

Самородное золото в Полдневском месторождении демантоида

В. В. Мурзин, Е. С. Карасева, А. Ю. Кисин

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: murzin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 31.07.2023 г., принята к печати 18.10.2023 г.

Объект исследования. Жильные карбонат-магнетит-серпентиновые породы с гнездами ювелирного граната (демантоида) среди антигоритовых серпентинитов Коркодинского массива на Среднем Урале. **Цель.** Охарактеризовать состав самородного золота и физико-химические условия его образования в ранее не описанном типе золотой минерализации в ультраосновных породах. **Материалы и методы.** Исследовались зерна самородного золота из карбонат (кальцит)-серпентиновых (клинохризотил) жил с демантоидом и вмещающих серпентинитов с помощью сканирующей электронной микроскопии (JSM-6390LV фирмы Jeol), рентгеноспектрального микроанализа (Samеsa SX 100 с пятью волновыми спектрометрами). **Результаты.** Выявлены существенные различия в морфологии и химическом составе зерен самородного золота из серпентинитов и карбонат-серпентиновых жил. В серпентините оно представлено Au-Cu-интерметаллидами – аурикупридом AuCu₂ и тетрааурикупридом AuCu. Составы интерметаллидов близки к стехиометрическим с избытком меди до 0.1 ф.е. В тетрааурикуприде присутствуют редкие включения электрума (37–44 мас. % Ag, проба 555–617‰), а в аурикуприде – сульфидов меди и никеля. Включения сульфидов представлены сростаниями дигенита (Cu/S = 1.88) с пентландитом, а также дигенита с пламенивидными вросками борнит-дигенинового твердого раствора. В краевых частях зерен аурикуприда отмечены гипергенные каймы мощностью до 100 мкм. Гипергенное золото в отраженном свете имеет бурый цвет, пористое, коллоидное или монокристаллическое строение. Для него характерны низкие содержания Cu (1.4–10.6 мас. %) по отношению к первичному составу аурикуприда (50.7–52.3 мас. % Cu), дефицит суммарного содержания компонентов, варьирующийся от 1.5 до 20.0 мас. %, и присутствие на EDX-спектрах линии кислорода. Зерна самородного золота из жильной карбонат-серпентиновой массы сложены частицами Au-Ag твердых растворов и относятся к высокопробному золоту (913–961‰, 4–10 мас. % Ag), реже более низкопробному (808–866‰, 13.0–19.4 мас. % Ag). Минеральные включения в серебристом золоте не обнаружены. **Выводы.** Различия в составе самородного золота из жильной массы и серпентинита отражают изменчивость физико-химических условий его образования. Отложение Au-Cu интерметаллидов происходит из флюидов с низкой фугитивностью кислорода и серы: $\log f_{S_2} = -8 \dots -20$, $\log f_{O_2} = -26 \dots -39$, а Au-Ag твердых растворов – при более высоких значениях фугитивности серы и более окисленных условиях. Предполагается, что медистое золото сопряжено с антигоритовой серпентинизацией, когда тело гипербазитов находилось на глубине. При его подъеме к поверхности и декомпрессии восстановительные условия сменяются окислительными, а флюид становится углекислотным. В этих условиях образуются карбонат-серпентиновые жилы с демантоидом и самородным серебристым золотом. Наличие продуктов гипергенного замещения аурикуприда коллоидного, пористого и трещиноватого строения, а также присутствие в EDX-спектрах линии кислорода свидетельствуют как о процессах перераспределения микропор, образованных при выносе меди, так и о возможности формирования оксидов или гидроксидов золота и меди.

Ключевые слова: самородное золото, медистое золото, фугитивность серы, демантоид, Коркодинский массив, Средний Урал, Полдневское месторождение

Источник финансирования

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ Гос. учета НИОКТР 123011800011-2). Использовалось оборудование ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН, дооснащение и комплексное развитие которого осуществляются при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-680)

Native gold in the Poldnevskoye demantoid deposit

Valery V. Murzin, Elizaveta S. Karaseva, Alexander Yu. Kissin

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: murzin@igg.uran.ru

Received 31.07.2023, accepted 18.10.2023

Для цитирования: Мурзин В.В., Карасева Е.С., Кисин А.Ю. (2024) Самородное золото в Полдневском месторождении демантоида. *Литосфера*, 24(4), 710–721. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-710-721>

For citation: Murzin V.V., Karaseva E.S., Kissin A.Yu. (2024) Native gold in the Poldnevskoye demantoid deposit. *Lithosphere (Russia)*, 24(4), 710–721. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-710-721>

© В.В. Мурзин, Е.С. Карасева, А.Ю. Кисин, 2024

Research subject. Vein carbonate-magnetite-serpentine rocks with nests of gem garnet (demantoid) among antigorite serpentinites of the Korkodinsky massif in the Middle Urals. **Aim.** To characterize the composition of native gold and physicochemical conditions of its formation in a previously undescribed type of gold mineralization in ultrabasic rocks. **Materials and methods.** Grains of native gold from carbonate (calcite)-serpentine (clinochrysotile) veins with demantoid and host serpentinites were examined by scanning electron microscopy (JSM-6390LV by Jeol) and X-ray microanalysis (Cameca SX 100 with five-wave spectrometer). **Results.** Significant differences in the morphology and chemical composition of native gold grains from serpentinite and carbonate-serpentine veins were revealed. In serpentinite, these differences are represented by Au–Cu intermetallides, i.e., AuCu₃ auricupride and AuCu tetraauricupride. The intermetallide compositions are close to stoichiometric with a Cu excess of up to 0.1 p.u. Rare inclusions of electrum (37–44 wt % Ag, sample grade 555–617‰) are present in tetraauricupride; copper and nickel sulfides are present in auricupride. Sulfide inclusions are represented by accretions of digenite (Cu/S = 1.88) with pentlandite, as well as digenite with flame-like phenocrysts of bornite-digenite solid solution. In the peripheral parts of auricupride grains, hypergene rims of up to 100 µm in thickness were detected. Hypergene gold in reflected light is brown in color, having a porous, collomorphic or monolithic-cracked structure. This gold is characterized by low Cu contents (1.4–10.6 wt %), relative to the primary auricupride composition (50.7–52.3 wt % Cu), a deficit of total components ranging from 1.5 to 20.0 wt %, and the presence of an oxygen line on EDX spectra. The grains of native gold from the vein carbonate-serpentine mass are composed of Au–Ag solid solution particles, belonging to high-grade gold (913–961‰, 4–10 wt % Ag), less frequently to lower-grade gold (808–866‰, 13.0–19.4 wt % Ag). Mineral inclusions in silver gold were not found. **Conclusions.** Differences in the composition of native gold from vein mass and serpentinite reflect the variability of physical and chemical conditions of its deposition. The deposition of Au–Cu intermetallides occurred from fluids with low oxygen and sulfur fugitivities: $\log f_{S_2} = -8 \dots -20$, $\log f_{O_2} = -26 \dots -39$, and Au–Ag solid solutions under higher values of sulfur fugitivities and more oxidized conditions. It is assumed that cuprous gold is associated with antigorite serpentinization, when the hyperbasite body was in the depth. During its rise to the surface and decompression, reducing conditions were replaced by oxidizing conditions. As a result, the fluid became carbonic acidic. In such conditions, carbonate-serpentine veins with demantoid and native silver gold were formed. The presence of auricupride hypergene replacement products of collomorphic, porous and fractured structure, as well as the presence of oxygen line in EDX spectra testify both to the processes of redistribution of micropores formed during copper removal and a possible formation of oxide or hydroxide forms of gold and copper.

