

Б.Б. Левочский^{1,2}, Т.Ю. Якич³, Д.В. Левочская¹

¹ – Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК», г. Хабаровск, Россия
LevochskiiBB@polymetal.ru

² – Институт тектоники и геофизики
им. А.Ю. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

³ – Томский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Томск, Россия

**Роль флюида в перераспределении и накоплении
металлов платиновой группы и их сплавов на примере
Дюкалинского мафит-ультрамафитового массива (Хабаровский край)**
(научный руководитель – к.г.-м.н. В.Е. Кириллов)

B.B. Levochsky^{1,2}, T.Yu. Yakich³, D.V. Levochskaya¹

¹ – Polymetal Management, Khabarovsk branch, Khabarovsk, Russia

² – Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics FEB EAS, Khabarovsk, Russia

³ – Tomsk National Research Polytechnic University, Tomsk, Russia

**The role of fluid in the redistribution and accumulation of platinum group elements
and their alloys: example of the Dukali mafic-ultramafic massif (Khabarovsk krai)**

Abstract. Awaruite, native copper, cabriite, and mineral phases of Ir, Pt, Fe-Co, Cu-Fe, Cu-Fe-Ni, Co-Fe-Ni-S, Cu-Ni-Zn-Pd, Pd-Hg, Cu-Pd, Cu-Pt, and Ni-Cu composition are described in rocks of the Dukali ultramafic massif (Khabarovsk krai). The role of the fluid associated with serpentinization of rocks is shown for the redistribution, accumulation and stabilization of native phases and alloys.

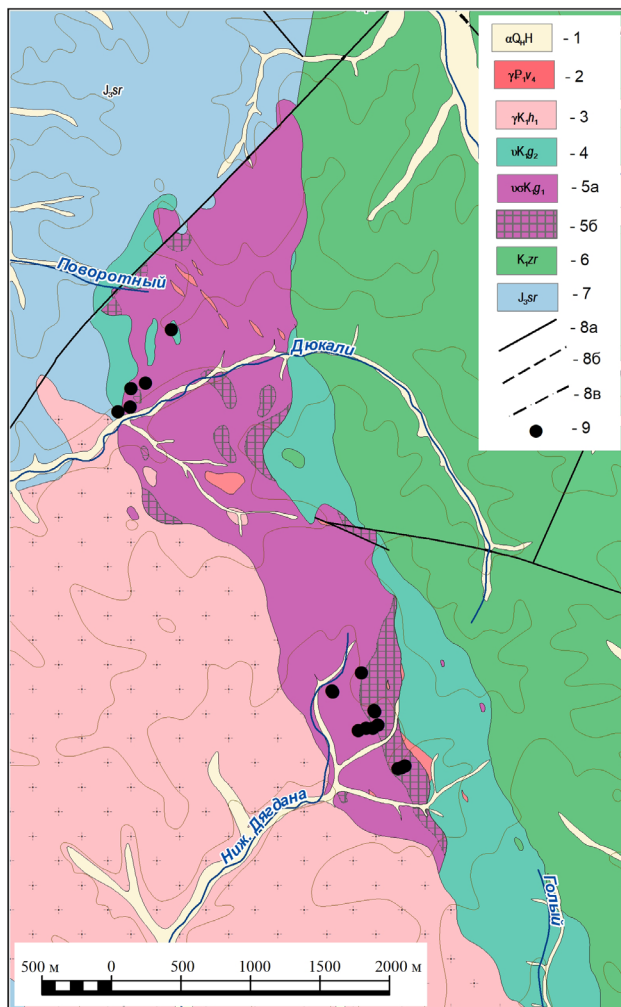
Введение. Природные сплавы описаны в метеоритах и, предположительно, слагают ядро Земли, где они содержат значительное количество элементов платиновой группы (ЭПГ). Основной объем добываемых ЭПГ локализован в расслоенных интрузиях ультраосновного-основного состава и связан с хромитовыми или сульфидными месторождениями Ni, Co и Cu [Mungall, Naldrett, 2008; Naldrett, 2011]. Самородные металлы и сплавы ЭПГ ранее считались весьма устойчивыми к постмагматическим процессам, однако было показано [Пушкарев и др., 2012; Pushkarev et al., 2014; Толстых, 2018; Степанов и др., 2020; Kutuyev et al., 2023], что эффекты, связанные с флюидно-метасоматическими преобразованиями исходных ультраосновных пород, могут играть значительную роль в перераспределении и накоплении ЭПГ. Для определения роли гидротермальных процессов при накоплении и перераспределении ЭПГ нами изучены породы Дюкалинского массива, расположенного в Комсомольском районе Хабаровского края.

