

УДК 553.411

САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО Au-Pd МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧУДНОЕ (Приполярный Урал, Россия)

С.А. Онищенко, С.К. Кузнецов

Институт геологии Коми НЦ УРО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, Россия

Золото-палладиевое месторождение Чудное, расположенное в пределах Центрально-Уральского поднятия, приурочено к осевой зоне антиклинальной структуры, осложненной разрывными нарушениями. Оруденение, относящееся к типу минерализованных прожилковых зон, локализовано в трещиноватых и брекчированных риолитах позднего рифея—венда. Самородное золото и минералы палладия сосредоточены в основном в прожилках Cr-содержащего мусковита (фуксита), реже в локальных участках метасоматического изменения риолитов при практически полном отсутствии сульфидов. На представительном материале изучены состав и строение самородного золота, прослежены закономерности их пространственного изменения. Самородное золото относится к системе Au—Ag—Cu, в качестве примеси присутствуют Pd и Hg. Соотношения между элементами значительно варьируют, содержание Au заключено в интервале от 65.8 до 92.7 мас. %, содержание Ag — от 0.4 до 33.8 мас. %, почти всегда присутствует Cu, содержание которого достигает 12.7 мас. % и Pd — до 2.9 мас. %. Золото формировалось в виде гомогенного Au-Ag-Cu твердого раствора при температуре выше 220 °C. Предполагается, что вхождение меди в самородное золото обусловлено отсутствием сульфид-иона в рудообразующем гидротермальном растворе. При понижении температуры Au-Ag-Cu твердый раствор, содержащий более 1.1—2.5 мас. % Cu, распадается на две или три фазы, образуя характерные пластинчато-решетчатые и таблитчатые структуры распада. Конечными фазами при двухфазном распаде являются Au_3Cu и Au-Ag твердый раствор или AuCu и Au-Ag твердый раствор, при распаде на три фазы — Au_3Cu , AuCu и Au-Ag твердый раствор. Процесс распада твердого раствора в некоторых случаях сопровождался перекристаллизацией золота с образованием зернистых сростаний. Состав самородного золота по месторождению изменяется в значительных пределах, проявляя при этом ярко выраженную дискретность в различных участках рудных зон, что согласуется с прожилковым характером развития рудной минерализации. На заключительных этапах минералообразования самородное золото частично замещалось вторичным высокопробным золотом.

Самородное золото, система Au—Ag—Cu, структуры распада твердых растворов, рудные зоны, риолиты

NATIVE GOLD OF THE CHUDNOE GOLD-PALLADIUM DEPOSIT (Subpolar Urals, Russia)

S.A. Onishchenko, S.K. Kuznetsov

The Chudnoe gold–palladium deposit, located within the Central Ural uplift, is confined to the axial zone of an anticlinal structure complicated by faults. Veinlet mineralization is localized in fractured and brecciated Late Riphean–Vendian rhyolites. Native gold and palladium minerals are concentrated mainly in veinlets of Cr-containing muscovite (fuchsite) and, more seldom, at local sites of rhyolite metasomatism, almost free of sulfides. Using a representative material, we studied the composition and structure of native gold and the regularities of their spatial variations. Native gold has composition Au–Ag–Cu and contains Pd and Hg impurities. The element proportion varies significantly: The content of Au ranges from 65.8 to 92.7 wt.%, the content of Ag varies from 0.4 to 33.8 wt.%, the content of Cu reaches 12.7 wt.%, and the content of Pd is up to 2.9 wt.%. Gold formed as a homogeneous Au–Ag–Cu solid solution at temperatures above 220 °C. The presence of copper in native gold is probably due to the absence of sulfide ion from the ore-forming hydrothermal solution. With decreasing temperature, Au–Ag–Cu solid solution containing more than 1.1–2.5 wt.% Cu disintegrates into two or three phases, forming characteristic plate–lattice and tabular exsolution structures. In the case of two-phase exsolution, the final phases are Au_3Cu and Au–Ag solid solution or AuCu and Au–Ag solid solution; and in the case of three-phase exsolution, these are Au_3Cu , AuCu, and Au–Ag solid solution. In some cases, the exsolution was accompanied by the recrystallization of gold with the formation of grain intergrowths. The composition of native gold in the deposit varies significantly, showing a discrete character at different sites of the ore zones, which is consistent with the veinlet ore mineralization. At the final stages of mineral formation, native gold was partly replaced by secondary high-fineness gold.

Native gold, Au–Ag–Cu system, exsolution textures, ore zones, rhyolites

ВВЕДЕНИЕ

Золото-палладиевое месторождение Чудное, находящееся на западном склоне Приполярного Урала, представляет большой интерес, обусловленный минералого-геохимическими особенностями руд, условиями их локализации и дискуссионностью многих генетических вопросов. Самородное золото с примесями меди и палладия в сростаниях с минералами палладия впервые было обнаружено в одной из россыпей [Малюгин и др., 1986], выше которой на склоне хр. Малдынырд в рыхлых отложениях выявлена геохимическая аномалия золота, а затем открыто месторождение Чудное.

Первые сведения о геологическом строении месторождения и минеральном составе руд изложены в работах В.С. Озерова [1996] и М.Б. Тарбаева с соавторами [1996]. Показано, что золото сосредоточено в фукситовых прожилках в риолитах, в ассоциации с ним находятся минералы палладия и алланит. В составе самородного золота установлены Ag, Cu, Pd и Hg, выявлены структуры распада твердого раствора. Обнаружено Pd-содержащее высокопробное золото, замещающее первичное золото, предположительно в поверхностных условиях. При дальнейших исследованиях получены дополнительные сведения о закономерностях развития золото-фукситовой минерализации, особенностях морфологии, состава и строения золота, характере сростаний золота с минералами палладия, жильными и породообразующими минералами, выявлены существенные различия в составе золота отдельных рудных зон [Кузнецов и др., 1999; Шумилов, Осташенко, 2000; Моралев и др., 2005a; Palyanova et al., 2021].

Месторождение Чудное заметно отличается от других золото-палладиевых или золоторудных месторождений. Специфические черты месторождения заключаются в необычной ассоциации Cu-Pd-содержащего золота и минералов палладия с Cr-содержащим мусковитом (фукситом) и редкоземельными минералами при практически полном отсутствии сульфидов. Вмещающими породами для фуксит-золото-палладиевой минерализации являются риолиты, что также необычно. Золоторудная и золото-палладиевая минерализация с самородным золотом, содержащим примеси Cu, Pd, иногда Pt, наиболее характерна для пород базит-гипербазитового состава и связанных с ними метасоматических образований [Спиридонов, Плетнев, 2002; Спиридонов и др., 2004; Nekrasov et al., 2005; Аникина, Алексеев, 2010; Рудашевский и др., 2014; Sluzhenikin, Mokhov, 2015; Пальянова и др., 2018], реже такого типа минерализация отмечается в других породах [Билибина и др., 1991; Mernagh et al., 1994; Olivo et al., 1995; Cabral et al., 2002; El Ghorfi et al., 2006; Menez, Botelho, 2017].

Проводившееся ранее изучение золота месторождения Чудное базировалось на относительно небольшом количестве проб и образцов, отобранных из отдельных поверхностных горных выработок, вследствие чего имеющиеся сведения остаются далеко не полными. При последующих геолого-разведочных работах, проведенных ЗАО «Голд Минералс» при участии авторов, существенно повысилась изученность месторождения, оконтурены с поверхности и прослежены на глубину три рудные зоны с промышленными содержаниями золота [Калустов, Ефанова, 2013; Онищенко и др., 2014].

Целью исследований является уточнение химического и фазового состава самородного золота на материале представительных проб, характеризующих все рудные зоны, выявление пространственной изменчивости золота в пределах месторождения, в том числе в вертикальном разрезе, что представляет большой интерес в связи с выяснением особенностей его формирования.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Чудное расположено на западном склоне Приполярного Урала в бассейне р. Кожим. В геологическом отношении этот район относится к Центрально-Уральскому поднятию и северной части выделяющейся здесь крупной геологической структуры — Ляпинскому антиклинорию (рис. 1). Наиболее древние отложения относятся к среднему и позднему рифею и представлены пуйвинской, хобейнской и мороинской свитами, в состав которых входят в основном слюдисто-кварцевые сланцы с линзами мраморов и кварцитов, хлорит-серицит-альбит-кварцевые сланцы, алевросланцы, метаалевролиты. Локально развиты эффузивные породы кислого и основного составов, относящиеся к саблегорской свите позднего рифея—раннего венда. В северо-восточной части района на докембрийских образованиях с угловым и стратиграфическим несогласием залегают более молодые отложения. В виде узкой полосы и отдельных выходов прослеживаются кварцевые гравелиты и песчаники алькесвожской свиты позднего кембрия—раннего ордовика. Они сменяются ордовикскими отложениями: кварцитопесчаниками, конгломератами и гравелитами обеизской, хлорит-серицит-кварцевыми сланцами и песчаниками салецкой свиты, известняками и известковистыми сланцами кожимской свиты. Интрузивные образования представлены в основном гранитами позднерифейско-вендского сальнеро-маньхамбовского комплекса, габбро, габбро-долеритами и диоритами парнукского комплекса вендского возраста.