Keyword: native gold, cuprous gold, sulfur fugacity, demantoid, Korkodinsky massif, Middle Urals, Poldnevskoye deposit

Funding information

The studies were carried out as part of the IGG UB RAS State assignment (state registration No. 123011800011-2) using the “Geoanalitik” shared research facilities of the IGG UB RAS. The re-equipment and comprehensive development of the “Geoanalitik” shared research facilities of the IGG UB RAS was financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-680)

Acknowledgements

The authors are grateful to S.G. Seleznev and other geologists of “Mayak Corporation” for their assistance in obtaining research samples.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние исследования благороднометаллической минерализации в офиолитовых гипербазитах Урала выявили большое количество типов золотосодержащих метасоматических апоультрабазитовых пород. Среди них описаны листовиты, родингиты, приразломные антигоритовые серпентиниты, амфиболовые (нефриты, тремолитовые и антофиллитовые породы), тальковые, тальк-хлоритовые и тальк-карбонатные, сопряженные с листовитами и кварцевыми жилами или с прожилками серпентина (серпофита), хлоритолиты, а также магнетит-хлорит-карбонатные метасоматиты. На Южном Урале многие из них служили объектами старательской добычи золота (месторождения Золотая Гора, Каганское, Кировское, Мурашкина Гора и др.). Самородное золото в этих месторождениях представлено Au–Ag, Au–Cu, Au–Ag–Cu (иногда с примесями Hg и Pd) химическими разновидностями (Мурзин, 2009).

Объектом настоящего исследования стали карбонат-магнетит-серпентиновые жилы с гнездами ювелирного граната (демантоида) в антигоритовых серпентинитах Коркодинского массива, приуроченного к зоне ГУР на Среднем Урале. Самородное золото в месторождениях демантоида привлекло наше внимание как ранее не описанный тип золотой минерализации в ультраосновных породах. Оно было обнаружено в карьере Полдневского месторождения демантоида и кратко описано в (Карасева и др., 2019).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ КОРКОДИНСКОГО МАССИВА И ПОЛДНЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Коркодинский массив имеет протяженность до 12 км и ширину до 2 км и вытянут в ССЗ направлении согласно простиранию Коркодинского дизъюнктивного нарушения, входящего в зону Главного Уральского разлома. Под Коркодинским масси-

вом понимают скопление тектонических пластин крутого восточного падения, сложенных породами ультраосновного состава (Карасева и др., 2019). Среди ультраосновных пород преобладают серпентинизированные и тектонизированные дуниты и клинопироксениты, реже гарцбургиты. На месторождении распространены субмеридиональные линейные зоны повышенной трещиноватости (разуплотнения) протяженностью до 400 м при ширине 0.5–4.5 м (Карасева и др., 2019). К некоторым из них приурочены гнезда демантоидной минерализации, а сами зоны вскрыты небольшими карьерами-траншеями протяженностью до 150 м при ширине 3–5 м и глубиной до 20 м.

Антигоритовый серпентинит содержит редкую вкрапленность реликтового хромшпинелида, а в зонах трещиноватости наблюдается сеть карбонатных (кальцит, пироаурит), хризотилowych и серпентин-бруситовых прожилков, к которым приурочены скопления укрупненных зерен магнетита. В карбонатизированном серпентините обнаружены зерна самородной меди, хизлевудита, брейтгауптита (NiSb), ртутистого серебра, Со-пентландита и аваруита.

В тектонизированных зонах локализуются многочисленные маломощные жилы (до 10–20 см), сложенные различными разновидностями серпентина (клинохризотил, лизардит, антигорит) и кальцита, иногда с демантоидом. Помимо указанных минералов, в жилах присутствует магнетит и полиминеральные агрегаты (“желваки”) размером от нескольких мм до 2–3 см, сложенные купритом, самородными и сульфидными минералами Cu, Ni, Fe, Ag (хизлевудит, Со-пентландит, никелистая и золотистая медь (2.7–5.0 мас. % Ni, 15.0–17.8 мас. % Au), ртутистое серебро, аваруит и др.) (Мурзин и др., 2023).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее крупные зерна золота размерами до 6 мм встречены в бурых обохренных серпентинитах с рассеянной вкрапленностью магнетита в непосредственном контакте их с жильной кальцит-клинохризотиловой породой (рис. 1). Частицы самородного золота в образцах породы с гнездами демантоида обнаружены не были, однако большое количество их размером до 0.2 мм извлечено путем ручной промывки в лотке материала хвостов обогащения жильной массы на отсадочной машине, использовавшейся в технологии извлечения демантоида. Кроме того, изучены зерна золота при промывке разрыхленного материала жильной массы в борту карьера и вскрытых траншеей аллювиальных отложений р. Бобровка.

Морфология зерен золота и химический состав зерен исследованы в ЦКП “Геоаналитик” (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург)

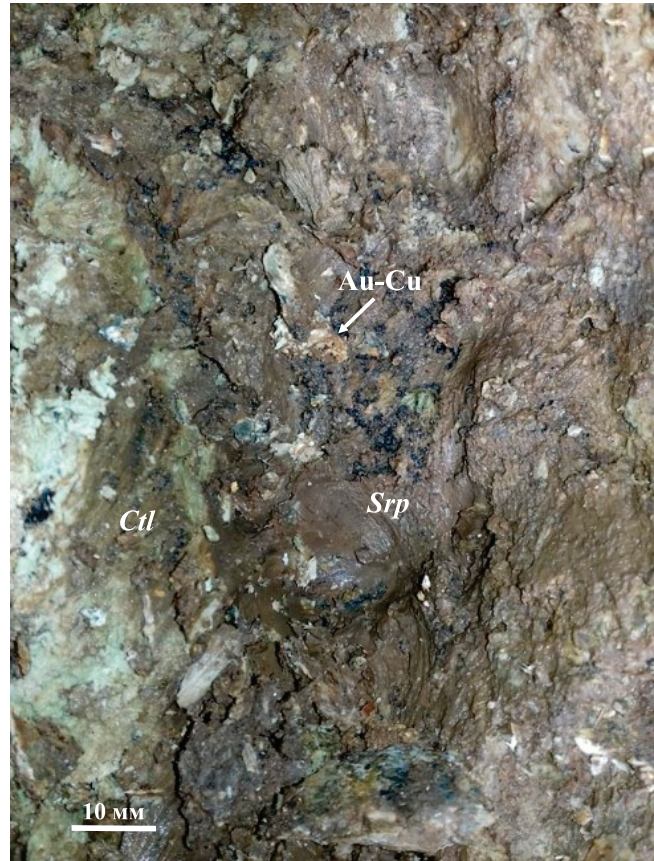


Рис. 1. Скопление зерен медистого золота (Au-Cu) в обохренном серпентините (*Srp*) вблизи контакта с карбонат-клинохризотиловой (*Ctl*) жильной массой.

Fig. 1. Aggregation of cuprous gold grains (Au-Cu) in serpentinite (*Srp*) near the contact with carbonate-chrysotile (*Ctl*) vein mass.

бург) на микроанализаторе Cameca SX 100 с пятью волновыми спектрометрами и энергодисперсионной приставкой Bruker XFlash 6 (аналитик В.А.Булатов). Условия анализа: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда 40 нА, стандарты и линии – халькопирит (SK α и CuK α), пирит (FeK α), FeNiCo (NiK α), металлы (AuM α , AgL α). Для съемки EDX-спектров и получения снимков в режиме BSE использовался электронный сканирующий микроскоп JSM-6390LV фирмы Jeol (аналитик Л.В. Леонова).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По размерности, морфологии и химическому составу выявлены существенные различия изученных нами частиц самородного золота, извлеченных из обохренных серпентинитов, с одной стороны, и жильной карбонат-серпентиновой массы, несущей демантоид, с другой.

В **обохренном серпентините** присутствуют комковидные зерна розоватого медистого золота. Поверхность его зерен чистая или участками покрыта корочками, сложенными серпентином, силикатами никеля и оксидами железа (рис. 2а, б).

По химическому составу зерна медистого золота представлены золотомедными интерметаллидами – аурикупридом AuCu_3 и более редким тетрааурикупридом AuCu (рис. 3, табл. 1, ан. 1–6). В полированных срезах в краевых частях зерен медистого золота видно образование каемок оптически бурого цвета мощностью до 100 мкм, наиболее активно проявленное в аурикуприде. Образование каемок по медистому золоту сопровождается выносом из него меди (см. табл. 1, ан. 13–24), что характерно для золота гипергенного происхождения (Мурзин, Малюгин, 1987). По строению выделено несколько

типов гипергенного золота: пористое, колломорфное и монокристаллическое трещиноватое (рис. 4). В участках пористого строения при большом увеличении проглядывается слоистое концентрически-зональное строение, обусловленное чередованием монокристаллических и “полых” слоев (см. рис. 4в).

