

## Палладистое золото (Au, Pd) в золото-сурьмяных рудах Удерейского месторождения, Енисейский край

Рудашевский Н.С.<sup>1</sup>, Горбунов А.А.<sup>1,2</sup>, Антонов А.В.<sup>3</sup>, Аликин О.В.<sup>1,2</sup>, Рудашевский В.Н.<sup>1</sup>, Боброва О.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ООО «ЦНТ Инструментс», Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Горный университет, art.gor.psu@ya.ru

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург

<sup>4</sup> ООО «Коралайна Инжиниринг», Москва

**Аннотация.** Изучена золото-сурьмяная минерализация поступающей на обогащение руды Удерейского месторождения. В «тяжелых» концентратах гидросепарации первичной руды обнаружены зерна самородного золота (Au, Ag), содержащие участки более позднего палладистого золота (Au, Pd): 3.3-7.9 масс. % Pd, – первая находка такого соединения в Au-Sb типе оруденения. Наличие палладия (палладистого золота) – прямые геохимические и минералогические доказательства источника Au-Sb минерализации, связанного, помимо с гранитоидным, еще и с базитовым магматизмом.

**Ключевые слова:** палладистое самородное золото, золото-сурьмяные руды, генезис Au-Sb минерализации, 3D-минералогическая технология исследования.

## The palladium gold (Au, Pd) from Au-Sb ores of the Uderejskoe deposit, Enisejskij upland

Rudashevsky N.S.<sup>1</sup>, Gorbunov A.A.<sup>1,2</sup>, Antonov A.V.<sup>3</sup>, Alikin O.V.<sup>1,2</sup>, Rudashevsky V.N.<sup>1</sup>, Bobrova O.V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CNT Instruments, Saint Petersburg

<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, art.gor.psu@ya.ru

<sup>3</sup> A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg

<sup>4</sup> Coralina Engineering, Moscow

**Abstract.** Au-Sb mineralization of the Uderejskoe deposit ore has been studied. Grains of native gold (Au, Ag) has been found in the concentrates of «heavy» minerals. The native gold (Au, Ag) grains contain the more recent sites of palladium gold (Au, Pd): Pd = 3.3-7.9 wt. %. It is the first finding of palladium gold within the Au-Sb ore type. The presence of palladium gold in ores is mineralogical and geochemical evidence of two types of mineralization sources – both granite and mafic intrusions.

**Key words:** palladium native gold, gold-antimony ores, the genesis of the Au-Sb mineralization, 3D-mineralogical technology of study.

Удерейское золото-сурьмяное месторождение расположено на юге заангарской части Енисейского края и приурочено к восточному крылу Татарской антиклинали. Оруденение контролируется зоной Ишимбинского глубинного разлома (Дистанов и др., 1977; Сазонов и др., 2010).

Золоторудная минерализация Удерейского месторождения на сегодня остается слабо изученной. В ряде публикаций (Дистанов и др., 1977; Сазонов и др., 1990; Власов и др., 2011; Бутько, 2016 и др.) указывается лишь, что самородное золото в рудах – тонкодисперсное, образует мелкие (4-5 мкм) включения в арсенопирите, стибните и на границах этих сульфидов с кварцем. Отмечается, что содержание золота напрямую коррелирует с количеством арсенопирита в рудах, для стибнита такая зависимость не обнаруживается.

Нами изучена представительная проба поступающей на обогащение руды Удерейского месторождения. Исследования руды проведены по оригинальной 3D-минералогической технологии, включающей «бережное» (стадиальное кратковременное) дробление первичного материала, мокрый рассев на узкие классы крупности, гравитационное обогащение узких размерных фракций

запатентованным методом гидросепарации (HS-концентраты) и изготовление однослойных полированных шлифов из HS-концентратов (Рудашевский и др., 2001, 2017, 2018; Rudashevsky et al., 2001; Рудашевский, Рудашевский, 2006, 2007, 2017; Cabri et al., 2006; 2008; Oberthür et al., 2008). Определен химический состав первичной руды и продукта её обогащения. Полированные шлифы HS-концентратов изучены микронзондовым методом (Camscan 2500 с полупроводниковым детектором Pentafet, ВСЕГЕИ).

В полированных шлифах HS-концентратов удерейской руды на микронзонде диагностировано палладистое золото (Au, Pd) – впервые для золото-сурьмяного типа оруденения. Это редкое соединение (Au, Pd) установлено в Бразилии под названием «порпецит», но название не было утверждено КНМ ММА, поскольку минерал является структурным аналогом и разновидностью по химическому составу самородного золота (www.mindat.org).