Выделяются складчатые и разрывные нарушения разных порядков, ориентированные преимущественно в северо-восточном направлении. Все породы претерпели метаморфизм зеленосланцевой фа-

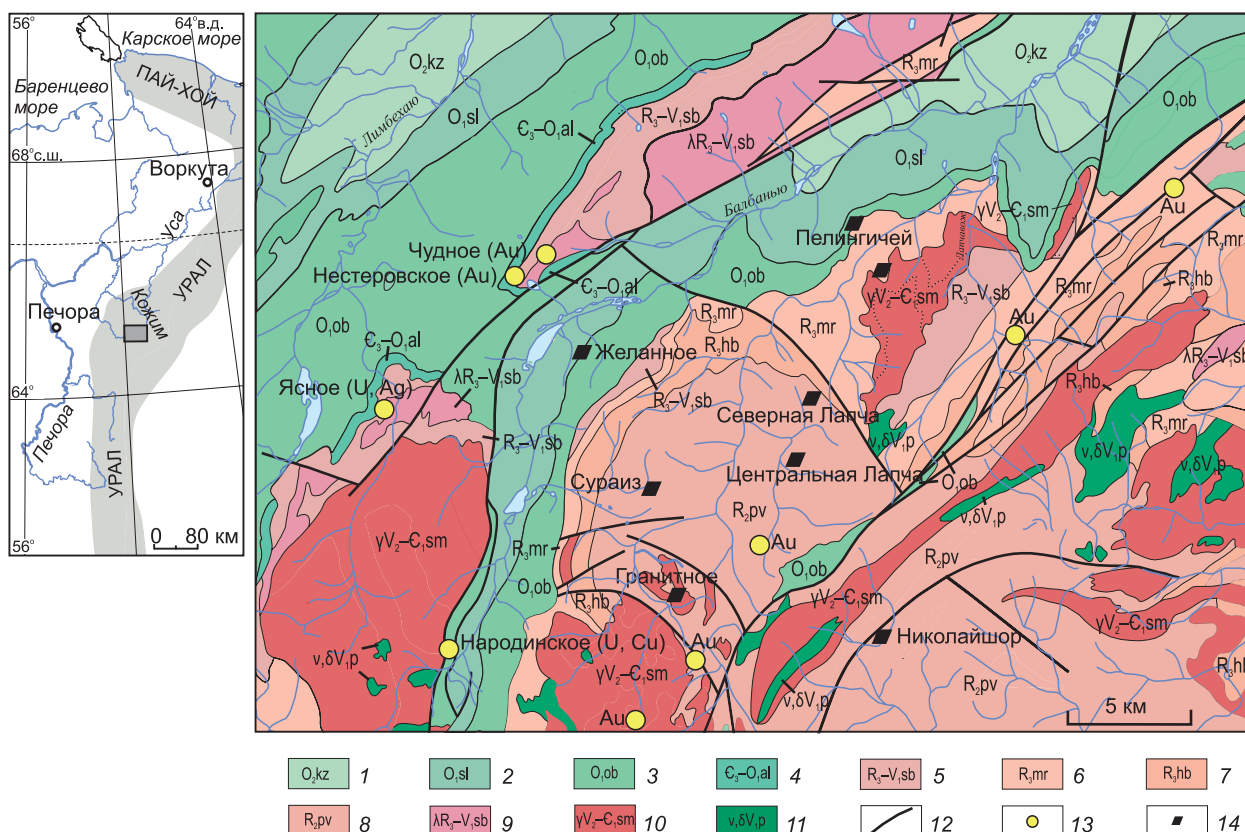


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Приполярного Урала (по [Государственная..., 2013] с изменениями).

1 — кожимская свита: известняки, известковые сланцы и песчаники; 2 — салецкая свита: хлорит-серицит-кварцевые сланцы, песчаники; 3 — обеизская свита: кварцито-песчаники, конгломераты, гравелиты; 4 — алькесвожская свита: гравелиты, песчаники с прослоями сланцев; 5 — саблегорская свита: эффузивы кислого и основного составов; 6 — мороинская свита: сланцы хлорит-серицит-альбит-кварцевые, алевросланцы, метаалевролиты; 7 — хобеинская свита: кварциты, конгломераты, сланцы хлорит-серицит-альбит-кварцевые; 8 — пуйвинская свита: слюдисто-кварцевые сланцы с линзами мраморов и прослоями кварцитов; 9 — саблегорские субвулканические риолиты; 10 — граниты сальнеро-маньхамбовского комплекса; 11 — габбро, габбро-долериты, диориты парнукского комплекса; 12 — главные разломы; 13 — рудные месторождения и проявления; 14 — хрусталеносные месторождения.

ции, проявившийся в послеордовикское время. При этом породы среднего рифея в южной и юго-восточной частях района ранее были метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Широко развиты гидротермальные образования, в частности, кварцево-жильно-хрусталеносные месторождения, а также золото-сульфидные, золото-сульфидно-кварцевые, свинцово-цинковые, уран-серебряные, уран-медные, молибденовые и редкоземельные проявления.

Золото-палладиевое месторождение Чудное приурочено к осевой зоне Малдинской антиклинали, находящейся в северо-западной части района. Ядро антиклинали сложено рифей-вендскими вулканогенными породами эффузивной и субвулканической фаций кислого и основного составов, а крылья — нижнепалеозойскими терригенными и осадочными отложениями алькесвожской, обеизской и салецкой свит. В зоне контакта докембрийских и ордовикских пород отмечаются линзы хлоритоид-пироксилитовых сланцев, рассматривающихся рядом геологов как реликты метаморфизованных кор выветривания кембрийского возраста [Озеров, 1996; и др.]. В вышележащих отложениях алькесвожской свиты на рудопроявлении Нестеровское присутствует золото-палладиевая минерализация, имеющая сходство с оруденением на месторождении Чудное.

Площадь месторождения Чудное сложена риолитами и породами основного состава, среди которых преобладают базальты, реже долериты. В виде самостоятельных тел отмечены андезиты, присутствующие как в базитах, так и риолитах (рис. 2). Разрывные нарушения имеют преобладающее северо-восточное простирание и крутое северо-западное падение, совпадающие со сланцеватостью пород. Вдоль разрывных нарушений риолиты преобразованы в кварц-серицитовые и серицитовые метасомати-

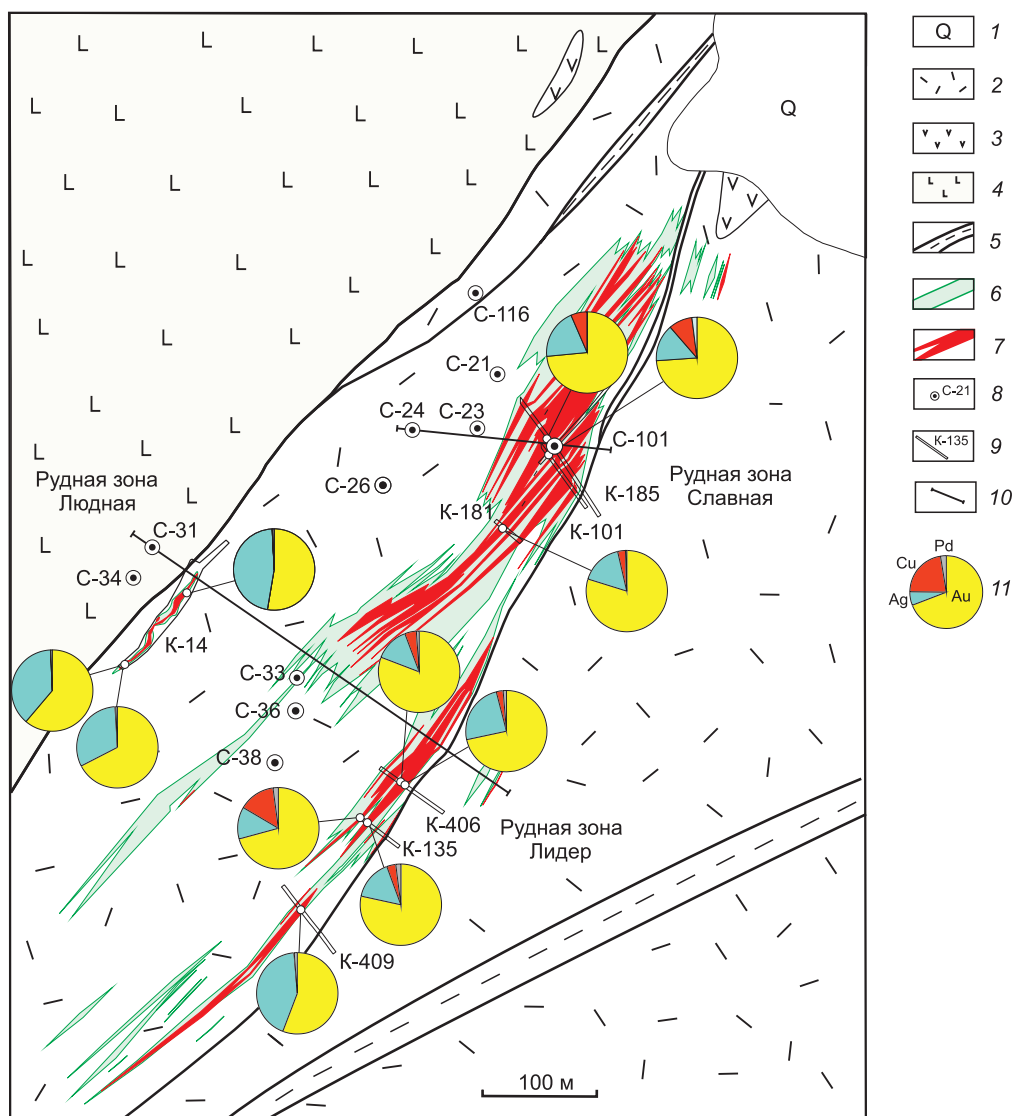


Рис. 2. Геологическая карта месторождения Чудное, по [Онищенко и др., 2014].

1 — четвертичные отложения; 2 — риолиты; 3 — андезиты; 4 — базиты (базальты и долериты); 5 — разрывные нарушения (кварц-серицитовые и серицитовые метасоматиты); 6 — зоны фукситовой минерализации; 7 — рудные тела ($\text{Au} > 1 \text{ г/т}$); 8 — скважины; 9 — каналы; 10 — линии геологических разрезов; 11 — состав самородного золота (ат. %).

ты. В зонах контакта риолитов с базитами развиты породы альбит-кварцевого, альбит-кварц-серицитового и хлорит-серицитового состава. В риолитах повсеместно распространена мелкая вкрапленность гематита, магнетит присутствует только в непосредственной близости от контакта с базитами. Отмечаются кварцевые жилы с горным хрусталем, мусковитом, крупночешуйчатым гематитом, альбитом, прожилки альбит-алланит-кварцевого состава.

Золоторудные зоны в целом контролируются тектоническими нарушениями, но непосредственно в кварц-серицитовых метасоматитах, слагающих зоны разломов, золоторудная минерализация обычно отсутствует. Промышленное золотое оруденение, относящееся к типу минерализованных прожилковых зон (линейных штоков), приурочено к трещиноватым и брекчированным риолитам. Последние характеризуются относительно стабильными содержаниями SiO_2 (73—79 мас. %) и Al_2O_3 (10—13 мас. %) при значительных вариациях в содержании щелочей, при этом K_2O чаще всего преобладает над Na_2O . Второстепенным компонентом риолитов является железо, содержание Fe_2O_3 в среднем составляет 1.8 мас. %, FeO — около 1 мас. %. Золотоносные риолиты по валовому составу незначительно отличаются от безрудных, что свидетельствует о малой роли объемных метасоматических процессов при образовании руд [Онищенко и др., 2014].