Определение химического состава каемок гипергенного золота на аурикуприде указывает на существенно более низкие содержания в нем меди (1.4–10.6 мас. %) и небольшое обогащение железом (до 1.2 мас. %) по отношению к первичному составу зерен (50.7–52.3 мас. % Cu, <0.1 мас. % Fe). Для всех типов гипергенного золота характерен значительный дефицит суммарного содержания компонентов, варьирующий от 1.5 до 20.0 мас. % (см. табл. 1). При этом на EDX-спектрах постоянно присутствует линия кислорода (рис. 4г). В трещино-

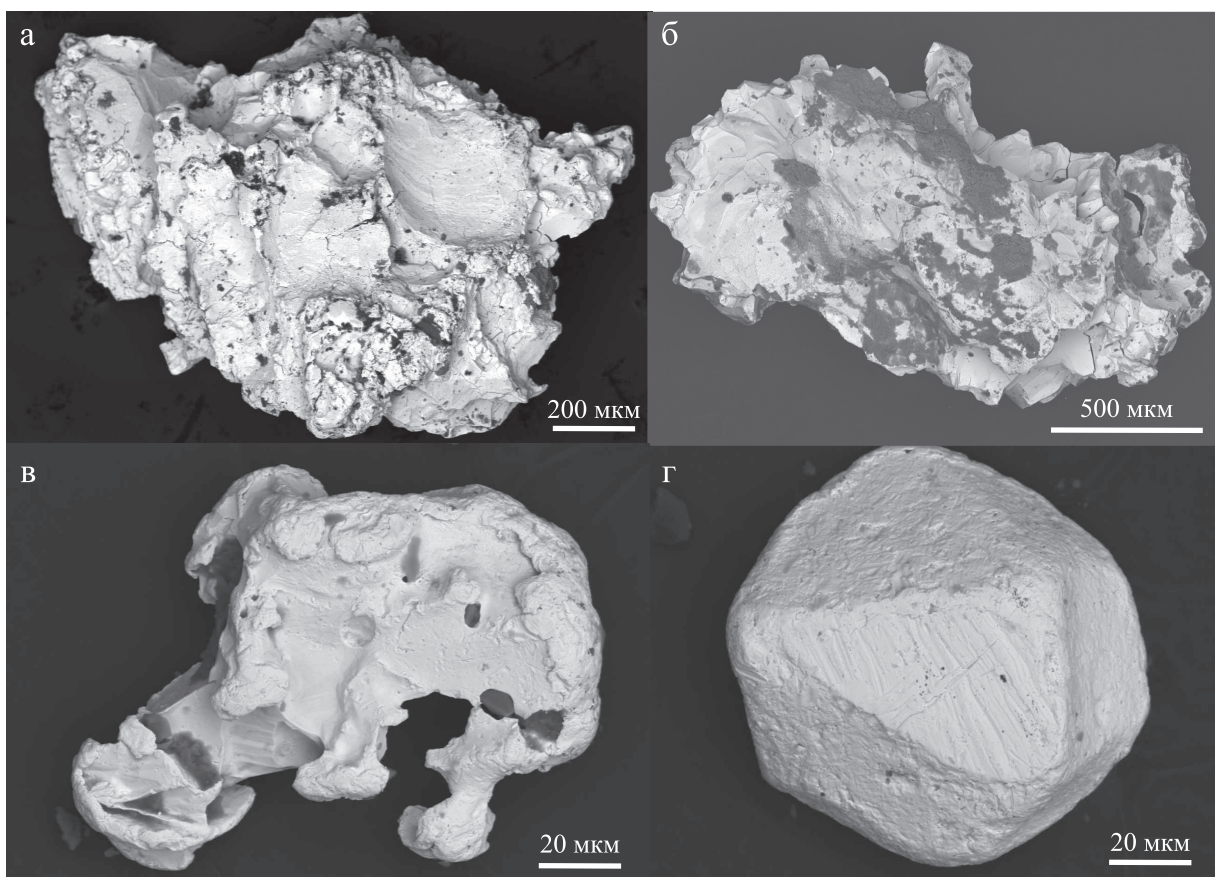


Рис. 2. Морфология и строение зерен самородного золота.

а, б – медистое золото из обохренного серпентинита с чистой поверхностью (а) или локальными корочками, сложенными серпентином, силикатами никеля и оксидами железа (темно-серые) (б); в, г – серебристое золото из жильной карбонат-серпентиновой массы с демантоидом. Краевые части зерен серебристого золота несут следы пребывания в отсадочной машине (завальцовка, царапины). Снимки в режиме обратнорассеянных электронов (BSE).

Fig. 2. Morphology and structure of native gold grains.

а, б – cuprous gold from debonded serpentinite with a clean surface (a) or with local crusts composed of serpentine, nickel silicates and iron oxides (dark grey) (b); в, г – silver gold from vein carbonate-serpentine mass with demantoid. The peripheral parts of silver gold grains bear traces of stay in the depositing machine (rolling, scratches). Images in the back-scattered electron (BSE) mode.

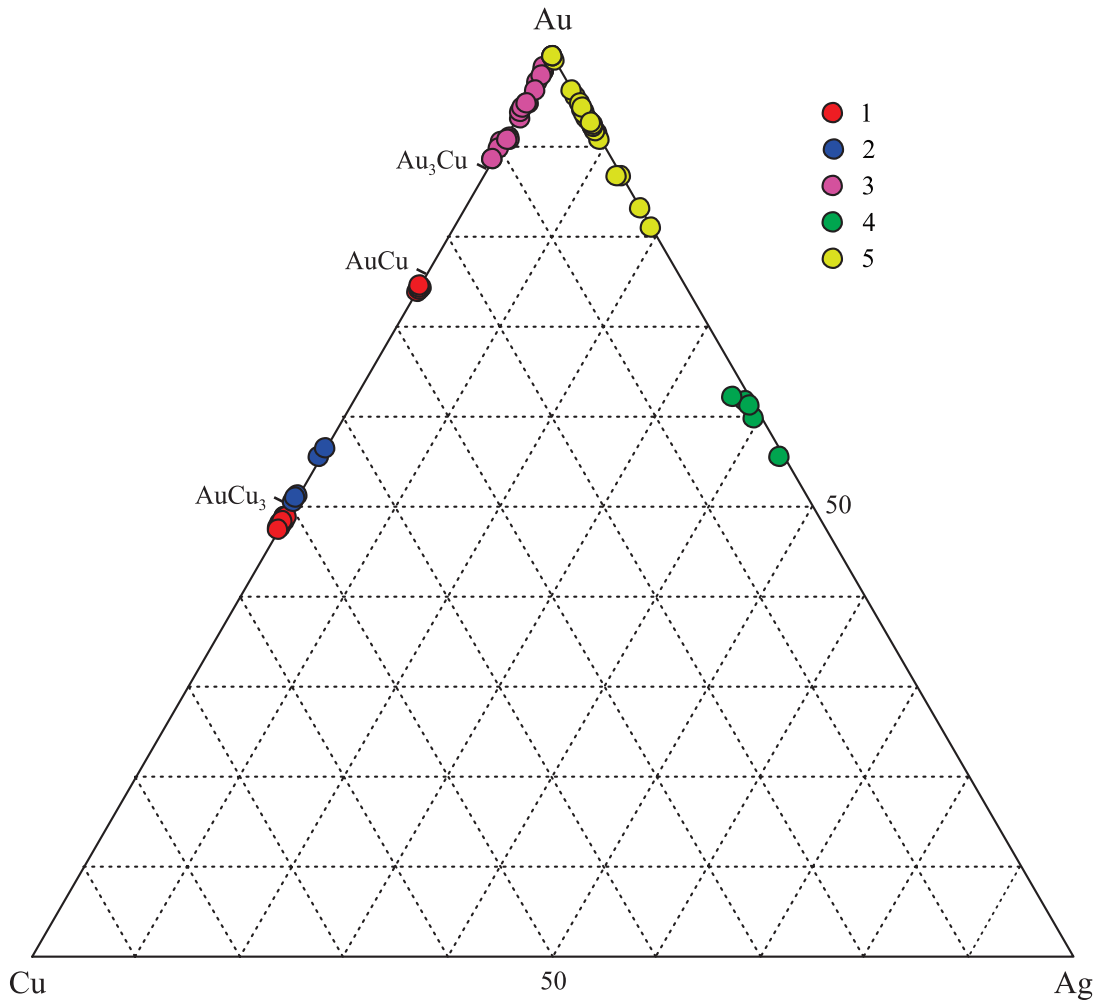


Рис. 3. Химический состав самородного золота Полдневского месторождения на диаграмме Au–Ag–Cu, мас. %.