Дюкалинский мафит-ультрамафитовый массив площадью около 30 км² входит в состав нижнемелового гурского ультраосновного-основного комплекса, сложенного дунитами, пироксенитами, перидотитами (первая фаза) и габбро (вторая фаза внедрения). Вмещающие породы – юрские (светлореченская толща) и раннемеловые (кабулинская толща) терригенные образования. Гранитоиды раннемелового хунгарийского и палеоценового верхнеудоминского комплекса прорывают породы Дюкалинского массива (рис. 1). С габброидами Дюкалинского массива связаны проявления Ti, а в 2018 г. в процессе проведения ГДП-200 установлены донный ореол Cu (9.5 км², 0.004–0.005 %) и признаки платиноносности: содержания Pd 4.3–2.9 мг/т и Pt 2.3–1.7 мг/т [Расказов, Конюшенко, 2017; Юрченко, Добрин, 2020].

Методы исследований. В рамках проведения площадных поисковых работ, выполняемых Хабаровским филиалом АО «Полиметалл УК», были отобраны образцы для минерало-

Рис. 1. Схематическая геологическая карта окрестностей Дюкалинского массива с точками отбора образцов, содержащих самородные фазы и сплавы.

1 – четвертичные аллювиальные отложения нерасчлененные; 2 – граниты, лейкограниты, гранитпорфиры четвертой фазы верхнедоминанского комплекса; 3 – граниты, гранодиориты хунгарийского комплекса; 4 – габбро; 5 – ультраосновные породы: 5а – перидотиты, пироксениты, 5б – плагиоклазовые верлиты; 6 – журавлёвская свита, алевролиты; 7 – светлореченская свита, алевролиты, песчаники, аргиллиты; 8 – дизъюнктивные нарушения: 8а – достоверные, 8б – предполагаемые, 8в – перекрытые рыхлыми отложениями; 9 – точки отбора проб, содержащих самородные металлы и сплавы.



го-петрографических исследований. Изготовлены 33 прозрачно-полированных шлифа и 21 аншлиф, которые описаны с помощью поляризационного микроскопа Zeiss Axio Imager A2m. Минералы проанализированы при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 Sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford X-Max 50 (Томский национальный исследовательский политехнический университет) с Si/Li кристаллическим детектором, ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 4–11.5 нА с предварительной калибровкой интенсивности зонда (11.4–11.5 нА) по кобальтовому стандарту, фокусное расстояние 15 мм.

Результаты и обсуждение. Породы Дюкалинского массива подвержены интенсивной серпентинизации, амфиболлизации, карбонатизации и хлоритизации; породы эндоконтактных зон брекчированы, катаклазированы, превращены в серпентиниты. В составе рудной минерализации преобладают магнетит, хромшпинелиды, значительно менее развиты сульфиды, представленные пентландитом, миллеритом, пиритом, халькопиритом, единичными зёрнами галенита, сфалерита, халькозина, джирита и хизлевудита. Установлены микроскопические включения самородных металлов. Рудные минералы распределены в пределах образцов в виде мелкой и тонкой вкрапленности и прожилков. Преобладающие текстуры: вкрапленная, прожилково-вкрапленная и сетчатая за счет распределения магнетита.

