

**ЭВОЛЮЦИЯ СУЛЬФИДНЫХ РАСПЛАВОВ
И ФОРМИРОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НОРИЛЬСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ**

Спиридонов Э.М.

Московский государственный университет, Москва, Россия

e-mail: mineral@geol.msu.ru

**EVOLUTION OF THE SULFIDE MELTS
AND FORMATIONS OF THE MINERALS OF NOBLE METALS
IN DEPOSITS AT NORIL'SK ORE FIELD**

Spiridonov E.M.

Moscow State University, Moscow, Russia

e-mail: mineral@geol.msu.ru

According to Pb isotope ratio Noril'sk sulfide melts were closely connected with «own» ore-bearing intrusions. The sequence of sulfide Ni-Cu-Fe melts crystallization: Mss1 (T cryst. ~1100°C) → Mss2 → Iss1 → Iss2...Iss5 (T cryst. ~750°C) with Fe depletion and Cu accumulation. The products of Mss transformation – considerably pyrrhotite ores are enriched of Rh, Os, Ru, Ir. The products of Iss transformation – considerably chalcopyrite (talnakhite, mooihokite) ores are rich of Pd, Pt, Ag, Au. Endemic ores – eutectic intergrowths Iss-PbSss (products of easily fusible sulfide Ni-Fe-Cu-Pb melts, T cryst. ~550°C) are uniquely rich of Pd, Pt, Ag, Au, Te, Bi, As, Sn, Sb. PGM of Noril'sk ores – intermetallides, arsenides, stibnides, bismuthides, tellurides, stannides, plumbides, cuprides – were formed by fluid reworking of Mss, Iss, PbSss under T < 490°C.

Гигант мирового класса – Норильское рудное поле содержит 75% мировых запасов палладия и 15% запасов платины, существенную долю запасов серебра и золота России. Рудное поле расположено в СЗ углу древней Восточно-Сибирской платформы, в зоне краевых дислокаций. Это область платформы с повышенной мобильностью. Осадочные толщи и вулканы плитного чехла смяты в системы пологих брахисинклиналей (с юго-запада на северо-восток – Норильская, Хараелахская) и более крутых антиклиналей (Рыбинская, Хантайская). С платобазальтами сопряжены серии интрузивов и даек. Со-Ni-Cu месторождения связаны с Норильскими, Талнахским и Таймырским интрузивами оливиновых габбро-долеритов [1]. Рудоносные интрузивы – корытообразные тела, секущие под небольшими углами (4-10°) породы рамы. Их ширина 0,5-2 км, мощность 0,1-0,3 км, длина до 25 км. Их высокотемпературная магма была насыщена флюидами, вокруг них развиты широкие ореолы пород санидинитовой, пироксен-, роговообманково- и актинолит-роговиковой фаций. Изотопный возраст образований трапповой формации: платобазальтов (от щелочных оливиновых до преобладающих толеитовых), интрузивных базитов (от безрудных габбро-долеритов до рудоносных пикритовых габбро-долеритов), магматических сульфидных Со-Ni-Cu руд – 250±1-3 млн. лет. Изотопный состав Pb свидетельствует об общем мантийном источнике производных трапповой формации (рис. 1). В.К. Котульский, Ю.М. Шейнман, М.Н. Годлевский [1], Э.А. Кулагов, В.К. Степанов, А.А. Филимонова, В.В. Дистлер, А.Л. Naldrett [6], Д.М. Туровцев обосновали магматический генезис норильских руд. Магматические сульфиды слагают однотипного состава вкрапленность в интрузивах, залежи, жилы и импренции в нижнем эндоконтакте этих интрузивов и в подстилающих роговиках, а также жилы, отходящие от рудоносных интрузивов до 800 м. Причина в том, что при остывании интрузивов сульфидные расплавы были из них в значительной степени выжаты. Тренд кристаллизационной дифференциации сульфидных расплавов: Mss1 (T крист. ~1100°C) → Mss2 → Iss1 → Iss2...Iss5 (T крист. ~750°C) с накоплением Cu и истощением Fe. Этим обусловлено зональное строение сульфидных тел: от небольших капель до гигантских залежей. Более легкие продукты кристаллизации железисто-медистых расплавов концентрируются в их кровле. Ni и Со примерно в равной степени накапливались в Mss и Iss. Иное дело – благородные металлы. Тугоплавкие плати-

ноиды – Ru, Os, Ir и особенно Rh накапливались в Mss. Легкоплавкие платиноиды – Pd и Pt, а также Au и Ag накапливались в Iss.