1 – медистое золото (аурикуприд и тетрааурикуприд), 2 – аурикуприд оторочки включений нерудных минералов в зерне тетрааурикуприда, 3 – гипергенное золото, 4 – включения серебристого золота в тетрааурикуприде, 5 – серебристое золото жильной массы с демантоидом.

Fig. 3. Chemical composition of native gold of Poldnevskoye deposit on the Au–Ag–Cu diagram, wt %.

1 – copper gold (auricupride and tetraauricupride), 2 – auricupride rim of inclusions of non-metallic minerals in tetraauricupride grain, 3 – hypogene gold, 4 – silver gold inclusions in tetraauricupride, 5 – silver gold of vein mass with demantoid.

ватом монолитном типе гипергенного золота (см. табл. 1, ан. 19–24) содержание остаточной примеси меди (3.4–10.6 мас. %) выше, а дефицит суммы компонентов ниже, чем в колломорфном и пористом типах.

Химический состав аурикуприда AuCu_3 и тетрааурикуприда AuCu основной массы их зерен близок к стехиометрическому с небольшим избытком меди – до 0.1 ф.е. (см. табл. 1, ан. 1–6 и рис. 3). Кроме того, в зерне тетрааурикуприда встречен аурикуприд в виде оторочки мощностью 20–50 мкм вокруг включений, сложенных тонкой смесью оксидов железа, серпентина и, по-видимому, органического вещества (рис. 5а). Аурикуприд оторочки обеднен медью относи-

тельно стехиометрического состава – до 0.15 ф.е. (см. табл. 1, ан. 7–9 и рис. 3).

Помимо включений, сложенных тонкой смесью оксидов железа, серпентина, в тетрааурикуприде присутствуют включения электрума (пробность 555–617%, см. табл. 1, ан. 10–12), а в аурикуприде – сульфидов меди и никеля. Угловатые включения электрума локализуются как в краевой (рис. 5б), так и центральной частях крупного зерна тетрааурикуприда. Включения сульфидов в аурикуприде представлены срастаниями дигенита ($\text{Cu/S} = 1.88$) с пентландитом (рис. 5в), а также дигенита с пламенивидными вростками фазы, отвечающей по составу борнит-дигенитовому твердому раствору (рис. 5г) (табл. 2).

Таблица 1. Типовой химический состав зерен самородного золота Полдневского месторождения демантоида, мас. %

Table 1. Typical chemical composition of native gold grains of Poldnevskoye demantoid deposit, wt %

№ ан.	№ зерна	Au	Ag	Cu	Fe	Сумма	Пробность, ‰	Кристаллохимическая формула
Обохренные серпентиниты								
1	1-15	73.78	0.44	25.54	<i>0.01</i>	99.77	740	$Au_{0.96}Ag_{0.01}Cu_{1.03}$
2	2-20	48.72	<i>0.06</i>	51.35	<i>0</i>	100.13	787	$Au_{0.94}Cu_{3.06}$
3	3-43	48.02	<i>0.12</i>	51.3	<i>0.01</i>	99.45	483	$Au_{0.93}Cu_{3.07}$
4	4-50	47.50	<i>0</i>	52.33	<i>0.01</i>	99.84	476	$Au_{0.91}Cu_{3.09}$
5	5-55	48.56	<i>0.07</i>	50.69	<i>0.01</i>	99.33	489	$Au_{0.95}Cu_{3.05}$
6	6-58	47.15	<i>0.08</i>	52.28	<i>0.03</i>	99.54	474	$Au_{0.90}Cu_{3.10}$
7	1-3	50.37	<i>0</i>	49.52	<i>0.05</i>	99.94	504	$Au_{0.99}Cu_{3.01}$
8	1-7	54.78	<i>0</i>	43.96	0.15	98.89	554	$Au_{1.15}Cu_{2.85}$
9	1-10	50.76	<i>0.04</i>	48.24	0.58	99.62	510	$Au_{1.01}Cu_{2.99}$
10	1-35	55.36	44.1	0.28	<i>0</i>	99.74	555	$Au_{0.40}Ag_{0.59}Cu_{0.01}$
11	1-36	61.03	37.36	0.55	<i>0.02</i>	98.96	617	$Au_{0.46}Ag_{0.53}Cu_{0.01}$
12	1-37	61.59	38.62	0.32	<i>0</i>	100.53	613	$Au_{0.46}Ag_{0.53}Cu_{0.01}$
13	1-2	97.59	<i>0.17</i>	1.66	<i>0.04</i>	99.46	981	$Au_{0.95}Ag_{0.00}Cu_{0.05}$
14	1-19	91.60	0.22	1.55	1.15	94.52	969	$Au_{0.91}Ag_{0.00}Cu_{0.05}Fe_{0.04}$
15	2-29	90.66	<i>0.06</i>	1.38	0.11	92.21	983	$Au_{0.95}Cu_{0.05}$
16	3-39	77.93	<i>0.11</i>	1.75	<i>0.04</i>	79.83	976	$Au_{0.93}Cu_{0.07}$
17	5-57	82.25	<i>0.03</i>	2.39	<i>0.02</i>	84.69	971	$Au_{0.92}Cu_{0.08}$
18	5-58	71.37	<i>0</i>	1.01	<i>0.04</i>	72.42	986	$Au_{0.96}Cu_{0.04}$
19	2-26	91.7	<i>0.17</i>	5.94	0.14	97.95	936	$Au_{0.83}Cu_{0.17}$
20	4-44	82.41	<i>0.04</i>	10.61	<i>0</i>	93.06	886	$Au_{0.71}Cu_{0.29}$
21	6-60	94.67	0.36	3.44	<i>0.02</i>	98.49	961	$Au_{0.89}Cu_{0.10}Ag_{0.01}$
22	6-59	90.41	<i>0.16</i>	5.33	<i>0.02</i>	95.92	943	$Au_{0.89}Cu_{0.15}$
23	2-30	87.65	0.44	8.26	0.37	96.72	906	$Au_{0.76}Ag_{0.01}Cu_{0.22}Fe_{0.01}$
24	6-61	90.56	<i>0.18</i>	4.89	<i>0.04</i>	95.67	947	$Au_{0.86}Cu_{0.14}$
Жильная масса с демантоидом								
25	2-4	94.64	6.04	<i>0</i>	<i>0</i>	100.69	940	$Au_{0.90}Ag_{0.10}$
26	2-5	96.30	4.68	<i>0</i>	<i>0</i>	100.98	954	$Au_{0.92}Ag_{0.08}$
27	3-1	91.16	8.72	<i>0</i>	<i>0</i>	99.88	913	$Au_{0.85}Ag_{0.15}$
28	3-2	90.83	7.85	<i>0</i>	<i>0</i>	98.68	920	$Au_{0.86}Ag_{0.14}$
29	4-3	90.12	9.23	<i>0</i>	<i>0</i>	99.35	907	$Au_{0.84}Ag_{0.16}$
30	4-4	86.69	13.46	<i>0</i>	<i>0</i>	100.15	866	$Au_{0.78}Ag_{0.22}$
31	5-1	92.88	7.22	<i>0</i>	<i>0</i>	100.10	927	$Au_{0.88}Ag_{0.12}$
32	5-3	97.02	3.97	<i>0</i>	<i>0</i>	100.99	961	$Au_{0.93}Ag_{0.07}$
33	5-4	94.32	5.35	<i>0</i>	<i>0</i>	99.92	944	$Au_{0.91}Ag_{0.09}$
34	6-1	83.87	17.08	<i>0</i>	<i>0</i>	100.95	831	$Au_{0.73}Ag_{0.27}$
35	6-2	85.93	12.92	0.35	0.35	99.19	866	$Au_{0.77}Ag_{0.21}Cu_{0.01}Fe_{0.01}$
36	6-3	81.68	19.39	<i>0</i>	<i>0</i>	101.07	808	$Au_{0.70}Ag_{0.30}$

Примечание. Анализы: 1–6 – тетрааурикуприд $AuCu$ (1) и аурикуприд $AuCu_3$ (2–6) основной массы зерен; ан. 7–9 – аурикуприд оторочки включений оксида железа и серпентина в тетрааурикуприде; ан. 10–12 – включения серебристого золота в тетрааурикуприде; ан. 13–24 – гипергенное золото пористое (14–16), колломорфное (17, 18) и монокристаллическое трещиноватое (19–24); ан. 25–36 – серебристое золото из жильной массы. Здесь и в табл. 2 курсивом выделены содержания элементов ниже стандартного отклонения при измерении. Расчет кристаллохимических формул для анализов с дефицитной суммой компонентов приведен из предположения, что дефицит суммы обусловлен полыми порами.