Рудные зоны имеют северо-восточное простирание и крутое (50—70°) северо-западное падение. Золоторудные зоны Славная и Лидер протягиваются в центральной части месторождения, сменяя друг друга, на расстояние около 900 м при ширине выходов до 60 м. На глубину эти зоны прослежены до 200 м без признаков выклинивания. Вблизи контакта риолитов с базитами расположена маломощная (до 5 м) зона Людная длиной около 80 м. Золото в рудных зонах распределено неравномерно, образуя линзовидные, чередующиеся между собой и расщепляющиеся рудные тела, которые разделяются некондиционными рудами или безрудными интервалами. Основное полезное ископаемое месторождения — золото, попутные компоненты — палладий и серебро. Основные запасы золота сосредоточены в рудной зоне Славная. В преобладающей части проб фиксируются содержания Au 2—5 г/т, часто 20—30 г/т, в единичных пробах отмечаются содержания Au более 100 г/т. В одном из рудных пересечений мощностью 25 м среднее содержание Au составляет 22.4 г/т [Калустов, Ефанова, 2013].

Самородное золото заключено главным образом в прожилках Cr-содержащего мусковита (фуксита) в риолитах. Толщина фукситовых прожилков колеблется от долей миллиметра до 1.0—1.5 см, риолиты вдоль зальбандов часто осветлены в зоне шириной 3—5 мм. Количество прожилков в рудных интервалах составляет 3—10 на погонный метр. Фуксит представлен тонкочешуйчатыми агрегатами изумрудно-зеленого цвета, содержание Cr_2O_3 обычно составляет 1—7 мас. %. Самородное золото образует в фуксите выделения чешуйчатой, уплощенной и неправильной формы, размер их варьирует от 1—2 мкм до 2 мм, крайне редко до 8 мм.

В сростании с золотом находятся арсеноантимониды, теллуроселениды и висмутоселениды палладия, изредка встречается сперрилит PtAs_2 и клаусталит PbSe , сульфиды представлены единичными включениями Se-содержащего халькозина состава $\text{Cu}_{1.86}\text{S}_{0.66}\text{Se}_{0.48}$. Вместе с фукситом в прожилках присутствуют алланит (в том числе Cr-содержащий), кварц, альбит, отмечаются кальцит, калиевый полевошпат, титанит, апатит, цинкохромит и другие минералы. Характерный для риолитов гематит в фукситовых прожилках встречается редко. Кроме фукситовых прожилков золото присутствует также в пятнах осветления — зонах локального (5—10 см) метасоматического изменения риолитов, в которых отсутствует пигментирующий породу гематит [Кузнецов, Онищенко, 2018]. В пятнах осветления золото находится в сростании с породообразующими минералами риолитов, титанитом, алланитом, кайсикхитом (Y), изредка с арсеноантимонидами палладия, минералами урана, пиритом и халькопиритом.

В северной части рудной зоны Славная среди риолитов находятся крупные линзы вулканитов андезитового состава редкопорфировой структуры, преобразованные в хлорит-биотит-альбитовые и серицит-биотит-альбитовые породы. Для андезитов, в отличие от риолитов, характерна рассеянная вкрапленность сульфидов, содержание которых обычно не превышает 0.5 %. В сульфидсодержащих андезитах выявлена бедная Pd-Au минерализация, расположенная на продолжении по падению рудных тел [Онищенко, Кузнецов, 2019]. В ассоциации с самородным золотом и арсеноантимонидом палладия находятся пирит, Co-содержащий пирит, кобальтин, Pd-содержащий кобальтин, Se-содержащий галенит, сфалерит, халькопирит, магнетит и алланит.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучались полированные шлифы из образцов руд и концентратов тяжелых минералов. Концентраты получены из измельченных до 1 мм рудных проб, что позволяло изучать самородное золото в сростании с сопутствующими минералами. Длина проб из керна скважин 1 м, масса 5 кг; в некоторых случаях исследуемая проба составлялась путем объединения соседних проб (до 5) с близким характером развития золотоносной минерализации. Длина бороздовых проб из полотна канав 1 м, масса 12 кг. Пробы массой 3—8 кг отбирали также из элювиальных рудных развалов с площади 1—2 м². Из отобранных навесок золота изготавливали монтированные в эпоксидной смоле полированные шлифы. Всего изучено 36 полированных шлифов из концентратов и 16 из образцов руд.

Исследования изготовленных препаратов проведены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав минералов определялся на электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (операторы Е.М. Тропников и А.С. Шуйский). Напряжение 20 кВ, характеристические линии: AuM_α , AgL_α , CuK_α , PdL_α , HgM_α , эталоны — чистые металлы для Au, Ag, Cu, Pd и HgTe для Hg. Время набора спектров составляло 60—80 с (600 тыс. имп.). Погрешность определения Au не превышала 1 отн. %, Ag и Cu — 2—3 отн. % при содержании около 10 мас. % и 6—8 отн. % при содержании 1—2 мас. %. Порог обнаружения Pd 0.5 мас. %, погрешность определения 15—20 отн. % при содержании 1—2 мас. %. Порог обнаружения Cu 0.3, Ag 0.4, Hg 1 мас. %. Определение малых содержаний ртути на электронном микроскопе с энергодисперсионным спектрометром вызвало затруднения, в связи с этим в результатах наших исследований ее содержание не приводится. По данным М.Б. Тарбаева с соавторами [1996], содержание ртути в Au-Ag матрице составляет 0.7—1.3 мас. %, в пластинках медистого золота — 0.1—0.4 мас. %. Те же закономерности выявлены нами при изучении золота на сканирующей

щем электронном микроскопе JSM-6400 с волновым спектрометром Microspec WDS-3 PC (оператор В.Н. Филиппов) — небольшие содержания ртути фиксируются в Au-Ag матрице при практически полном ее отсутствии в медистом золоте.

Всего изучено 435 зерен самородного золота. Для исследований выбирали преимущественно относительно крупные его зерна размером 150—200 мкм, но в некоторых случаях изучали частицы золота размером 10—20 мкм. Все зерна золота проверяли на фазовую неоднородность в отраженном свете и отраженных электронах в режиме повышенной контрастности.

Состав самородного золота со структурой распада Au—Ag—Cu твердого раствора определялся путем анализа по площади участков размером от 20×20 до 50×50 мкм² с однородным распределением продуктов распада. Состав зерен гомогенного строения и гомогенных продуктов распада определялся в точках с диаметром зонда около 1 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Самородное золото месторождения Чудное по основным элементам, определяющим его состав, относится к системе Au—Ag—Cu, в качестве примеси присутствуют Pd и Hg. Содержание Au заключено в диапазоне от 65.8 до 92.7 мас. % (51.5—85.7 ат. %), содержание Ag изменяется от 0.4 до 33.8 мас. % (0.6—47.7 ат. %), почти всегда присутствует Cu — до 12.7 мас. % (30.6 ат. %) и Pd (до 2.9 мас. %), отмечается Hg.

Точки состава самородного золота на диаграмме Au—Ag—Cu образуют непрерывное поле, одна из ветвей которого протягивается вдоль линии Au—Ag, а вторая, отражающая значительную роль меди, широкой полосой вытянута в направлении линии Au—Cu (рис. 3). Примесь палладия особенно характерна для Cu-содержащего золота (рис. 4), менее обычен палладий в самородном золоте с высоким содержанием серебра, где его содержание в ряде случаев ниже предела обнаружения.

Самородное золото, являвшееся при высокой температуре гомогенным твердым раствором Au, Ag и Cu, при понижении температуры в зависимости от его состава остается гомогенным или распадается на две или три фазы (см. рис. 3, б) с образованием пластинчато-решетчатых и таблитчатых структур распада. При содержании Cu до 2.5 мас. % (7 ат. %) золото, как правило, сохраняет гомогенное строение, но в области с относительно высокими содержаниями Ag уже при содержании Cu 1.1 мас. % (3 ат. %) образуется фаза AuCu. В области, ограниченной содержаниями Cu 2.5—10 мас. % и Ag 2.3—12.7 мас. % (Cu 6.5—25 ат. % и Ag 3.4—20 ат. %), золото имеет двухфазное строение (Au₃Cu и Au-Ag твердый раствор). При более высоком содержании меди наблюдается 2—3-кратный распад твердого раствора с образованием в конечном итоге трех фаз (Au₃Cu, AuCu и Au-Ag твердый раствор). Матрица в структурах распада имеет Ag-Au состав, пластинки или таблички соответствуют фазам Au₃Cu и AuCu.

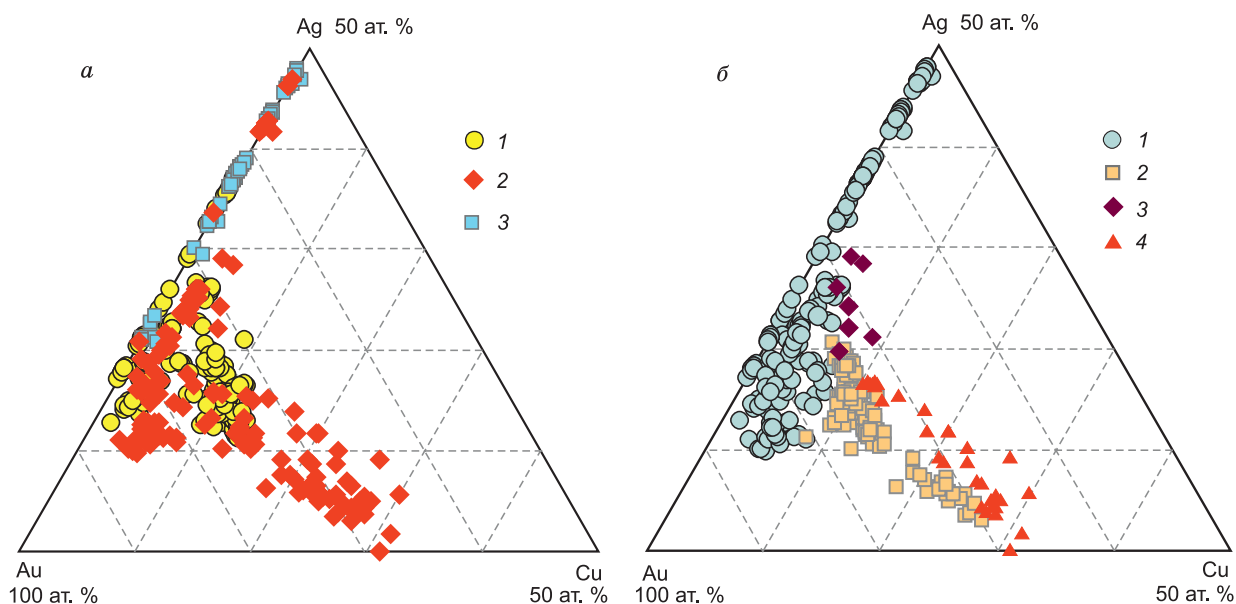


Рис. 3. Химический состав (исходный твердый раствор) и фазовый состав самородного золота месторождения Чудное ($n = 435$).

a — состав золота в рудных зонах: 1—3 — рудная зона: 1 — Славная, 2 — Лидер, 3 — Людная; *б* — фазовый состав золота: 1 — одна фаза — Au-Ag, 2 — две фазы (Au₃Cu + Au-Ag), 3 — две фазы (AuCu + Au-Ag), 4 — три фазы (Au₃Cu + AuCu + Au-Ag).