По образному выражению М.Н. Годлевского, норильские руды – это царство твердых растворов. При остывании сульфидные твердые растворы испытали сложные твердофазные превращения – полиморфные переходы с образованием двойников полиморфных переходов, многократный распад. Mss превратился в минералы группы пирротина (моноклинный и промежуточные пирротины, троилит) с тем или иным количеством телец распада пентландита (\pm халькопирит). Iss в зависимости от состава превратился в кубанит \pm пирротин, кубанит, кубанит \pm халькопирит, халькопирит $\text{Cu}_{16}\text{Fe}_{16}\text{S}_{32}$, с тем или иным количеством пентландита. Iss, недосыщенные серой, превратились в минералы группы халькопирита с избытком металлов – талнахит $\text{Cu}_{18}\text{Fe}_{16}\text{S}_{32}$, моихукит $\text{Cu}_{18}\text{Fe}_{18}\text{S}_{32}$, путоранит и в их сростания с халькопиритом и/или кубанитом и с пентландитом [1, 6]. Кроме того, кубанит мог распадаться на халькопирит и пирротин (троилит), происходил и обратный процесс новообразования кубанита. Эти процессы однотипны повсеместно. Поэтому при большом различии морфологии и размера тел магматических сульфидов, их минеральный состав и минеральная зональность достаточно однообразны. Местами произошла перекристаллизация продуктов первичной кристаллизации сульфидных расплавов, двойников полиморфных переходов и структур распада твердых растворов и возникли зернистые агрегаты сульфидов. Пентландит-пирротиновые руды содержат заметные количества Rh, Os, Ir, Ru и первые г/т Pd, Pt, Ag. Пентландит-халькопиритовые и пентландит-кубанитовые руды бедны тугоплавкими платиноидами и содержат десятки г/т Pd, Pt, Ag. Пентландит-талнахитовые и пентландит-моихукитовые руды содержат до 100 г/т Pd, Pt, Ag. В сплошных сульфидных рудах Pd:Pt = 4 (0,5-12), Ag:Au = 33 (обычно 19-46). Уникальная особенность месторождений Норильского рудного поля – наличие поздних легкоплавких (Т крист. $\sim 550^\circ\text{C}$) PbSss-Iss руд. Это эвтектические сростания галенит-халькопирит, -моихукит, -талнахит, которые слагают гнезда и жилы в сульфидных залежах и во вмещающих их интрузивных породах и роговиках. PbSss при отжиге превратился в галенит (матрица) с ламеллями алтаита PbTe. «Эвтектические» руды и прилегающие к ним обычные сульфидные руды уникально богаты платиноидами, серебром и золотом. По нашим данным, такие руды содержат в среднем (n=21): 1204 г/т Pd, 537 г/т Pt, 3,8 г/т Rh, 0,14 г/т Ru, 1217 г/т Ag, 16,7 г/т Au, 2640 г/т Te, 1271 г/т Bi, 866 г/т As, 598 г/т Mn, 453 г/т Sn, 412 г/т Se, 101 г/т Sb, 81 г/т Tl (прибор ISPMs-DRC-e). Судя по составу Te-содержащего галенита и S-содержащего алтаита, Т распада PbSss отвечала $490-420^\circ\text{C}$. Над каждым сульфидным телом: от небольших капель до гигантских залежей развиты ореолы флюидного воздействия, масштаб которых коррелирован с размером сульфидных тел. В этих ореолах – высокотитанистый биотит, богатый хлором (до 7 мас. %) апатит, ангидрит, паргасит, джерфшерит, бартонит, иные щелочные сульфиды, а также минералы платиноидов и золота-серебра. Это свидетельство флюидонасыщенности сульфидных расплавов, обилия в них калия и хлора.

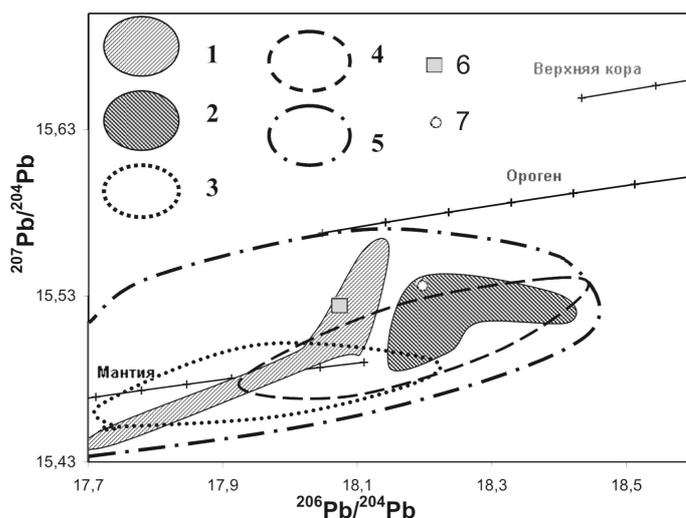


Рис. 1. Изотопные отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ образований трапповой формации.