Note. Analyses: 1–6 – $AuCu$ tetraauricupride (1) and $AuCu_3$ auricupride (2–6) of the main mass of grains; an. 7–9 – auricupride rim of iron oxide and serpentine inclusions in tetraauricupride; an. 10–12 – silver gold inclusions in tetraauricupride; an. 13–24 – hypogene gold porous (14–16), collomorphic (17, 18) and monolithic fractured (19–24); an. 25–36 – silver gold from vein mass. Here and in the Table 2 the content of elements below the standard deviation of the measurement is marked in italics. Calculation of crystallochemical formulae for analyses with a deficient sum of components is given on the assumption that the deficiency of the sum is due to hollow pores.

Зерна золота из жильной карбонат-серпентиновой массы, несущей демантоид, представлены частицами золотосеребряных твердых растворов размером 0.2 мм и менее. Серебристому золо-

ту присущи интерстициальные угловатые формы с отпечатками зерен жильной массы (см. рис.2в), редко это изометричные кристаллы (см. рис. 2г). Минеральные включения в нем не зафиксирована-

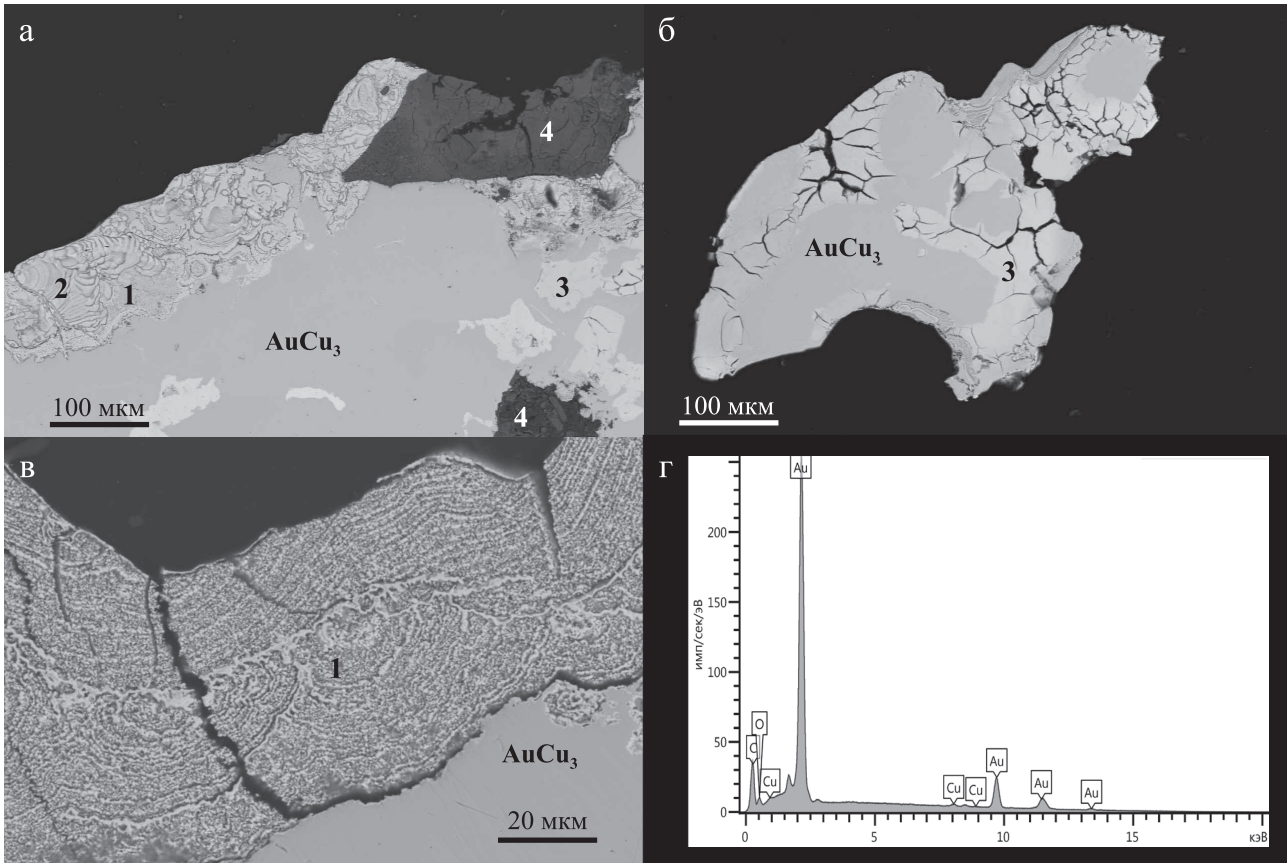


Рис. 4. Структура каймы гипергенного золота на аурикуприде (AuCu_3).

а – сопряженные участки золота пористого (1), колломорфного (2) и монокристаллического (3) строения; на поверхности зерна аурикуприда присутствуют также выделения, сложенные серпентином, силикатами никеля и оксидами железа (4); б – каймы трещиноватого монокристаллического строения; в – слоистое концентрически-зональное строение пористого золота; г – EDX-спектр участка монокристаллического строения. Снимки в режиме обратнорассеянных электронов (BSE).

Fig. 4. Structure of hypergene gold rims on auricupride (AuCu_3).

а – conjugated areas of porous (1), collomorphic (2) and monolithic (3) gold; on the surface of auricupride grain there are also separations composed of serpentine, nickel silicates and iron oxides (4); б – rims of fractured monolithic structure; в – layered concentric-zonal structure of porous gold; г – EDX-spectrum of the area of monolithic structure. Images in the back-scattered electron (BSE) mode.

ны. Преобладающая часть золотин из жильного материала и вскрытого траншеей аллювия (россыпь р. Бобровка) относится к высокопробному золоту (913–961‰, 4–10 мас. % Ag). Отдельные золотины из аллювия имеют более низкую пробу (808–866‰, 13–19.4 мас. % Ag) (см. табл. 1, ан. 25–36).

Обсуждение результатов

Самородное золото в месторождениях демантоида ранее не описывалось. Обнаруженные нами зерна самородного золота на Полдневском месторождении принадлежат к двум химическим разновидностям самородного золота (Au-Cu и Au-Ag), приуроченным к субмеридиональным линейным зонам повышенной трещиноватости в массиве ги-

пербазитов. Контрастные различия химического состава этих разновидностей золота коррелируют с их минеральным окружением: медистого золота – с антигоритовым серпентинитом, содержащим также рассеянную вкрапленность самородной меди, а серебристого золота – с клинохризотил-кальцитовой массой, несущей демантоид.