Рис. 4. Соотношение содержаний палладия и меди в самородном золоте месторождения Чудное ($n = 435$).

1—3 — рудная зона: 1 — Славная, 2 — Лидер, 3 — Людная.

Фаза Au_3Cu имеет переменный состав, содержание меди в ней составляет 23.9—29.6 ат. %. При содержании меди в фазе Au_3Cu более 30 ат. % она распадается с выделением избыточной меди в виде фазы AuCu [Онищенко, Кузнецов, 2022]. Распад твердого раствора выявлен в 45 % зерен изученного золота.

Самородное золото в рудных зонах различается по соотношению элементов и фазовому составу (табл. 1, см. рис. 3).

Рудная зона Славная. Самородное золото в риолитах локализовано преимущественно в фукситовых и алланит-фукситовых прожилках, реже в альбит-кварц-фукситовых и альбит-кварц-серицитовых. Небольшая часть золота приурочена к пятнам осветления риолитов. Вариации состава золота заключены в следующих пределах (мас. %): Au — 75.4—92.0, Ag — 7.1—16.8, Cu — до 5.4, Pd — до 2.7. Более половины (55 %) всех частиц золота испытали распад твердого раствора, главным образом на две фазы ($\text{Au}_3\text{Cu} + \text{Au-Ag}$), гораздо реже на фазы $\text{AuCu} + \text{Au-Ag}$ или на три фазы $\text{Au}_3\text{Cu} + \text{AuCu} + \text{Au-Ag}$.

В центральной части рудной зоны в ее висячем боку выделяется мощная пачка сближенных рудных тел (рис. 5), в которых доминирует золото с хорошо выраженными пластинчато-решетчатыми

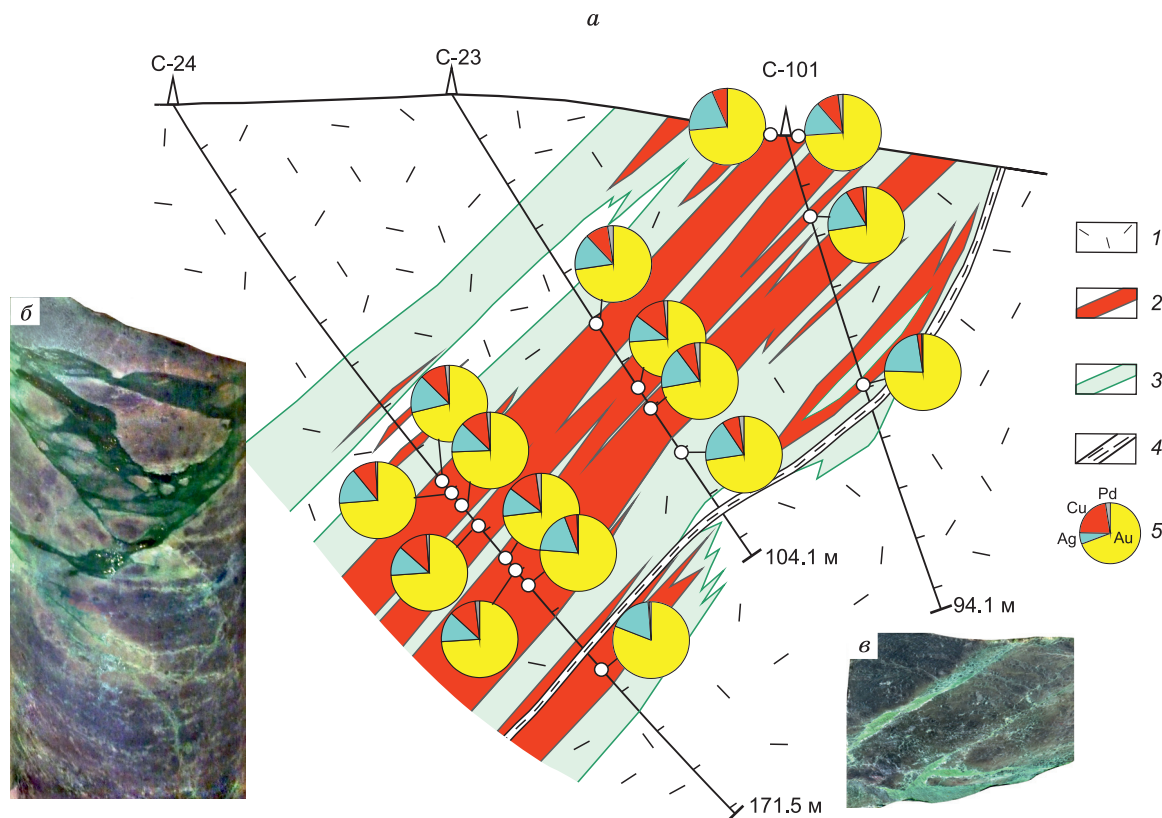
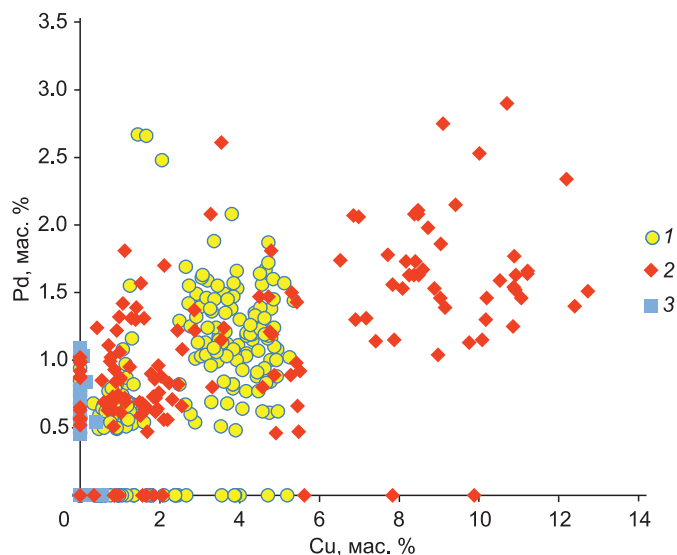


Рис. 5. Разрез через рудную зону Славная (а) и образцы руд (б, в).

1 — риолиты; 2 — рудные тела ($\text{Au} > 1 \text{ г/т}$); 3 — зоны фукситовой минерализации; 4 — разрывные нарушения (кварц-серицитовые метасоматиты); 5 — состав самородного золота (ат. %). Прожилки золотоносного фуксита в риолите: обр. 23-69.8 (б) и обр. 24-107.0 (в), диаметр керн 64 и 60 мм.

Таблица 1. Состав самородного золота месторождения Чудное (мас. %)

Скважина, канавка	Номер пробы	n	Au	Ag	Cu	Pd	Фазовый состав
Рудная зона Славная							
К-101	5384	14	85.2—86.7	9.0—9.6	3.2—3.9	1.0—1.6	Au ₃ Cu + Au-Ag
К-185	158	2	84.2—85.3	12.5—12.7	2.4—2.5	но	AuCu + Au-Ag
С-101	16.6	6	82.6—85.4	11.5—12.7	2.1—2.9	но—2.5	Au ₃ Cu + Au-Ag
»	»	1	84.2	10.4	4.1	0.9	Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag
»	47	8	84.9—86.5	13.4—14.2	0.5—0.8	но—0.6	Au-Ag
К-181	11236	10	87.8—89.6	9.8—10.3	0.9—1.4	но—0.7	»
С-21	61—63	6	85.8—87.1	12.3—13.2	но—0.3	0.6—1.0	»
»	77—80	7	79.3—83.2	16.1—16.7	0.7—1.4	0.5—1.0	»
»	»	1	80.2	16.2	1.2	0.9	AuCu + Au-Ag
»	101—103	17	88.8—92.0	7.5—9.5	0.5—1.3	но—1.6	Au-Ag
»	»	3	81.4—82.8	15.9—16.8	1.1—1.3	0.5—1.1	»
С-23	51—52	8	84.1—85.4	9.3—10.5	3.1—3.9	1.1—2.1	Au ₃ Cu + Au-Ag
»	63—68	9	86.3—87.5	7.1—7.7	4.7—5.4	но—1.7	»
»	69—70	14	83.5—85.7	10.8—12.1	2.7—3.4	1.0—1.9	»
»	78—83	4	84.0—85.1	11.4—11.6	2.5—2.9	1.3—1.4	»
С-24	86—89	6	84.2—86.0	10.3—10.7	3.9—4.4	1.1—1.4	Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag
»	89—92	12	85.4—86.3	9.3—10.1	3.5—4.1	но—1.2	Au ₃ Cu + Au-Ag
»	93—94	10	85.4—87.4	8.0—8.6	3.7—4.7	но—1.3	»
»	97—99	6	85.2—86.9	8.0—8.3	4.4—5.0	0.6—0.9	»
»	105—106	11	85.6—86.4	7.4—8.4	4.5—5.1	1.0—1.9	»
»	106—111	13	85.4—87.8	7.7—8.7	3.4—4.9	0.8—1.6	»
»	112—113	2	86.2—87.4	9.4—9.5	3.2—3.3	0.7—1.0	»
»	»	6	86.2—86.9	11.5—12.2	0.9—1.8	но—0.5	Au-Ag
»	134—137	11	88.1—89.9	10.0—11.4	но—0.5	но—0.9	»
С-26	91—97	7	88.5—89.9	10.4—11.5	но—0.6	но	»
»	»	3	85.6—86.7	8.4—8.8	3.8—4.3	1.0—1.3	Au ₃ Cu + Au-Ag
»	»	1	81.1	13.4	3.3	1.0	AuCu + Au-Ag
С-116	194—203	14	75.4—87.9	12.6—24.4	но	но	Au-Ag
Рудная зона Лидер							
С-31	222—227	6	83.9—85.0	2.5—4.5	10.2—11.2	1.3—1.6	Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag
»	»	7	84.7—88.5	2.0—4.0	6.9—10.7	1.1—2.9	Au ₃ Cu + Au-Ag
»	239—241	4	83.8—84.4	0.4—6.0	7.8—12.7	но-2.3	Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag
»	246—249	17	84.8—86.8	3.2—5.0	7.2—10.2	1.1—2.8	Au ₃ Cu + Au-Ag
»	»	4	82.5—85.3	2.6—6.8	9.0—12.4	1.0—1.8	Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag
»	255—261	12	86.1—89.1	6.4—7.9	2.9—5.5	0.5—1.4	Au ₃ Cu + Au-Ag
»	»	1	83.9	3.4	11.2	1.7	Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag
»	»	1	90.9	6.4	1.1	1.4	Au-Ag
»	»	3	78.5—83.5	14.1—18.4	1.1—2.3	0.7—1.8	AuCu + Au-Ag
С-33	130—135	14	87.0—92.7	5.8—11.2	0.5—2.9	0.6—1.7	Au-Ag
»	»	1	86.2	9.9	3.3	0.8	Au ₃ Cu + Au-Ag
С-36	113—115	8	89.9—91.8	6.4—6.9	1.6—2.1	но-0.8	Au-Ag
»	»	1	83.5	14.7	0.9	0.7	»
»	»	1	77.5	21.5	но	но	»
К-406	046	9	88.4—91.8	6.9—7.8	1.5—2.0	но—0.9	»
»	»	1	83.5	15.6	0.8	0.7	»
»	048	12	81.5—84.1	14.4—16.6	0.8—1.1	но—1.3	»
»	»	1	81.8	15.4	2.0	1.0	AuCu + Au-Ag
К-135	135001	8	84.0—86.7	5.9—9.8	3.3—6.9	но—2.6	Au ₃ Cu + Au-Ag