1 – сульфидные руды Норильского месторождения, по [Wooden et al., 1992; Czamanske et al., 1994] и [2, 3]; 2 – сульфидные руды Талнахских месторождений, по [Wooden et al., 1992; Czamanske et al., 1994] и [2, 3]; 3 – габбро-долериты интрузива Норильск-1, по [Czamanske et al., 1994]; 4 – габбро-долериты Талнахского и Хараелахского интрузивов, по [Czamanske et al., 1994]; 5 – базальты трапповой формации, по [Lightfoot et al., 1993; Czamanske et al., 1994]; 6 – звягинцевит и атокуит сульфидных руд Норильского месторождения, по [3]; 7 – плюмпаладинит и поларит сульфидных руд Талнахских месторождений, по [2]; Линии эволюции изотопного состава свинца в различных резервуарах, по [Дюу, Зартман, 1982].

Эти процессы однотипны повсеместно. Поэтому при большом различии морфологии и размера тел магматических сульфидов, их минеральный состав и минеральная зональность достаточно однообразны. Местами произошла перекристаллизация продуктов первичной кристаллизации сульфидных расплавов, двойников полиморфных переходов и структур распада твердых растворов и возникли зернистые агрегаты сульфидов. Пентландит-пирротиновые руды содержат заметные количества Rh, Os, Ir, Ru и первые г/т Pd, Pt, Ag. Пентландит-халькопиритовые и пентландит-кубанитовые руды бедны тугоплавкими платиноидами и содержат десятки г/т Pd, Pt, Ag. Пентландит-талнахитовые и пентландит-моихукитовые руды содержат до 100 г/т Pd, Pt, Ag. В сплошных сульфидных рудах Pd:Pt = 4 (0,5-12), Ag:Au = 33 (обычно 19-46). Уникальная особенность месторождений Норильского рудного поля – наличие поздних легкоплавких (Т крист. $\sim 550^\circ\text{C}$) PbSss-Iss руд. Это эвтектические сростания галенит-халькопирит, -моихукит, -талнахит, которые слагают гнезда и жилы в сульфидных залежах и во вмещающих их интрузивных породах и роговиках. PbSss при отжиге превратился в галенит (матрица) с ламеллями алтаита PbTe. «Эвтектические» руды и прилегающие к ним обычные сульфидные руды уникально богаты платиноидами, серебром и золотом. По нашим данным, такие руды содержат в среднем (n=21): 1204 г/т Pd, 537 г/т Pt, 3,8 г/т Rh, 0,14 г/т Ru, 1217 г/т Ag, 16,7 г/т Au, 2640 г/т Te, 1271 г/т Bi, 866 г/т As, 598 г/т Mn, 453 г/т Sn, 412 г/т Se, 101 г/т Sb, 81 г/т Tl (прибор ISPMs-DRC-e). Судя по составу Te-содержащего галенита и S-содержащего алтаита, Т распада PbSss отвечала $490-420^\circ\text{C}$. Над каждым сульфидным телом: от небольших капель до гигантских залежей развиты ореолы флюидного воздействия, масштаб которых коррелирован с размером сульфидных тел. В этих ореолах – высокотитанистый биотит, богатый хлором (до 7 мас. %) апатит, ангидрит, паргасит, джерфшерит, бартонит, иные щелочные сульфиды, а также минералы платиноидов и золота-серебра. Это свидетельство флюидонасыщенности сульфидных расплавов, обилия в них калия и хлора.