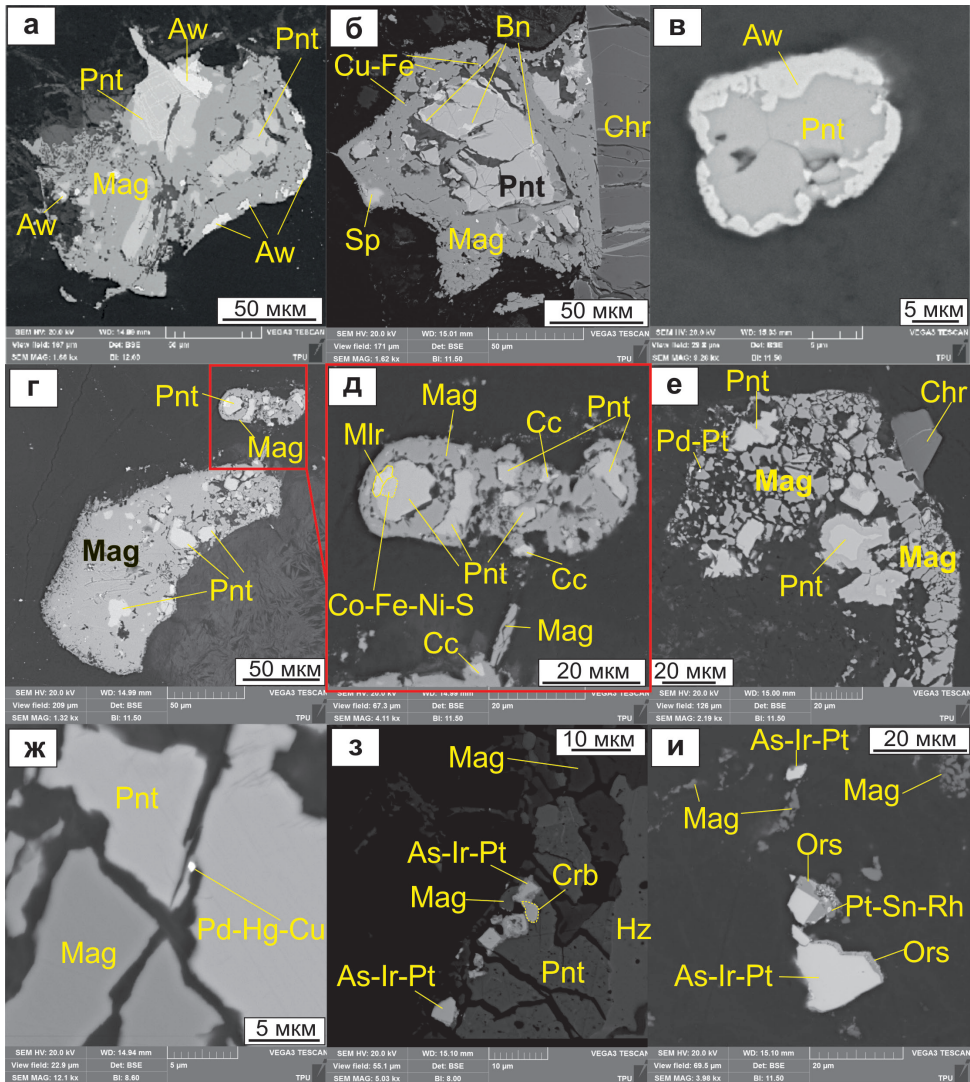


Рис. 2. Фото шлифов в обратно-рассеянных электронах: а – сросток магнетита (Mag), пентландита (Pnt) и аварюита (Aw); б – контакт зерна хромшпинелида (Chr) и магнетита с включениями пентландита, сфалерита (Sp) и сплавов Cu-Fe; в – изометричное зерно пентландита с каймой аварюита; г – магнетит с вкрапленностью пентландита; д – увеличенный фрагмент фото г, содержащий миллерит (Mlr), халькозин (Cc) и фазу состава Co-Fe-Ni-S; е, ж – сросток магнетита с хромитом, пентландитом с включениями Pd-Pt (е) и (ж) Pd-Hg-Cu сплавов; з – ассоциация сульфоарсенидов Ir и Pt (As-Ir-Pt) и кабриита (Cbr) в сростке магнетита и пентландит-хизлевудита (Hz); и – кристаллы сульфоарсенатов иридия и платины (As-Ir-Pt) с каймами орселита (Ors) с единичными включениями Pt-Sn-Rh сплавов в ассоциации с тонкозернистыми агрегатами магнетита.