Среди метасоматических золотоносных пород в гипербазитах Урала медистое золото известно в родингитах Карабашского массива, в разломных антигоритовых серпентинитах Верх-Нейвинского массива (Павловское проявление) и золотосульфидно-магнетитовых рудах в антигоритовых серпентинитах Каганского массива (Мурзин и др., 2007; Murzin et al., 2019). Серебристое золото, представленное Au-Ag твердыми растворами, иногда с повышенным содержанием меди, рас-

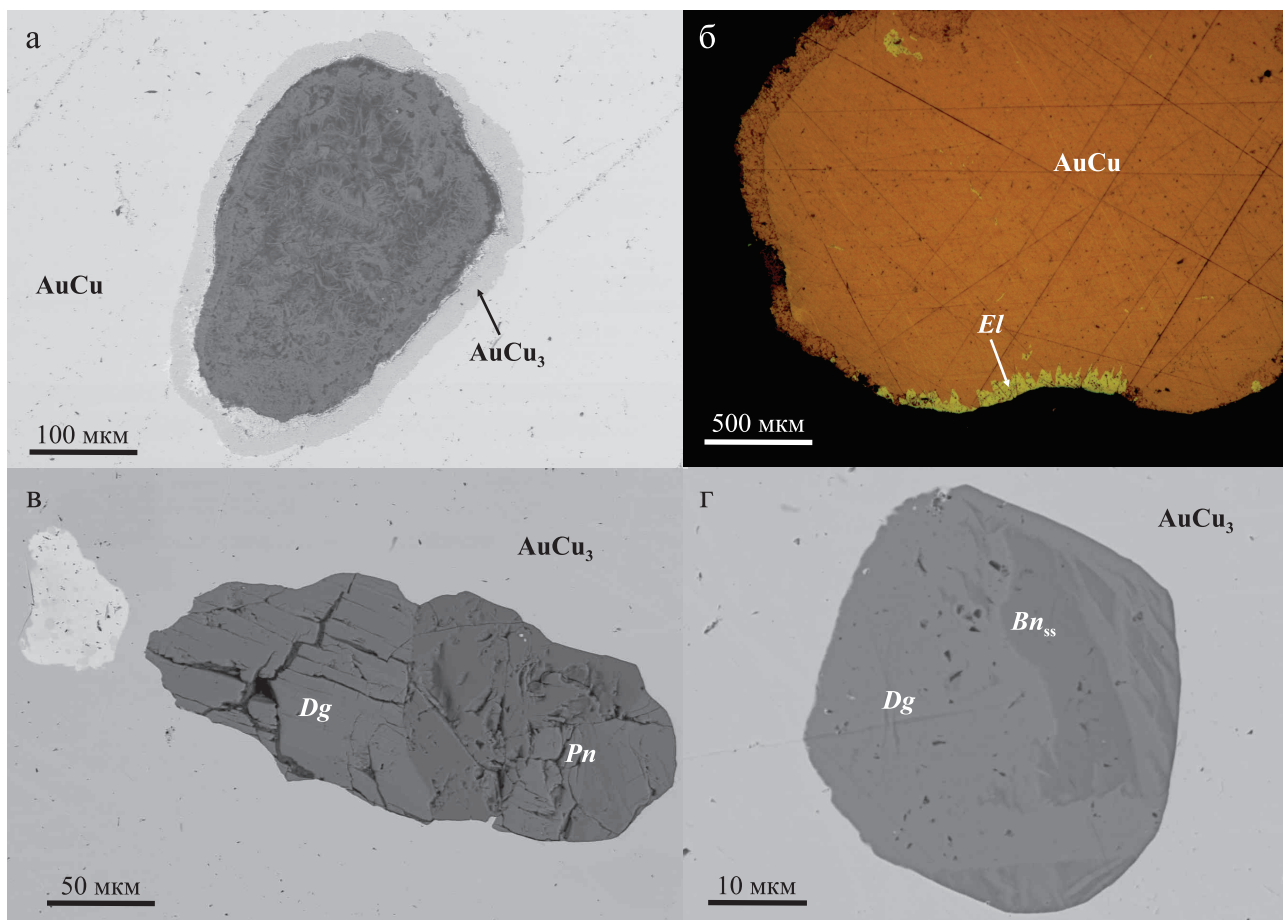


Рис. 5. Минеральные включения в медистом золоте.

а – включение оксидов железа и серпентина (черное), отороченное аурикупридом ($AuCu_3$) в зерне тетрааурикуприда ($AuCu$); б – включения электрума (El) в краевой части зерна аурикуприда ($AuCu_3$), окаймленного гипергенным пористым золотом; в – включение – сросток дигенита (Dg) и пентландита (Pn) в аурикуприде; г – кристалл дигенита (Dg) с вростками борнит-дигенитового твердого раствора (Bn_{ss}). а, в, г – снимки в режиме обратнорассеянных электронов (BSE), б – оптическое фото.

Fig. 5. Mineral inclusions in cuprous gold.

а – inclusion of iron and serpentine oxides (black) rimmed by auricupride ($AuCu_3$) in tetraauricupride ($AuCu$) grain; б – inclusions of electrum (El) in the peripheral part of auricupride ($AuCu_3$) grain rimmed by hypergene porous gold; в – inclusion – cross-link of digenite (Dg) and pentlandite (Pn) in auricupride; г – crystal of digenite (Dg) with boronite-digenite solid solution (Bn_{ss}) outgrowths. а, в, г – images in the back-scattered electron (BSE) mode, б – optical photo.

пространено в углекислотных метасоматитах Южного Урала – листовниках (Знаменский, Знаменская, 2022; Рахимов и др., 2022; Знаменский, 2023), в породах талькового и тальк-карбонатного состава (Мурзин, Варламов, 2015), а также в магнетит-хлорит-карбонатных (Мурзин и др., 2017).

Резкие различия в составе самородного золота на Полдневском месторождении из жильной массы, с одной стороны, и из вмещающего серпентинита, с другой, свидетельствуют о существенно различных физико-химических условиях его отложения. Восстановительные условия, наряду с низкой фугитивностью серы, создающиеся при гидратации (серпентинизации) оливина и клинопироксе-

на, способствуют образованию самородных форм меди, в том числе о его соединений с золотом. Серебро, присутствующее во флюиде в небольшом количестве, отложилось в виде включений электрума в Au-Cu интерметаллидах.

Термодинамическое моделирование условий образования медистого золота в родингитах показало, что отложение Au-Cu интерметаллидов происходит из флюидов с низкой фугитивностью кислорода и серы: $\log fS_2 = -8...-20$, $\log fO_2 = -26...-39$ (Murzin et al., 2018). При этом фугитивность серы при отложении Au-Cu интерметаллидов существенно ниже, чем при образовании Au-Ag сплавов в листовниках (рис. 6).

Таблица 2. Химический состав включений сульфидов и расчет их кристаллохимических формул в зерне медистого золота**Table 2.** Chemical composition of sulphide inclusions and calculation of their crystallochemical formulae in copper gold grains

№ ан.	Cu	Fe	Ni	S	Total	Cu	Fe	Ni	S	Me/S	Кристаллохимическая формула
	мас. %					ат. %					
23	77.96	0.00	0.00	21.4	99.36	64.77	0	0	35.23	1.84	$\text{Cu}_{1.94}\text{S}_{1.06}$
22	66.99	7.42	0.01	24.78	99.20	53.79	6.77	0.01	39.43	1.54	$\text{Cu}_{5.38}\text{Fe}_{0.68}\text{S}_{3.94}$
25	66.19	7.95	0.00	24.53	98.67	53.44	7.31	0	39.25	1.55	$\text{Cu}_{5.35}\text{Fe}_{0.73}\text{S}_{3.92}$
24	0.52	30.23	34.8	33.15	98.70	0.37	24.88	27.23	47.52	1.10	$(\text{Fe}_{4.23}\text{Ni}_{4.63}\text{Cu}_{0.06})_{8.92}\text{S}_{8.08}$
31	0.38	34.93	29.97	32.92	98.20	0.27	28.84	23.54	47.35	1.11	$(\text{Fe}_{4.90}\text{Ni}_{4.00}\text{Cu}_{0.05})_{8.95}\text{S}_{8.05}$

Примечание. Ан. 23 – дигенит (расчет на 3 ат.), ан. 22,25 – борнит-дигенитовый твердый раствор (расчет на 10 ат.), ан. 24, 31 – пентландит (расчет на 17 ат.).

Note. An. 23 – digenite (calculated at 3 at.), an. 22, 25 – bornite-digenite solid solution (calculated at 10 at.), an. 24, 31 – pentlandite (calculated at 17 at.).