Основная масса Pd, Pt, Au, Ag в рудах представлена собственными минералами, часть рассеяна в сульфидах (Pd и Ag в пентландите и т.п.). Минералы элементов группы платины (PGM) примерно однотипны во всех типах руд – от пирротиновых до кубанитовых, халькопиритовых, талнахитовых, моихукитовых, меняются количество и количественные соотношения PGM. Большинство геологов считают PGM норильских руд продуктами магматической кристаллизации. А.Д. Генкин, Т.Л. Евстигнеева [5], С.Ф. Служеникин, В.В. Дистлер доказали, что часть PGM – метакристаллы. Наши наблюдения показали, что вся масса норильских PGM образована путем замещения магматических сульфидных руд и прилегающих пород; PGM всех типов замещали структуры распада галенит-алтаит, при этом галенит очищался от телец распада алтаита [3]. В экзоконтактах сульфидных тел в силикатной матрице роговиков установлены метакристаллы тетраферроплатины, атокита, сперрилита (до 8 мм), электрума; их размер обусловлен масштабом тел сульфидов. Биотит и паргасит в контакте со сперрилитом и ферроплатиной свежие. Итак, генезис PGM пневматолитовый. При их формировании Pd, Pt, Au, Ag, Sn, Te, As, Sb, Bi привнесены флюидами; Cu, Pb, Fe, Ni – заимствованы из сульфидов (маякит PdNiAs заместил пентландит) [4].

Ранние пневматолитовые PGM. Это твердые растворы с широкими замещениями Pt-Pd-Au и Sn-Sb-Bi-Pb-Te-As. Характерны структуры распада твердых растворов. Распространены сростания Au-тетраферроплатины $Pt_2Fe(Fe_{Ni,Cu})$ с ламеллями Au-Pt-Pb-атокита Pd_3Sn и Au-Pt-Pb-атокита с ламеллями тетраферроплатины, а также метакристаллы PGM, образованные ансамблями структур распада твердых растворов с валовым составом $\sim (Pd,Pt)(Sn,Sb,Bi,Te)$. Среди продуктов распада эквивалентных твердых растворов – паоловит Pd_2Sn и Sb-паоловит с массой ламеллей теллуристых геверсита $PtSb_2$ – инсизвайта $PtBi_2$ и микровростков нигглиита $PtSn$. Широко развиты продукты трансформации и собирательной перекристаллизации таких образований.

Пневматолитовые PGM средней стадии – в основном продукты трансформации ранних PGM, нередко с существенным привнесением Te. Характерны обильные алтаит и мончеит $Pt(Te,Bi)_2$, зональные кристаллы масловита $PtBiTe$ – Te-Bi-геверсита – Te-Sb-инсизвайта и рустенбургита Pt_3Sn – атокита, тетраферроплатина без структур распада, звягинцевит Pd_3Pb , станнопалладинит Pd_5CuSn_2 , минералы Au-Cu. Низко теллуристые парагенезы: 1) маякит, плюмбопалладинит Pd_3Pb_2 , станнопалладинит, полярит $Pd(Pb,Bi)$, тетраферроплатина, Pt-Pd-тетрааурикуприд; 2) паоловит Pd_2Sn , Sb-паоловит, Bi-геверсит, Sb-инсизвайт, стибиопалладинит Pd_5Sb_2 . Поздние образования средней стадии – таймырит $(Pd,Pt)_9Cu_3Sn_4$ и татьянаит $(Pt,Pd)_9Cu_3Sn_4$.

Поздние пневматолитовые PGM. Среди них преобладают минералы Pd в ассоциации с минералами Au-Ag, алтаитом, гесситом. Характерные парагенезы: Te-соболевскит $PdBi$ + алтаит + масловит + гессит, Te-соболевскит + алтаит + безBi-геверсит + безSb-инсизвайт. Среди фрудита $PdBi_2$ развиты тонкозональные кристаллы Sb-масловита-майчнерита $PdBiTe$. Нередки садберит $PdSb$, котульскит $PdTe$, кабриит Pd_2CuSn . С поздними PGM постоянно ассоциируют Ag золото, электрум, кюстелит, Au серебро; преобладают кюстелит и электрум; Pt и Pd в них не обнаружены. Незональные золото и электрум развиты внутри агрегатов PGM. Зональные выделения минералов Au-Ag образуют каймы вокруг агрегатов PGM и слагают в них прожилки. Проявлены несколько типов зональности золотин – прямая с плавным снижением содержания Au от центра к краям, обратная, осцилляционная, сложная и весьма сложная. Пробность минералов ряда Au-Ag непрерывно варьирует от 870 до 0. Состав минералов Au-Ag в значительной мере контролировался активностью теллура во флюидах [4].

Наиболее поздние пневматолитовые PGM – сперрилит $PtAs_2$. Границы его метакристаллов, размер которых от микронного до 9 см, секут все более ранние PGM и минералы Au-Ag. Сперрилит, заместивший геверсит $PtSb_2$, содержит до 10 мас. % Sb.