Концентраты гидросепарации удерейской руды представлены тремя главными сульфидами: арсенопиритом, пиритом и стибнитом. Встречены также единичные зерна цинкениита  $Pb_9Sb_{22}S_{42}$ , халькостибита  $CuSbS_3$ , ульманнита  $NiSbS$ , галенита  $PbS$ , сфалерита  $ZnS$  и киновари  $HgS$ .

В мелких фракциях «тяжелых» концентратов (71-45 мкм и < 45 мкм) определены следующие минералы золота: самородное золото – твердый раствор (Au, Ag), самородное палладистое золото (Au, Pd), самородное сурьмянистое золото (Au, Sb), ауростибит  $AuSb_2$  и практически чистое самородное золото Au.

Самородное золото (Au, Ag) – свободные зерна в продукте дробления руды размерами 30-70 мкм, имеет широкий интервал составов: 2.1-24.2 масс. % Ag. Вариации концентрации Ag определяются как в различных индивидах, так и в пределах одного зерна. Высокопробные участки тяготеют к краям зерен и содержат реликтовые фрагменты богатых Ag первичных составов. Зерна самородного золота (Au, Ag) содержат включения пирита и стибнита. Ауростибит  $AuSb_2$  обрастает тонкими каймами практически чистого самородного золота и сурьмянистого золота (Au, Sb), содержащего 3-6 масс. % Sb. В арсенопирите (реже в пирите и стибните), кроме того, обнаружены многочисленные тонкие (доли микрометра – 10 мкм) неправильной формы включения практически чистого самородного золота.

В составе нескольких «крупных» зерен самородного золота (Au, Ag) на микронзонде нами диагностированы участки палладистого золота. Новообразования (Au, Pd), приурочены к краям зерна-

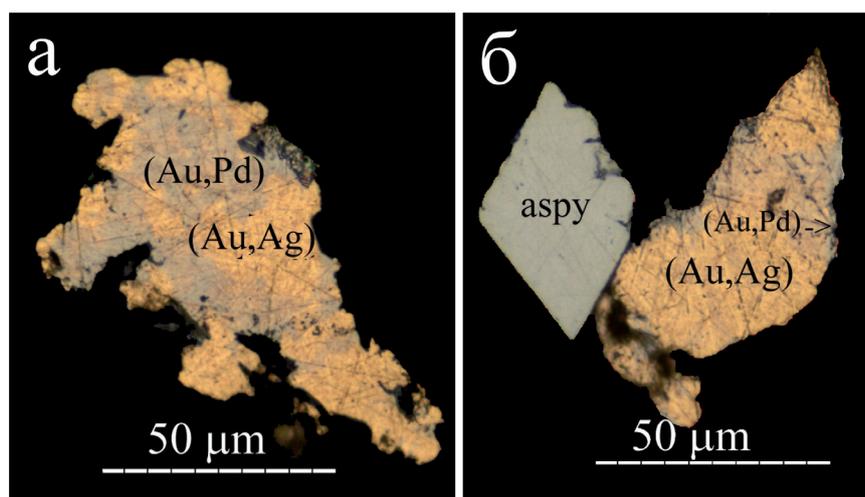


Рис. 1. Свободные зерна самородного золота (Au, Ag) с участками палладистого золота (Au, Pd); полированный шлиф HS-концентрата руды, фракция 45-71 мкм; фото в отраженном свете (стереомикроскоп MZ6, камеры Leica DC 300, программный пакет Autopano Giga, ВСЕГЕИ); aspy – арсенопирит.

Fig 1. The recovered grains of native gold (Au, Ag) containing sites of palladium gold (Au, Pd). Polished mount of HS-concentrate (45-71 μm). Optical image (reflected light). MZ6 stereomicroscopy, Leica DC 300 camera, Autopano Giga software, Karpinsky Institute. Aspy – arsenopyrite.

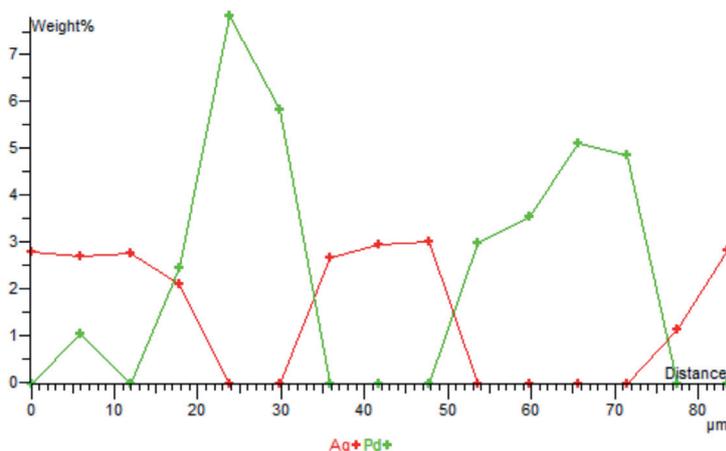


Рис. 2. Концентрационные кривые Ag и Pd по профилю через середину зерна (Au,Ag)+(Au,Pd) – см. рис. 1, а.