Таблица 1. (Окончание)

Скважина, канава	Номер пробы	<i>n</i>	Au	Ag	Cu	Pd	Фазовый состав
»	»	9	81.8—85.1	5.8—9.7	4.8—10.9	1.2—2.6	Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag
»	»	2	87.0—87.3	10.8—10.9	1.0—2.1	но	Au-Ag
»	135012	8	86.8—89.7	9.3—10.3	0.7—2.4	1.0—1.6	»
С-38	96—99	9	85.3—88.6	11.3—13.5	но—1.0	но—1.0	»
К-409	К-409	11	67.2—72.2	28.1—32.7	но—0.4	0.5—1.2	»
Рудная зона Людная							
К-14	1417	11	65.8—69.2	31.3—33.8	но—0.4	но—1.1	Au-Ag
»	1501	9	69.5—70.8	29.0—29.8	но	но—0.7	»
»	1502	7	72.9—74.8	25.0—25.8	»	но—0.8	»
»	»	6	78.3—81.1	18.9—21.4	но—0.4	но—0.8	»
С-31	65—70	9	86.2—87.6	12.7—14.5	но—0.5	но	»
С-34	50—62	20	74.8—76.6	23.7—25.4	но	»	»

Примечание. Номер пробы из керна скважин (С) отражает интервал опробования в метрах. *n* — количество изученных зерен. но — содержание элемента ниже предела обнаружения. С-116 — золото в андезитах [Онищенко, Кузнецов, 2019].

структурами распада Au-Ag-Cu твердого раствора, содержание Cu не опускается, как правило, ниже 2.1 мас. %, а в основном заключено в интервале 3—4 (до 5.4) мас. %. Состав золота в пачке закономерных изменений по падению не испытывает. В подстилающей части рудной зоны золото имеет гомогенное строение, в скв. С-24 содержание Cu в самородном золоте не превышает 0.5 мас. %, в скв. С-101 составляет 0.5—0.8 мас. %.

На флангах рудной зоны преобладает золото гомогенного строения с низкими содержаниями меди. К юго-западу по простиранию рудной зоны в канаве К-181 содержание Cu в самородном золоте составляет 0.9—1.4 мас. %, золото имеет гомогенное строение. В северной части рудной зоны по всей мощности скв. 21 (более 40 м) содержание Cu в самородном золоте не превышает 1.4 мас. %, золото имеет гомогенное строение и только в одной частице отмечен распад твердого раствора с образованием фазы AuCu.

В наиболее мощной части рудной зоны Славная, как указывалось, преобладает золото с хорошо выраженными пластинчато-решетчатыми структурами распада Au-Ag-Cu твердого раствора. Вариации

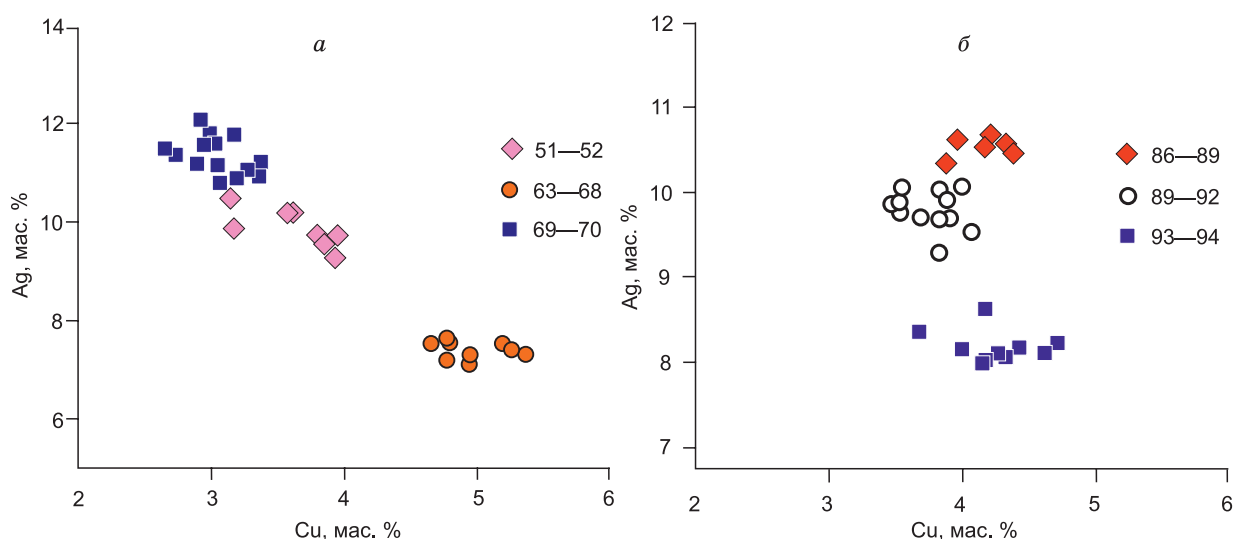


Рис. 6. Дискретный характер изменения состава самородного золота в рудах скв. С-23 (а) и в трех соседних пробах скв. С-24 (б).

Номер пробы отражает интервал опробования в метрах.

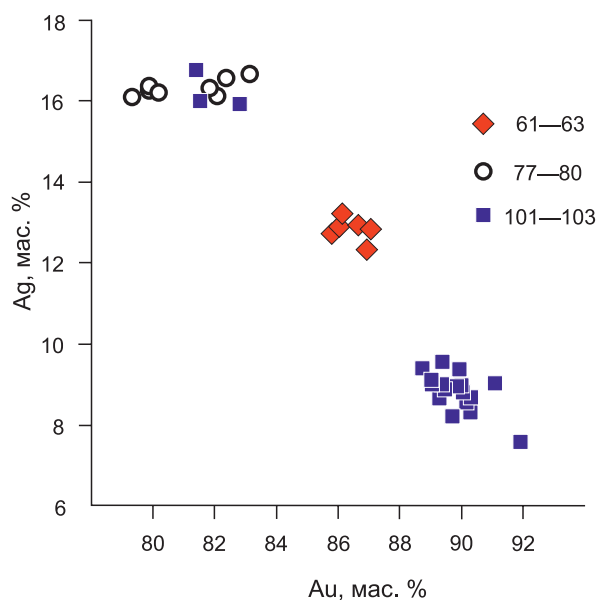


Рис. 7. Дискретный характер изменения состава самородного золота в рудах скв. С-21.

Номер пробы отражает интервал опробования в метрах.

состава золота в этой части рудной зоны не очень значительны, но при этом проявляют ярко выраженную дискретность, отражающую приуроченность золота определенного состава к группам сближенных прожилков. Закономерности изменения состава золота по скважинам С-23 и С-24 можно проследить по данным табл. 1, но более наглядно они представлены на рис. 6, из которых следует, что составы золота в конкретных пробах, характеризующих интервалы руд длиной от 1 до 5 м, образуют обособленные поля.

В рудах скв. С-23 прослеживается практически линейная зависимость между содержаниями Cu и Ag, но она не отражает характер изменения состава золота по мощности рудного тела: наиболее медистое золото присуще центральной его части, наиболее серебристое — нижней, а в верхней части распространено золото промежуточного состава. Золото в рудах скв. С-23 имеет двухфазное ($\text{Au}_3\text{Cu} + \text{Au-Ag}$) пластинчато-решетчатое строение.