Условия образования пневматолитовых PGM норильских руд. Верхний предел T – 490°C (T распада $PbSss$). Основная масса минералов Pt и Pd норильских руд возникла при флюидной переработке PGE-содержащих Mss , Iss , $PbSss$ в резко восстановительных условиях при T \approx 450-350°C, при крайне низкой фугитивности сульфидной серы. Судя по ассоциации многих PGM с тетрааурикупридом $AuCu$ и аурикупридом $AuCu_3$, T их образования ниже 390-385°C. Это верхний предел устойчивости аурикуприда и тетрааурикуприда.

Изотопный состав свинца пород рудоносных интрузивов и сульфидных руд Норильского месторождения заметно обособлен от изотопного состава свинца горных пород рудоносных

интрузивов и сульфидных руд Талнахского месторождения, в последних свинец заметно более радиогенный (рис. 1). Это свидетельствует о генетических связях сульфидных руд с конкретными интрузивами, о различных мантийных источниках для Норильского и Талнахского месторождений, о более высокой степени контаминации мантийных магм для Талнахского месторождения, чем, возможно, и обусловлен его гигантский масштаб [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 89 с.
2. Голубев В.Н., Гриценко Ю.Д., Спиридонов Э.М. Новые данные по изотопии свинца Норильского рудного поля // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 6. С. 806-809.
3. Спиридонов Э.М., Голубев В.Н., Гриценко Ю.Д. Изотопный состав свинца галенита, алтаита и интерметаллидов палладия в норильских рудах // Геохимия. 2009. (в печати).
4. Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. Ассоциации минералов Pd, Pt и Au в рудах Норильского месторождения // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. С. 175-192.
5. Genkin A.D., Evstigneeva T.L. Associations of platinum group minerals of the Noril'sk copper-nickel sulfide ores // Econ. Geol. 1986. V. 81. P. 1203-1212.
6. Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Berlin-Heidelberg-N.Y.: Springer, 2004. 727 p.

ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ И ЭКЗОГЕННАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ОФИОЛИТОВЫХ МАССИВАХ УРАЛА

Таловина И.В., Лазаренков В.Г., Воронцова Н.И., Мезенцева О.П.

Санкт-Петербургский государственный горный институт, Санкт-Петербург, Россия

HYDROTHERMAL AND SUPERGENE MINERALIZATION OF NICKEL SUPERGENE DEPOSITS IN OPHIOLITIC MASSIFS IN URALS

Talovina I.V., Lazarenkov V.G., Vorontsova N.I., Mezentseva O.P.

Saint-Petersburg State Mining Institute, Saint-Petersburg, Russia

Modern experimental study of nickel silicates in the Ural supergene deposits allowed to re-estimate content, composition, structural peculiarities and genesis of these main nickel ore minerals and to predict increasing of nickel reserves in Urals. According to obtained data, mineral phases of the Ural supergene nickel ores relate to two paragenic series: hydrothermal (pecoraite 2M₂Si₂O₇ + chryzotile 2M₂Si₂O₇ and 2Or₂Si₂O₇ + clinochlore 1B + talc + willemseite + phlogopite + quartz) and **supergene** (nepouite + lizardite 1T + chamosite + berthierine 1H + brindleyite + sepiolite + palygorskite + nontronite + saponite + smectite + vermiculite + quartz). In comparison with world-famous nickel deposits of tropic countries (New Caledonia, Indonesia, Brazil, Columbia and others), hydrothermal association is more widespread in the Ural nickel deposits, especially in bottom saprolite-serpentinite zone. It testifies the great hydrothermal alteration of ultramafic underlying substrate in Urals, which provides heterogeneous distribution of nickel, cobalt and impurity elements, including PGE. Apparently, the Ural nickel deposits have two-floor structure, where upper supergene floor has a «background» in the form of lower hydrothermal floor. Evidently, it requires deeper borehole exploring, than that one hold nowadays in according with surface supergene ore genesis.

В России месторождения оксидно-силикатных руд содержат около 10 % запасов никеля и практически все находятся на Урале, в Свердловской, Челябинской и Оренбургской областях. Одним из важнейших промышленных минералов этих месторождений является «гарниерит». В настоящее время термин «гарниерит» исключен из минералогических справочников, поскольку, по рентгеновским и другим данным, он состоит из нескольких минеральных фаз. Тем не менее,