Fig. 2. The concentration curves of Ag and Pd along the profile through the middle of the grain (Au,Ag)+(Au,Pd) – see Fig. 1, a.

матрицы и проникают в него, замещая первичное самородное золото (Au, Ag) – (рис. 1). В составе палладистого золота (3.3-7.9 масс. % Pd) серебро практически отсутствует, в реликтовых участках самородного золота концентрации серебра невысокие (2.3-2.6 масс. %) – табл. 1, рис. 2.

Таблица 1. Химический состав (масс. %) зерен самородного золота (Au,Ag), содержащего участки палладистого золота (Au, Pd).

Table 1. Chemical composition (wt. %) of native gold grains (Au, Ag) and palladium gold sites (Au, Pd).

Анализ	Рисунок	Разновидность	Au	Ag	Pd
1	1, а, среднее, n=7	(Au,Ag)	97.4	2.6	не обн.
2	1, а, макс Pd	(Au,Pd)	92.1	не обн.	7.9
3	1, б, среднее, n=5	(Au,Ag)	97.7	2.3	не обн.
4	1, б, макс Pd	(Au,Pd)	96.7	не обн.	3.3

Примечание. n – количество анализов; макс Pd – анализ с максимальным содержанием Pd; условия анализов: микросонд Camscan 2500 с полупроводниковым детектором Pentafet, 20 kV, 20 nA, диаметр зонда 1 мкм, стандарты – чистые металлы.

С учетом новых минералогических данных в рудных продуктах определены содержания Au и Pd (табл. 2). Pd установлен в заметных количествах в первичной руде (ан. 1 – 0.023 г/т), накапливается в тонкой фракции руды (ан. 2 – 0.483 г/т) и концентрируется гравитационным обогащением (гидросепаратор HS-11) в этом продукте (ан. 3 – 0.977 г/т).

Таблица 2. Распределение золота и палладия (г/т) в изученных рудных продуктах.

Table 2. Distribution of Au and Pd (g/t) within the studied ore products.

Объект	Au	Pd
1. Руда (первичный материал, продукт крупностью <500 мкм)	1.503	0.023
2. Руда первичная, класс крупности 10-45 мкм	1.339	0.483
3. Руда после обогащения, класс крупности 10-45 мкм	7.511	0.977

Примечание. Химическая лаборатория ALS Group (Москва), пробирный анализ.

Золоторудную минерализацию в регионе обычно связывают с гранитоидным либо с основным магматизмом (Петровская, 1973; Новгородова, 1983; Некрасов, 1981; Сазонов и др., 1990; Спиридонов, 2010). Абсолютный возраст сурьмяной и золото-сурьмяной минерализации Енисейского Кряжа лежит в интервале 677-605 млн. лет (Власов, 1985; Сазонов и др., 1990; Неволько, 2009). В ангарской части Енисейского кряжа магматические породы представлены от ультрамафитов до кислых, включая их щелочные разновидности. Преобладающим развитием пользуются разновозраст-

ные гранитоиды (возраст в интервале 1000–625 млн. лет). Гранитоиды занимают около 10 % территории, на долю других магматических пород приходится около 0.1 % площади региона (Сазонов и др., 2010). Вместе с тем, П.А Неволько и А.С Борисенко (2009) полагают, что временные интервалы формирования сурьмяной и золотой минерализации на Енисейском кряже не совпадают с основными этапами развития гранитоидного магматизма, а в большей мере коррелируют с периодами проявления щелочных и щелочно-базитовых дайковых комплексов.

Новые минералогические данные выявили, по крайней мере, два этапа формирования золоторудной минерализации на Удере́йском месторождении: 1) образование первичного традиционно-самородного золота I (Au, Ag), 2) формирование более позднего (замещающее самородное золото I) высокопробного (до 100 % Au) золота + палладистое самородное золото (Au, Pd) + аурустибит  $AuSb_2$  + сурьмянистое самородное золото (Au, Sb). Второй этап, видимо, связан с наложением сурьмяной минерализации на первичную золото-сульфидную. При этом происходила ремобилизация и перекристаллизация самородного золота – формирование новых его генераций: вынос серебра → чистое самородное золото, привнос сурьмы → аурустибит и сурьмянистое самородное золото, привнос палладия → палладистое золото. Особенности химического состава новых генераций минералов золота и сопровождающих их сульфидов (стибнит, цинкени́т, халькостибит, улманнит) являются прямыми геохимическими и минералогическими доказательствами источника Au-Sb минерализации, связанного, помимо с гранитоидным, еще и с наложенным базитовым магматизмом.