В трех соседних пробах по скв. С-24, характеризующих верхнюю часть рудного тела, в самородном золоте отмечается уменьшение содержания Ag вниз по мощности тела при близких содержаниях

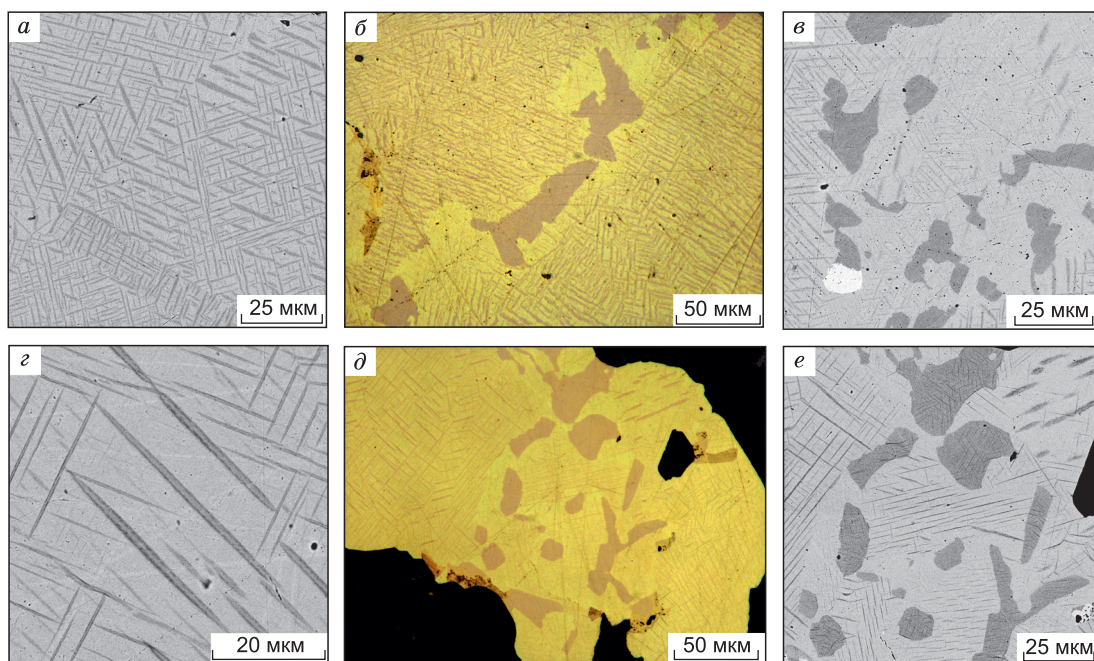


Рис. 8. Золото рудной зоны Славная со структурами распада Au-Ag-Cu твердого раствора и перекристаллизации.

Золото двухфазного строения: а — распад твердого раствора на пластинки Au_3Cu (темные) в Ag-Au матрице; б — участок локальной перекристаллизации в золоте с однородным пластинчато-решетчатым строением; обособления Au_3Cu (темные) заключены в Au-Ag матрице (светлое); в — в участке перекристаллизации матрица распадается с образованием тонкой решетки; белое — вторичное высокопробное золото; золото трехфазного строения: г — распад твердого раствора на пластинки Au_{3-x}Cu в Ag-Au матрице, пластинки Au_{3-x}Cu далее распадаются на Au_3Cu и окаймляющие их пластинки AuCu; д — участок перекристаллизации в золоте с однородным пластинчато-решетчатым строением; обособления фазы Au_{3-x}Cu заключены в Cu-содержащей Au-Ag матрице; е — в участке перекристаллизации обособления фазы Au_{3-x}Cu распадаются на Au_3Cu (матрица обособлений) и тонкие пластинки AuCu в ней, Cu-содержащая матрица распадается с образованием тонкой решетки. Полированные шлифы 24-97-99 (а), 24-105-106 (б), 24-106-111 (в), 24-86-89 (г-е). Изображения в отраженных электронах (а, в, г, е) и отраженном свете (б, д).

Таблица 2. Средний состав фаз в структурах распада твердых растворов и перекристаллизации (мас. %)

Фаза	Форма выделений	<i>n</i>	Au	Ag	Cu	Pd	Формула
Au ₃ Cu + Au-Ag (см. рис. 8, а–в)							
Au ₃ Cu	Пластины	38	87.2	1.1	10.3	1.6	Au _{2.81} Cu _{1.03} Pd _{0.09} Ag _{0.07}
Ag-Au	Матрица	38	85.9	10.2	2.3	1.3	Au _{0.76} Ag _{0.16} Cu _{0.06} Pd _{0.02}
Au ₃ Cu	Обособления	25	85.5	1.3	11.3	2.1	Au _{2.70} Cu _{1.11} Pd _{0.12} Ag _{0.07}
Ag-Au	Матрица вокруг обособлений	17	85.2	11.8	2.2	0.9	Au _{0.74} Ag _{0.19} Cu _{0.06} Pd _{0.01}
Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag (см. рис. 8, з–е)							
Au ₃ Cu	Пластины, центральная часть	5	85.1	1.8	11.3	1.6	Au _{2.70} Cu _{1.11} Pd _{0.09} Ag _{0.10}
Ag-Au	Матрица	5	84.3	12.1	2.5	1.1	Au _{0.72} Ag _{0.19} Cu _{0.07} Pd _{0.02}
Au _{3-x} Cu*	Обособления	5	84.8	1.3	12.3	1.7	Au _{2.64} Cu _{1.19} Pd _{0.10} Ag _{0.07}
Au ₃ Cu	Матрица обособлений	6	85.3	1.4	11.8	1.8	Au _{2.67} Cu _{1.15} Pd _{0.10} Ag _{0.08}
AuCu	Тонкие пластины	1	79.0	0.4	19.2	1.1	Au _{1.12} Cu _{0.84} Pd _{0.03} Ag _{0.01}
Au ₃ Cu + Au-Ag (см. рис. 10, а)							
Au ₃ Cu	Таблички	10	85.2	1.1	11.3	2.3	Au _{2.70} Cu _{1.11} Pd _{0.13} Ag _{0.06}
Ag-Au	Матрица	8	85.4	11.4	2.7	0.5	Au _{0.74} Ag _{0.18} Cu _{0.07} Pd _{0.01}
Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag (см. рис. 10, в)							
Au _{3-x} Cu*	Таблички	7	84.3	1.4	12.6	1.7	Au _{2.61} Cu _{1.21} Pd _{0.10} Ag _{0.08}
Au ₃ Cu	Матрица табличек	6	85.2	1.5	11.6	1.8	Au _{2.68} Cu _{1.13} Pd _{0.10} Ag _{0.09}
AuCu	Тонкие пластины	5	77.3	0.2	21.6	1.0	Au _{1.06} Cu _{0.91} Pd _{0.03}
Ag-Au	Матрица	6	84.3	13.2	2.2	0.6	Au _{0.72} Ag _{0.21} Cu _{0.06} Pd _{0.01}
Au ₃ Cu + AuCu + Au-Ag (см. рис. 10, з)							
Au _{1+x} Cu*	Толстые пластины	5	78.5	0.4	18.7	2.3	Au _{1.11} Cu _{0.82} Pd _{0.06} Ag _{0.01}
AuCu	Совместные сростания, слагающие толстые пластины	7	75.2	—	21.9	2.4	Au _{1.02} Cu _{0.92} Pd _{0.06}
Au ₃ Cu		7	85.3	1.3	11.6	2.4	Au _{2.66} Cu _{1.13} Pd _{0.14} Ag _{0.07}
Ag-Au	Матрица	8	84.8	13.0	2.2	0.3	Au _{0.73} Ag _{0.20} Cu _{0.06} Pd _{0.01}

Примечание. *n* – количество определений. Приведены ссылки на рисунки с соответствующим типом распада твердого раствора.

* Метастабильные фазы.

Cu. В двух нижних пробах распад твердого раствора происходит на две фазы (Au₃Cu + Au-Ag), в верхней — на три фазы (Au₃Cu + AuCu + Au-Ag). На этом примере хорошо видно как относительно небольшие изменения состава твердого раствора отражаются на фазовом составе самородного золота. Хотя причиной распада Au-Ag-Cu твердого раствора является наличие Cu, на устойчивость различных фаз медистого золота влияет также содержание Ag.

Дискретный характер изменения состава прослеживается и в самородном золоте гомогенного строения. В трех пробах скв. С-21 (см. рис. 7) золото в каждом интервале рудного тела характеризуется своим специфическим составом, при этом изменения могут происходить на весьма небольшом расстоянии. В частности, в двухметровом интервале (пр. 101—103) золото образует две группы, отличающиеся по составу (см. рис. 7).

Характерные для медьсодержащего золота рудной зоны Славная пластинчато-решетчатые структуры двухфазного распада твердого раствора Au-Ag-Cu образованы многочисленными пластинками фазы Au₃Cu в Ag-Au матрице (рис. 8, а, табл. 2). Пластинки имеют индивидуальную ориентировку в пределах каждого зерна или сдвойникованных его частей. По форме пластинки представляют уплощенные линзы, их толщина обычно составляет 1—3 мкм, длина 20—30 мкм, изредка до 80 мкм, при сближении с пластинками другой ориентировки происходит их выклинивание.

В золоте с однородным пластинчато-решетчатым строением выделяются участки перекристаллизации с относительно крупными (20—30 мкм) обособлениями Au₃Cu, заключенными в Au-Ag матрице (см. рис. 8, б). Матрица в зоне шириной 5—10 мкм имеет гомогенное строение (см. табл. 2), далее постепенно или достаточно резко сменяется тонкорешетчатым строением, отличающимся от решетчатого строения, присущего данному зерну. Следовательно, после перекристаллизации на фоне понижающейся температуры происходил дополнительный распад Cu-содержащей Au-Ag матрицы с образованием в

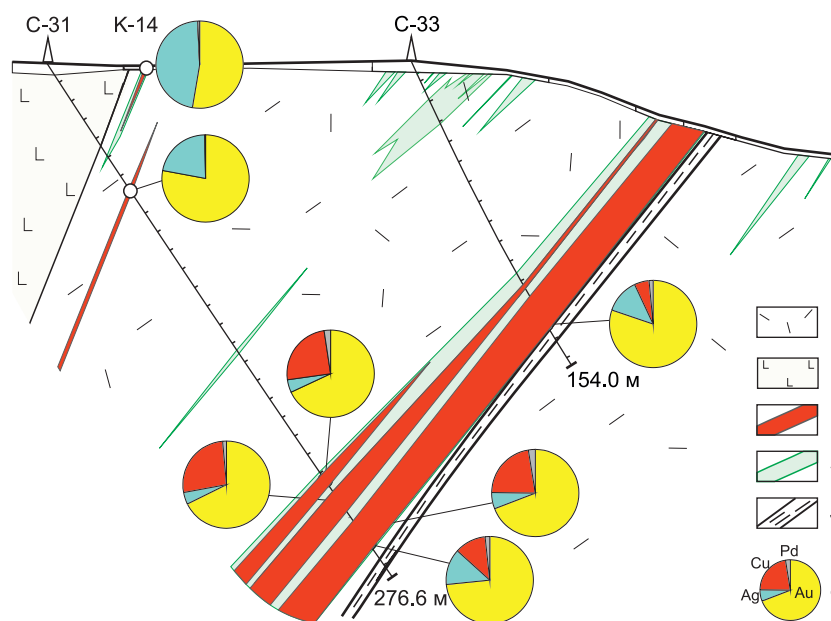


Рис. 9. Разрез через рудные зоны Людная и Лидер.