Аварюит Ni_3Fe встречается в виде включений в краевых частях магнетита и пентландита (рис. 2а, в). Содержит Co до 2 мас. %. Включения Cu-Fe и Cu-Ni-Zn-Pb сплавов установлены в магнетите (рис. 2б, г, д), Fe-Ni-Co-S – в хромшпинелидах. Микроскопические включения сплавов ЭПГ (Pt-Pd, Pd-Hg-Cu), медно-никелевого сплава (Cu-Ni), сульфидов Co-Fe-Ni, сульфоарсенидов Ir и Pt, самородной меди, хизлевудита (Ni_3S_2), кабриита (Pd_2SnCu) и орсе-

нита ($Ni_{5-x}As_2$) установлены в трещинах и на периферии кристаллов пентландита (рис. 2е-и). Идиоморфные кристаллы сульфоарсенидов Ir и Pt, оконтуренные орсенитом с включениями Pt-Sn-Rh сплава (рис. 2и), встречены в пентландите из плагиоклазовых верлитов. Самородная медь размером от 1 до 100 мкм отмечается в зернах магнетита и пентландита, в краевых частях обрастает игольчатыми кристаллами куприта.

Серпентинизация является наиболее распространенным типом изменений, который воздействует на платиносодержащие перидотиты в земной коре. В процессе изменений происходит замещение оливина и пироксена серпентиновыми минералами и магнетитом посредством взаимодействия водного флюида с породой [Früh-Green et al., 2004; Evans et al., 2013, 2017] – это окислительно-восстановительная реакция, в которой одно соединение в промежуточной степени окисления, превращается в два соединения: одно с более высокой, а другое с более низкой степенью окисления [Толстых, 2018; Степанов и др., 2020; Kutyrev et al., 2023 и др.]. Возможность стабилизации самородных фаз и сплавов, в том числе аваруита (Ni_2Fe-Ni_3Fe), вайрауита ($FeCo$) и самородного железа, за счет железосодержащих сульфидов полиметаллов и оливина описана в [Klein, Bach, 2009; Foustoukos et al., 2015]. Учитывая сидерофильную природу ЭПГ и доказательства их совместного присутствия со сплавами цветных металлов, имеющих вторичную природу [Evans et al., 2013; Kutyrev et al., 2021, 2023], наблюдаемые особенности распределения металлов, вероятно, отражают подвижность ЭПГ и их переотложение в виде самостоятельных минеральных фаз при процессах серпентинизации, интенсивно проявленных в пределах Дюкалинского массива.

Выводы. В ходе исследований впервые установлена и описана рудная минерализация Дюкалинского массива, представленная аваруитом, самородной Cu, кабриитом, сульфоарсенидами Ir, Pt, Fe-Co, Cu-Fe, Cu-Fe-Ni, Co-Fe-Ni-S, Cu-Ni-Zn-Pd, Pd-Hg, Cu-Pd, Cu-Pt, Ni-Cu сплавами. Показана потенциальная рудоносность массива на ЭПГ и установлена связь образования минералов ЭПГ с процессами серпентинизации.

Исследования частично выполнены в рамках государственного задания «Наука» № FSSWW-2023-0010, тема «Комплексные исследования на базе природных геологических лабораторий». Аналитические работы частично выполнены в рамках государственного задания «Наука» № FSSWW-2023-0010, тема «Комплексные исследования на базе природных геологических лабораторий».

Литература

Пушкарёв Е.В., Телегин Ю.М., Телегина Т.В. Состав включений в платиноидах как индикатор низкотемпературного, постмагматического генезиса МПГ в дунитах Светлого Бора, Платиноносный пояс Урала // Геодинамика, рудные месторождения и глубинное строение литосферы. Екатеринбург, 2012. С. 218–220.

Рассказов С.Ю., Конюшенко Г.Ф. Отчет о результатах работ по объекту «Проведение в 2017 году региональных геолого-съёмочных работ масштаба 1:200000 на группу листов в пределах Дальневосточного ФО за исключением республики Саха (Якутия)». Создание геохимических основ на площади листов Гостеолкарты-200/2 М-52-VI, XI, М-54-XIII (Правобережная площадь) (3 этап). 2017. № 27486.

Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Антонов А.В. и др. Морфология, состав и онтогенез минералов платиновых металлов в хромитах зональных клинопироксен-дунитовых массивов Среднего Урала // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 1. С. 60–83.

Толстых Н.Д. Платиновая минерализация массивов Кондёр и Ингали // Геосферные исследования. 2018. № 1. С. 17–32.

Юрченко Ю.Ю., Добкин С.Н. Отчет о результатах работ по объекту «Проведение в 2017–2019 году региональных геолого-съёмочных работ масштаба 1:200000 на группу листов в пределах Дальневосточного ФО (южные районы)». ГДП-200 (2–3 этапы) листа М-54-XIII (Гурская площадь). 2020. № 27809.

Evans K.A., Reddy S.M., Tomkins A.G. et al. Effects of geodynamic setting on the redox state of fluids released by subducted mantle lithosphere // *Lithos*. 2017. Vol. 278–281. P. 26–42.

Evans B.W., Hattori K., Baronnet A. Serpentinite: what, why, where // *Elements*. 2013. Vol. 9. № 2. P. 99–106.

Foustoukos D.I., Bizimis M., Frisby C., Shirey S.B. Redox controls on Ni–Fe–PGE mineralization and Re/Os fractionation during serpentinization of abyssal peridotite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. Vol. 150. P. 11–25.

Früh-Green G.L., Connolly J.A.D., Plas A. et al. Serpentinization of oceanic peridotites: implications for geochemical cycles and biological activity // *The Subseafloor Biosphere at Mid-Ocean Ridges*. Geophysical Monograph Series. 2004. P. 119–136.

Klein F., Bach W. Fe-Ni-Co-O-S phase relations in peridotite-seawater interactions // *Journal of Petrology*. 2009. Vol. 50. № 1. P. 37–59.

Kutyrev A., Kamenetsky V., Kontonikas-Charos A. et al. Behavior of Platinum-group elements during hydrous metamorphism: constraints from awaruite (Ni₃Fe) mineralization // *Lithosphere*. 2023. Article ID lithosphere_2023_126.

Kutyrev A.V., Sidorov E.G., Kamenetsky V.D. et al. Platinum mineralization and geochemistry of the Matysken zoned Ural-Alaskan type complex and related placer (Far East Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 130. Article 103947.

Mungall J.E., Naldrett A.J. Ore deposits of the Platinum-group elements // *Elements*. 2008. Vol. 4. P. 253–258.

Naldrett A.J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits // *Magmatic Ni–Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry and Genesis*. Society of Economic Geologists, Denver, Colorado, 2011. P. 1–50.

Pushkarev E.V., Anikina E.V., Kamenetsky V. Non-magmatic origin of PGM-rich chromitites in the Ural-Alaskan-type intrusions: mineralogical and structural // *12th International Platinum Symposium*. Yekaterinburg, 2014. P. 275–276.

Р.В. Кужугет¹, Н.Н. Анкушева²

¹ – Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов СО РАН, г. Кызыл, Россия
rkuzhuget@mail.ru

² – Южно-Уральский федеральный научный центр
минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия

Благороднометалльная минерализация и PT-параметры формирования золото-молибден-медно-порфирового месторождения Ак-Суг (Восточный Саян)

R.V. Kuzhuget¹, N.N. Ankusheva²

¹ – *Tuvinian Institute for Exploration of
Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia*

² – *South Urals Federal Research Center of Mineralogy and
Geoecology UB RAS, Miass, Russia*

Noble metal mineralization and PT-parameters of formation of the Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit (Eastern Sayan)

Abstract. Ore mineralization of the Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit formed during three stages: 1) porphyry-copper mineralization with simple sulfides in quartz-sericite and quartz-sericite-chlorite metasomatites, 2) subepithermal Au-Bi-Te-Pd-quartz mineralization in quartz-sericite metasomatites, and 3) intermediate-sulfidation Au-Ag mineral assemblages with selenides, tellurides, and Sb and As sulfosalts in