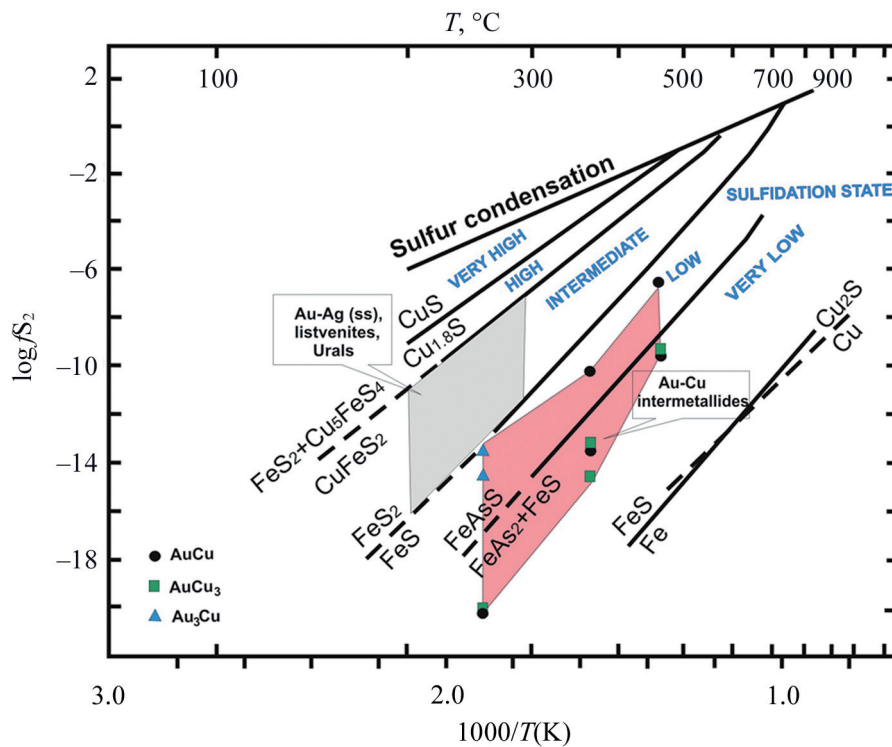


Рис. 6. Условия образования интерметаллидов Au-Cu в родингитах Карабашского массива (розовое поле) и твердых растворов Au-Ag в лиственитах Южного Урала (серое поле) на диаграмме температура–фугитивность серы, по (Einaudi et al., 2003) с изменениями.

Fig. 6. Conditions of formation of Au-Cu intermetallides in roddingites of the Karabash massif (pink field) and Au-Ag solid solutions in lystvenites of the Southern Urals (grey field) on the temperature-sulfur fugacity diagram, from (Einaudi et al., 2003) with modifications.

Изменчивость окислительно-восстановительного режима минералообразования проявлена в минеральном составе весьма специфических самородно-сульфидно-оксидных агрегатов, имеющих форму желваков из жильной массы (Мурзин и др., 2023). В серии изученных нами желваков само-

родная форма меди (самородная медь, медистый аваруйт, никелистая медь) сменяется сульфидной (халькозин, медистый хизлевудит) и оксидными (куприт, тенорит).

Заключительная история “жизни” как медистого, так и серебристого самородного золота связа-

на с его нахождением в зоне гипергенеза. Развитие продуктов гипергенного замещения аурикуприда колломорфного, пористого и трещиноватого строения, а также присутствие в EDX-спектрах линии кислорода свидетельствуют как о процессах перераспределения микропор, образовавшихся при выносе значительного количества меди, так и возможном образовании оксидных или гидроксидных форм золота и меди. Близкие по оптическим свойствам и составу каймы гидроксидов золота $[AuO \cdot Au(OH)_2]$ и $(Au, Ag, Cu)(OH)_2$ на частицах самородного золота описаны на Агинском месторождении на Камчатке (Некрасов, 1991). Пленочные формы оксида золота Au_2O_3 или гидроксида золота $AuO(OH)$ на поверхности россыпного и гипогенного золота на месторождении Новогоднее-Монто (Полярный Урал) зафиксированы и подтверждены методами Оже-спектроскопии в (Щегольков, Амосов, 2000; Щегольков, 2013).

Процессы укрупнения и перераспределение микропор со сбросом их на границы зерен, слагающих аурикуприд, описывались ранее в медистом золоте месторождения Золотая Гора на Южном Урале (Покровский и др., 1979; Мурзин, Малюгин, 1987). Мы полагаем, что участки трещиноватого монолитного медистого золота в изученном месторождении, для которых характерен неполный вынос меди и относительно небольшой дефицит суммарного содержания металлов, претерпели перекристаллизацию с образованием сети микротрещин. В участках колломорфного и пористого строения, в которых медь практически полностью вынесена из аурикуприда, перекристаллизация была слабой, образовались концентрические микротрещины, сопровождаясь также отложением в них оксидов и гидроксидов железа. Гипергенные преобразования серебристого золота из жильной карбонат-серпентиновой массы, несущей демантоид, проявлены слабо. Они выражены в образовании локальных высокопробных каемок (980 и более) малой мощности (редко более 5 мкм).

Согласно имеющимся модельным представлениям, серпентин-карбонатная жильная масса с гнездами демантоида образуется при выполнении трещинного пространства в специфических условиях, создающихся при декомпрессии выжимающегося к поверхности гипербазитового массива (Кисин и др., 2020; Карасева и др., 2021). Источником металлов был глубинный восстановленный флюид, взаимодействующий с основными и ультраосновными породами. Этот флюид мог участвовать в процессе антигоритовой серпентинизации и сопряженной с ней самородной медью и медистым золотом, когда гипербазиты находились на большой глубине. По мере подъема тела серпентинизированных пород к поверхности глубинный флюид смешивался с метеорными водами, восстановительные условия сменялись окислительными, а сам флюид ста-

новился углекислотным. В этих условиях образуются демантоид и серебристое самородное золото.

ВЫВОДЫ

1. Выявлены контрастные различия состава самородного золота на Полдневском месторождении демантоида, которые коррелируют с их минеральным окружением: медистого золота (аурикуприд $AuCu_3$ и тетрааурикуприд $AuCu$) – с антигоритовым серпентинитом, а серебристого золота ($Au-Ag$ твердые растворы) – с кальцит-клинохризотиловой массой, несущей демантоид.

2. Различия в составе самородного золота из жильной массы и серпентинита отражают изменчивость физико-химических условий его отложения. Отложение $Au-Cu$ интерметаллидов происходит из флюидов с низкой фугитивностью кислорода и серы: $\log fS_2 = -8 \dots -20$, $\log fO_2 = -26 \dots -39$, а $Au-Ag$ твердых растворов – при более высоких значениях фугитивности серы и более окисленных условиях, характерных для золотого оруденения, сопровождающегося лиственитами и тальково-карбонатными породами.

3. Развитие продуктов гипергенного замещения аурикуприда колломорфного, пористого и трещиноватого строения, а также присутствие в EDX-спектрах линии кислорода свидетельствуют как о процессах перераспределения микропор, образовавшихся при выносе значительного количества меди, так и возможном образовании оксидных или гидроксидных форм золота и меди.

4. Самородное золото медистого и серебристого состава образуется на различных гипсометрических уровнях при подъеме тела гипербазитов к поверхности и его декомпрессии. Медистое золото сопряжено с антигоритовой серпентинизацией, когда тело гипербазитов находилось на глубине. При его подъеме к поверхности и декомпрессии восстановительные условия сменяются окислительными, а флюид становится углекислотным. В этих условиях образуются демантоид и серебристое самородное золото.