1 — риолиты; 2 — базиты (базальты и долериты); 3 — рудные тела ($Au > 1$ г/т), 4 — зоны фукситовой минерализации; 5 — разрывные нарушения (кварц-серицитовые метасоматиты); 6 — состав самородного золота (ат. %).

ней тонкой решетки Au_3Cu (см. рис. 8, в).

Трехфазный распад твердого раствора $Au-Ag-Cu$ в рудной зоне Славная отмечается относительно редко и проявляется в золоте не с самыми высокими содержаниями меди, а с благоприятными соотношениями меди и серебра, как в упомянутой выше пр. 24-86-89.

Структура распада имеет пластинчато-решетчатое строение (см. рис. 8, г), напоминающее двухфазную пластинчато-решетчатую структуру распада, но с отчетливо проявленным двукратным распадом твердого раствора. Пластинки, первоначально сложенные гомогенной фазой $Au_{3-x}Cu$ (высокотемпературной фазой Au_3Cu), распадаются на Au_3Cu (центральная часть пластинок) и окаймляющие их пластинки $AuCu$. В таблице 2 приведен состав центральной части пластинок и $Ag-Au$ матрицы. В золоте с трехфазным распадом твердого раствора, как и в случае двухфазного распада, отмечены участки перекристаллизации с образованием обособлений, сложенных первоначально гомогенной фазой $Au_{3-x}Cu$ (высокотемпературной фазой Au_3Cu), заключенной в Cu -содержащей $Au-Ag$ матрице (см. рис. 8, д). При дальнейшем понижении температуры произошел повторный распад твердого раствора в виде многочисленных пластинок толщиной до 1 мкм, хорошо проявленных как в обособлениях, так и в матрице (см. рис. 8, е). Пересыщенная медью фаза $Au_{3-x}Cu$ неустойчива и распадается с выделением тонких пластинок $AuCu$ в матрице обособления.

В сульфидсодержащих андезитах (скв. С-116) золото и минералы палладия чаще всего находятся в пирите, реже в алланите и магнетите. Золото (5—10 мкм, редко до 0.1 мм) имеет гомогенное строение (мас. %): Au — 74.8—87.9, Ag — 12.5—24.4, Cu и Pd не обнаружены.

Рудная зона Лидер при значительной протяженности имеет относительно небольшую мощность (см. рис. 2, 9). Руды не отличаются высокими содержаниями Au , но характеризуются наибольшим разнообразием состава и строения самородного золота. Золото обычно приурочено к прожилкам St -содержащего мусковита, однако заметная его доля, в отличие от рудной зоны Славная, заключена в локальных участках метасоматического изменения (пятнах осветления) риолитов, где ассоциирует с альбитом, мусковитом, кварцем, эпидот-алланитом и другими минералами.

Общие вариации состава самородного золота в зоне значительны (мас. %): Au — 67.2—92.7, Ag — 0.4—32.7, Cu — 0—12.7, Pd — 0—2.9, состав его изменяется от медистого золота (Cu до 12.7 мас. %), в котором медь заметно преобладает над серебром (скв. С-31) до серебристого золота (Ag до 32.7 мас. %), в котором содержание меди не превышает 1.2 мас. % (канавка К-409).

В северо-восточной части рудной зоны, вскрытой С-33 и С-31 (см. рис. 9), руды сложены брекчиевидными и трещиноватыми риолитами с линзами и пятнами осветления. Фуксит присутствует в виде ярко-зеленых линзочек и тонких прожилков и развивается в цементе брекчии.

В рудах, пересекаемых С-33, преобладает высокопробное золото гомогенного строения, содержащее (мас. %): Au 87.0—92.7, Ag — 5.8—11.2, Cu — 0.5—2.9 и Pd — 0.6—1.7. Ниже по падению (С-31) рудная зона увеличивается в мощности, расщепляясь на три рудных тела, состав золота в которых в основном характеризуется очень высокими содержаниями меди, превышающими содержания серебра (мас. %): Au — 82.5—88.5, Ag — 0.4—6.8, Cu — 6.9—12.7, Pd — 0—2.9. Во всех зернах происходит распад твердого раствора на две фазы $Au_3Cu + Au-Ag$ или три фазы $Au_3Cu + AuCu + Au-Ag$. Только в основании рудной зоны самородное золото менее медистое и более разнообразное по составу, наиболее распространено золото с содержанием Cu 2.9—5.5 мас. %, распадающееся на фазы $Au_3Cu + Au-Ag$.

В 40 м к юго-западу рудная зона Лидер вскрыта канавой К-406 и скв. С-36 (см. рис. 2). В целом золото в рудах маломедистое (Cu не более 2.1 мас. %) и практически всегда имеет гомогенное строение.

На поверхности в зоне выделяются два рудных тела, отчетливо различающихся по составу золота. В одном из них самородное золото содержит обычно 6.9—7.8 мас. % Ag и 1.5—2.0 мас. % Cu, в другом содержание Ag значительно выше и составляет 14.4—16.6 мас. % при содержании Cu в основном 0.8—1.1 мас. %, но в одной их частиц содержание Cu достигает 2.0 мас. %, что вызывает распад твердого раствора с образованием тонкой решетки AuCu. В скважине С-36, пересекающей рудную зону на глубине 90 м от поверхности, состав самородного золота такой же, как в первом рудном теле (мас. %): Ag 6.4—6.9, Cu 1.6—2.1.

Еще в 40 м к юго-западу рудная зона вскрыта канавой К-135 и скв. С-38 (см. рис. 2). Золото приурочено к фукситовым прожилкам в брекчиевидных риолитах. В рудах, выходящих на поверхность, золото имеет гомогенное строение, содержание Cu 0.7—2.4 мас. % (пр. 135012). В 60 м ниже по падению (С-38) золото также имеет гомогенное строение, содержание Cu до 1.0 мас. %. В канаве К-135 присутствует еще один небольшой (до 1.5 м) интервал, в котором рудами являются относительно массивные риолиты с золотоносными пятнами осветления. Золото имеет изометричную, часто амебообразную форму, чем значительно отличается от пластинчатого золота в фукситовых прожилках. Отличается золото и по составу (пр. 135001), преобладают частицы двухфазного $Au_3Cu + Au-Ag$ или трехфазного $Au_3Cu + AuCu + Au-Ag$ строения, содержащие 3.3—9.9 мас. % меди.

На юго-западном окончании рудной зоны (К-409) самородное золото связано с фукситовыми прожилками, отличается высоким содержанием серебра (28.1—32.3 мас. %) при содержании золота 68.2—72.2 мас. %, меди практически нет, но всегда фиксируется палладий (0.5—1.2 мас. %). Золото имеет гомогенное строение.

Таким образом, в рудной зоне Лидер проявляются отчетливые закономерности изменения состава золота, связанного преимущественно с фукситовыми прожилками. В северо-восточной части рудной зоны маломедистое и малосеребристое золото (С-33) по падению сменяется высокомедистым (С-31), часть которого локализована в пятнах осветления риолитов. В юго-западном направлении по простиранию рудной зоны серебристость золота в целом возрастает, достигая максимума в канаве К-409. Из этого тренда выпадает золото, локализованное не в прожилках, а в пятнах осветления риолитов (К-135, пр. 135001), отличающееся от соседней пр. 135012 не только своим значительно более медистым составом, но и заметными его вариациями.

В рудной зоне Лидер половина зерен самородного золота имеет гомогенное строение, еще в половине зерен фиксируется распад Au-Ag-Cu твердого раствора. Незначительная часть (около 2 %) выделений самородного золота, имеющая невысокое содержание меди (1.1—2.3 мас. %) при высоком содержании серебра (14.1—18.4 мас. %), распадается на фазы AuCu + Au-Ag.

Около 30 % зерен золота распадается на фазы $Au_3Cu + Au-Ag$, образующие такие же пластинчато-решетчатые сростания, как и в золоте рудной зоны Славная, но в зоне Лидер распространено также золото с более высоким (8—10 мас. %) содержанием меди, при распаде которого образуются широкие пластинки и таблички фазы Au_3Cu (рис. 10, а, см. табл. 2). При собирательной перекристаллизации золота образуются крупные обособления Au_3Cu и Au-Ag, графическое строение зерен частично утрачивается (см. рис. 10, б).

Около 15 % зерен самородного золота испытывают распад на три фазы ($Au_3Cu + AuCu + Au-Ag$). Характер распада зависит от соотношений элементов в твердом растворе. При высоком содержании Cu (10.2—11.2 мас. %) и низком содержании Ag (2.5—4.5 мас. %), отмеченным в пр. 31-222-227, распад твердого раствора происходит с образованием табличек фазы $Au_{3-x}Cu$ (высокотемпературная фаза Au_3Cu), разделяющихся узкими полосками Ag-Au матрицы. Фаза $Au_{3-x}Cu$ распадается на Au_3Cu , составляющей матрицу табличек и тонких пластинок AuCu в ней (см. рис. 10, в; табл. 2).

Иначе протекает распад твердого раствора при относительно невысоком содержании Cu (4.8—10.9 мас.%) и более высоком содержании Ag (5.8—9.7 мас.%) в пр. 135001. В этом случае вначале образуются толстые пластинки фазы $Au_{1+x}Cu$, по составу близкой к Au_3Cu_2 , затем тонкие пластинки фазы $Au_{3-x}Cu$, заключенные в Ag-Au матрице с повышенным содержанием Cu. При дальнейшем охлаждении пластинки метастабильной фазы $Au_{1+x}Cu$ распадутся на фазы AuCu и Au_3Cu (см. рис. 10, г; табл. 2). Тонкие пластинки пересыщенной медью фазы $Au_{3-x}Cu$ при распаде приобретают характерное строение в виде центральной пластинки Au_3Cu , окаймленной с двух сторон пластинками AuCu. Избыток меди в матрице выделяется в виде тончайших пластинок этих же фаз. При неоднородной собирательной перекристаллизации, сопровождающей процесс распада твердого раствора, строение золота значительно усложняется (см. рис. 10, д). Первичная фаза $Au_{1+x}Cu$ (распавшаяся на AuCu и Au_3Cu) занимает отдельные участки, а крупные поля сложены фазой $Au_{3-x}Cu$ и Cu-содержащей фазой Au-Ag, в обоих полях при дальнейшем распаде образовались тонкие пластинки медистого золота.

