУ, 1987. 235 с.].

Smirnov S.V., Volchenko Yu.A., 1992. The First Platinoid Mineralization Found in Chromite Ores of the Nuralinsky Massif in the South Urals. In: *Informational Collection of Scientific Papers of IGG UB RAS. Yearbook 1991*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 115–117 (in Russian) [Смирнов С.В., Волченко Ю.А. Первая находка платиноидной минерализации в хромитовых рудах Нуралинского массива на Южном Урале. Информационный сборник научных трудов ИГГ УрО РАН. Ежегодник-1991. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 1992. С. 115–117].

Snachev V.I., Saveliev D.E., Rykus M.V., 2001. Petrogeochemical Features of Rocks and Ores of Kraka Gabbro-Hyperbasite Massifs. IG USC RAS Publishing House, Ufa, 213 p. (in Russian) [Сначев В.И., Савельев Д.Е., Рыкус М.В. Петрогеохимические особенности пород и руд габбро-гипербазитовых массивов Крака. Уфа: Изд-во ИГ УНЦ РАН, 2001. 213 с.].

Su S., Li C., Zhou M.-F., Ripley E., Qi L., 2008. Controls on Variations of Platinum-Group Element Concentrations in the Sulfide Ores of the Jinchuan Ni-Cu Deposit, Western China. *Mineralium Deposita* 43, 609–622. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0186-2>.

Zaccarini F., Pushkarev E.V., Fershtater G.B., Garuti G., 2004. Composition and Mineralogy of PGE-Rich Chromitites in the Nurali Lherzolite-Gabbro Complex. *Canadian Mineralogist* 42 (2), 545–562. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.2.545>.

Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Kraynev Yu.D., 2016. Intergrowths of Platinum Group Minerals from the Miass Placer Zone (South Urals) and Their Primary Sources. *Mineralogy* 4, 31–47 (in Russian) [Зайков В.В., Мелекестцева И.Ю., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. Сростки минералов ЭПГ в Миасской россыпной зоне и их коренные источники // Минералогия. 2016. № 4. С. 31–47].