Благодарности

Авторы благодарны С.Г. Селезневу и другим геологам ООО “Корпорация Маяк” за содействие в получении образцов для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Знаменский С.Е. (2023) Минералогия и $P-T$ условия образования метасоматических пород Вознесенского месторождения золота (Южный Урал). *Литосфера*, **23**(3), 430-446. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-430-446>
- Знаменский С.Е., Знаменская Н.М. (2022) Вознесенское золоторудное месторождение (Южный Урал): геологическое строение, геохимия рудовмещающих по-

- род, геодинамические условия образования. *Литосфера*, **22**(3), 391-403. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-391-403>
- Карасева Е.С., Кисин А.Ю., Мурзин В.В. (2021) Полдневское месторождение демантоида (Средний Урал): Геология и минералогия. *Литосфера*, **21**(5), 681-696. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-683-698>
- Карасева Е.С., Кисин А.Ю., Мурзин В.В., Озорнин Д.А., Селезнев С.Г. (2019) Первая находка самородного золота на Полдневском месторождении демантоида. *Уральская минералогическая школа – 2019. XXV Всерос. науч. конф. Екатеринбург: Универсальная типография “Альфа Принт”*, 67-69.
- Кисин А.Ю., Мурзин В.В., Карасева Е.С., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Селезнев С.Г., Озорнин Д.А. (2020) Проблемы структурного контроля демантоидной минерализации на Полдневском месторождении. *Изв. УГГУ*, **2**(58), 64-73. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-64-73>
- Мурзин В.В. (2009) Золотое оруденение в ультрамафитах Урала. *Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. III Междунар. конф. Т. 2. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН*, 61-64.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А. (2015) Минералогия золотоносных тальк-карбонатных пород Кировского месторождения на Южном Урале. *Вестн. Уральского отделения Рос. минералог. общ-ва. Вып. 12. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН*, 84-95.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А., Карасева Е.С., Кисин А.Ю. (2023) Минералогия, условия образования и генезис агрегатов самородных и сульфидных минералов Полдневского месторождения демантоида (Средний Урал). *Геология руд. месторождений*, (6), 528-550. <https://doi.org/10.31857/S0016777023060060>
- Мурзин В.В., Варламов Д.А., Пальянова Г.А. (2017) Условия образования золотоносных магнетит-хлорит-карбонатных пород Карабашского массива гипербазитов (Южный Урал). *Геология и геофизика*, **58**(7), 1006-1020.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А., Шанина С.Н. (2007) Новые данные о золото-антгоритовой формации Урала. *Докл. АН*, **417**(6), 810-813.
- Мурзин В.В., Малюгин А.А. (1987) Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск: УНЦ АН СССР, 96 с.
- Некрасов И.Я. (1991) Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 304 с.
- Покровский П.В., Мурзин В.В., Берзон Р.О., Юников Б.А. (1979) К минералогии самородного золота месторождения Золотая Гора. *Зап. Всесоюз. минералог. об-ва*, **108**(3), 317-326.
- Рахимов И.Р., Савельев Д.Е., Шагалов Е.С., Анкушева Н.Н., Панкрушина Е.А. (2022) Геология, минералогия, геохимия и условия формирования золото-кварцевого месторождения Тузан (Худолазовская мульда, Южный Урал). *Литосфера*, **22**(2), 200-218. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-2-200-218>
- Щегольков Ю.В. (2013) Образование тонких пленок оксидов золота на самородном золоте в природных условиях. *Зап. РМО*, (1), 126-132.
- Щегольков Ю.В., Амосов Р.А. (2000) Окисление самородного золота в россыпях. *Докл. АН*, **370**(4), 520-523.
- Einaudi M.T., Hedenquist J.W., Inan E.E. (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. *Volcanic, geothermal and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth*. (Soc. Econ. Geol. Spec. Publ., **10**, 285-314).
- Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Varlamov D. (2019) Formation of Au-bearing antigorite serpentinites and magnetite ores at the massif of ophiolite ultramafic rocks: Thermodynamic modeling. *Minerals*, **9**, 758. <https://doi.org/10.3390/min9120758>
- Murzin V.V., Chudnenko K.V., Palyanova G.A., Varlamov D.A., Naumov E.A., Pirajno F. (2018) Physicochemical model of formation of Cu-Ag-Au-Hg solid solutions and intermetallic alloys in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia). *Ore Geol. Rev.*, **93**, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.018>

REFERENCES

- Einaudi M.T., Hedenquist J.W., Inan E.E. (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. *Volcanic, geothermal and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth*. (Soc. Econ. Geol. Spec. Publ., **10**, 285-314).
- Karaseva E.S., Kisin A.Yu., Murzin V.V. (2021) The Poldnevskoye deposit of demantoid (Middle Urals): Geology and mineralogy. *Lithosphere (Russia)*, **21**(5), 683-698. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-683-698>
- Karaseva E.S., Kisin A.Yu., Murzin V.V., Ozornin D.A., Seleznev S.G. (2019) The first discovery of native gold at Poldnevskoye demantoid deposit. *Ural Mineralogical School – 2019. XXV All-Russian Scientific Conference. Ekaterinburg, Universal'naya tipografiya “Al’fa Print”*, 67-69. (In Russ.)
- Kisin A.Yu., Murzin V.V., Karaseva E.S., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu. A., Seleznev S.G., Ozornin D.A. (2020) Problems of structural control of demantoid mineralisation at Poldnevskoye deposit. *Izvestiya UGGU*, **2**(58), 64-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-64-73>
- Murzin V.V. (2009) Gold mineralization in the ultramafites of the Urals *Mafic-ultramafic complexes of folded regions and related deposits*. The third international conference. T. 2. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 61-64. (In Russ.)
- Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Varlamov D. (2019) Formation of Au-bearing antigorite serpentinites and magnetite ores at the massif of ophiolite ultramafic rocks: Thermodynamic modeling. *Minerals*, **9**, 758. <https://doi.org/10.3390/min9120758>
- Murzin V.V., Chudnenko K.V., Palyanova G.A., Varlamov D.A., Naumov E.A., Pirajno F. (2018) Physicochemical model of formation of Cu-Ag-Au-Hg solid solutions and intermetallic alloys in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia). *Ore Geol. Rev.*, **93**, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.018>
- Murzin V.V., Malyugin A.A. (1987) Typomorphism of gold in the hypergenesis zone. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 96 с. (In Russ.)

- Murzin V.V., Varlamov D.A. (2015) Mineralogy of gold-bearing talc-carbonate rocks of the Kirovskoye deposit in the South Urals. *Vestn. Ural'skogo Otdeleniya Ros. Mineralog. Ob-va. Vyp. 12*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 84-95. (In Russ.)
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Karaseva E.S., Kissin A.Yu. (2023) Mineralogy, formation conditions and genesis of aggregates of native and sulphide the Poldnevskoye deposit of demantoid (Middle Urals). *Geol. Ore Dep.*, **65**(6), 544-566 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, (6), 528-550).
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Palyanova G.A. (2017) Conditions of formation of gold-bearing magnetite-chlorite-carbonate rocks of the Karabash ultrabasic massif (South Urals). *Russ. Geol. Geophys.*, **58**, 803-814. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.06.003>
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Palyanova G.A. (2017) Conditions of formation of gold-bearing magnetite-chlorite-carbonate rocks of the Karabash ultrabasic massif (South Urals). *Russ. Geol. Geophys.*, **58**, 803-814 (translated from *Geol. Geofiz.*, **58**(7), 1006-1020). <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.06.003>
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Shanina S.N. (2007) New Data on the Gold-Antigorite Association of the Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **417A**(9), 1436-1439 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **417**(6), 810-813). <https://doi.org/10.1134/S1028334X07090310>
- Nekrasov I.Ya. (1991) Geochemistry, mineralogy, and genesis of gold deposits. Moscow, Nauka Publ., 304 p. (In Russ.)
- Pokrovskii P.V., Murzin V.V., Berzon R.O., Yunikov B.A. (1979) Mineralogy of native gold at the Zolotaya Gora deposit. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, **108**(3), 317-326. (In Russ.)
- Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Shagalov E.S., Ankusheva N.N., Pankrushina E.A. (2022) Geology, mineralogy, geochemistry and conditions of forming the Tukan gold-quartz deposit (Khudolaz trough, South Urals). *Lithosphere (Russia)*, **22**(2), 200-218. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-2-200-218>
- Shegol'kov Yu.V. (2013) Formation of thin gold oxide films on the native gold in natural conditions. *Zapiski RMO*, (1), 126-132. (In Russ.)
- Shegol'kov Yu.V., Amosov R.A. (2000) Oxidation of native gold in placers. *Dokl. Earth Sci.*, **370**, 192-195 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **370**(4), 520-523).
- Znamenskii S.E. (2023) Mineralogy and *P-T* conditions for the formation of metasomatic rocks of the Voznesenskoye gold deposit (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, **23**(3), 430-446. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-430-446>
- Znamenskii S.E., Znamenskaya N.M. (2022) Voznesenskoe gold ore deposit (Southern Urals): Geological structure, ore-bearing rock geochemistry, geodynamic formation conditions. *Lithosphere (Russia)*, **22**(3), 391-403. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-391-403>