В заключение отметим, что получение надежной новой столь сложной минералогической информации для бедных тонкозернистых Au-Sb руд является новым примером высокой чувствительности и информативности использованной 3D-минералогической технологии исследования руд.

## Литература

1. Буряк В.Н. Метаморфизм и рудообразование. М. Изд-во: Недра. 1982. 256 с.
2. Бутько Е.Р. Золото-арсенипирит-пиритовые руды Удере́йского месторождения / Матер. Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив-2016» посвящённой Году образования в СНГ. Красноярск. 2016. С. 20–23.
3. Власов Е.А., Бакшеев И.А., Нагорная Е.В., Прокофьев В.Ю., Аплеталин А.В., Свинтицкий И.Л. Минеральная зональность и условия формирования Au-Sb месторождения Удере́й, Красноярский край // Мат-лы V Междунар. Симпозиума «Минеральное разнообразие – исследование и сохранение». София. 2011. С. 85–90.
4. Дистанов Э.Г., Оболенский А.А., Кочеткова К.В., Борисенко А.С. Удере́йское сурьмяное месторождение в Енисейском кряже / Геология и генезис рудных месторождений юга Сибири (отв. ред. В.А. Кузнецов). АН СССР. Сиб. отд. Тр. ин-та геологии и геофизики. Вып. 364. Новосибирск. 1977. С. 5–32.
5. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.
6. Новгорова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука. 1983. 287 с.
7. Петров В.Г. Золото в опорных разрезах верхнего докембрия западной окраины Сибирской платформы / В.Г. Петров. Новосибирск: Наука. 1976. 211 с.
8. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса) М. Изд-во: Наука. 1973. 348 С.
9. Рудашевский Н.С., Лупал С.Д., Рудашевский В.Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 216530. Российская Федерация. М. 2001.
10. Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 2281808. Российская Федерация. М. 2006.
11. Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 69418, полезная модель. Российская Федерация. М. 2007.
12. Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н. 3D-Минералогическая технология исследования руд и технологических продуктов коренных месторождений благородных металлов / Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО». СПб. 2017. Т. 2. С. 146–148.
13. Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н., Антонов А.В. Универсальная минералогическая технология исследования горных пород, руд и технологических продуктов // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 88–102.
14. Сазонов А.М., Ананьев А.А., Власов В.С. Об условиях пространственного совмещения золоторудной и сурьмяной минерализации в сланцевых толщах одного из районов Сибири / Геологические и геохимические критерии золотого оруденения. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. 1990. С. 84–96.

15. Сазонов А.М., Ананьев А.А., Полева Т.В., Хохлов А.Н., Власов В.С., Звягина Е.А., Федорова А.В., Тишин П.А., Леонтьев С.И. Золоторудная металлогения Енисейского кряжа: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. Изд-во: Сибирский федеральный университет. 2010. Т. 3. № 4. С. 371–395.
16. Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов / Тр. Всеросс. (с междунар. участием) науч. конф., посвященной 80-летию Кольского научного центра РАН (Ред. Ю.Л. Войтеховский). Апатиты. 2010. С. 143–171.
17. Cabri L.J., Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Lastra R. Hydroseparation: a new development in process mineralogy of platinum-bearing ores / CIM Bull. 2006. V. 99(1092). P. 1–7.
18. Cabri L.J., Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Oberthür T. Electric-pulse disaggregation (Epd), hydroseparation (Hs) and their use in combination for mineral processing and advanced characterization of ores / Canadian Mineral Processors 40th Annual Meeting, Ottawa, Proceedings Volume. 2008. P. 211–235.
19. Oberthür T., Melcher F., Sitnikova M., Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Cabri L.J., Lodziak J., Klosa D., Gast L. Combination of novel mineralogical methods in the study of noble metal ores - focus on pristine (Bushveld, Great Dyke) and placer platinum mineralization / Proceedings, 9th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), Brisbane, QLD. 2008. P. 187–194.
20. Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Lupal S.D., Method for separating granular materials and device for carrying out said method / Patent Cooperation Treaty PCT/RU01/00123, Moscow, 20 April 2001, 10 May 2001. (Russian and English text).