В локальных участках руд золота, как правило, характеризуется близким составом и особенностями строения, но в некоторых случаях отмечаются их заметные вариации даже на небольшом расстоянии. На рисунке 11, а, б золото с неоднородной структурой двухфазного распада твердого раствора

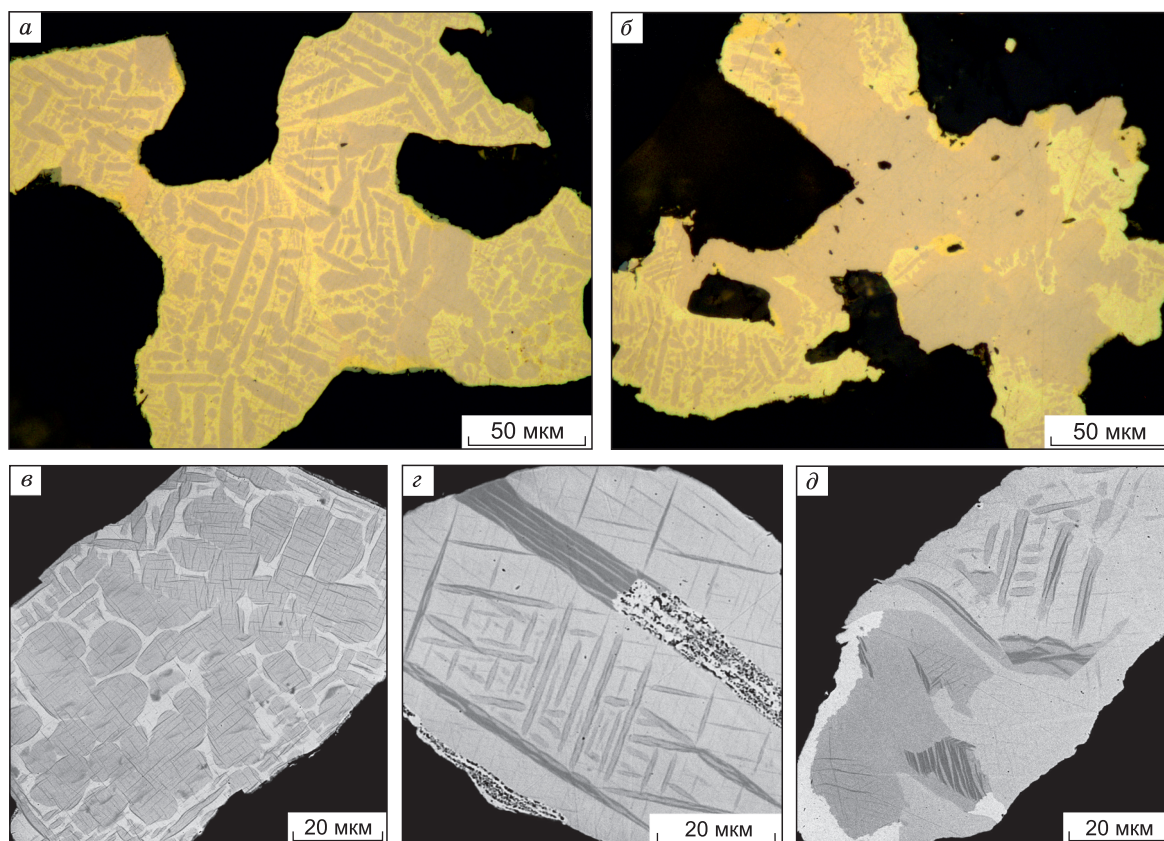


Рис. 10. Золото рудной зоны Лидер со структурами распада Au-Ag-Cu твердого раствора и перекристаллизации.

Золото двухфазного строения: *а* — пластинки-таблички Au_3Cu в Au-Ag матрице; *б* — обособления Au_3Cu , образовавшиеся путем собирательной перекристаллизации пластинок-табличек Au_3Cu ; золото трехфазного строения: *в* — таблички Au_{1-x}Cu , заключенные в Ag-Au матрице, распадаются на Au_3Cu (матрица табличек) и темные тонкие пластинки AuCu в ней; *з* — толстые пластинки метастабильной фазы Au_{1-x}Cu распались на AuCu (наиболее темная) и Au_3Cu , в Au-Ag матрице распространены тонкие пластинки Au_3Cu с темной каймой AuCu (результат распада фазы Au_{3-x}Cu), толстые пластинки медистого золота замещаются высокопробным вторичным золотом (белое с черными порами); *д* — при перекристаллизации первичная фаза Au_{1-x}Cu (распавшаяся на AuCu и Au_3Cu) сохранилась в виде реликтов среди фазы Au_{3-x}Cu и столь же крупных полей Cu-содержащей фазы Au-Ag, в обоих полях при дальнейшем распаде образовались плохо заметные пластинки медистого золота, по периферии зерна развивается высокопробное вторичное золото (белое). Изображения в отраженном свете (*а*, *б*) и отраженных электронах (*в*—*д*). Полированные шлифы 31-246-249 (*а*, *б*), 31-222-227 (*в*) и 135001 (*з*, *д*).

находится в сростании с кварцем и редкоземельными минералами. По границам всех зерен минералов, в том числе золота, развиваются тонкие прожилки коффинита. При резко различных размерах зерен состав золота в них довольно близок, в крупном зерне на рис. 11, *а* (мас. %): Au — 85.0, Ag — 3.6, Cu — 9.1, Pd — 2.8, в трех мелких частицах на рис. 11, *б* (мас. %): Au — 84.9, 84.8 и 82.8, Ag — 4.4, 4.8 и 4.4, Cu — 8.4, 8.5 и 8.6, Pd — 2.1, 2.1 и 2.6. Другая ситуация отражена на рис. 11, *в*, где выявлены заметные вариации состава золота в соседних зернах, что сказалось на структуре распада Au-Ag-Cu твердого раствора. Одно из зерен содержит меньше меди и имеет двухфазную структуру распада, в двух зернах с более высоким содержанием меди отчетливо проявлена трехфазная структура распада. Состав золотинок на рис. 11, *з*, *д* и *е* следующий (мас. %): Au — 82.5, 86.8 и 83.7; Ag — 3.9, 5.0 и 6.8; Cu — 12.4, 7.2 и 9.0; Pd — 1.4, 1.3 и 1.0. Следует отметить, что, несмотря на имеющиеся различия, все зерна золота, изображенные на рис. 11, имеют высокое содержание меди, характерное для интервала руд, в которых они находятся (пр. 31-246-249).

Рудная зона Людная протягивается вдоль контакта риолитов с породами основного состава (см. рис. 2, 9). На поверхности в рудах отмечаются высокие содержания Au, самородное золото заключено в фуксите. С глубиной содержание Au значительно падает, а фуксит сменяется серицитом. Самородное золото в рудной зоне имеет гомогенное строение (рис. 12), основные вариации его состава заключаются в изменении соотношения между Au и Ag (мас. %): Au — 65.8—87.6, Ag — 12.7—33.8. Содержание Cu

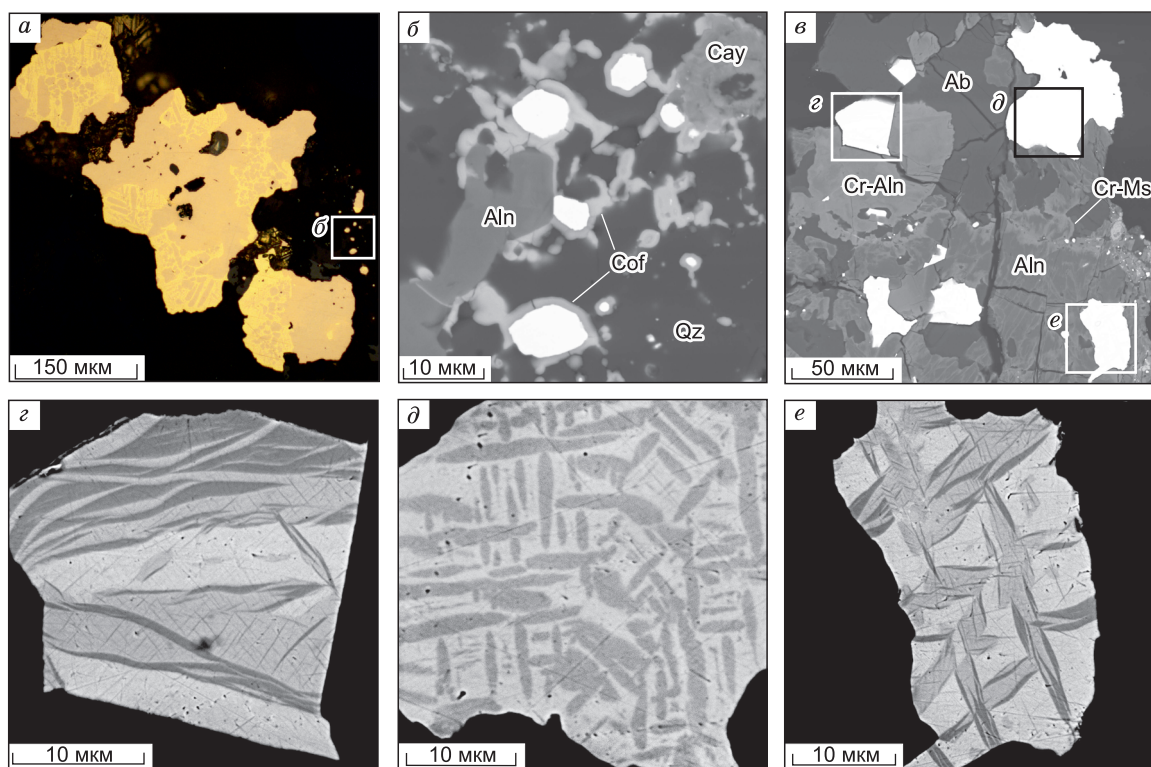


Рис. 11. Вариации состава и строения самородного золота в локальных участках руд.

a, б — крупное золото на *a* и мелкое золото на *б* (белое) имеют близкий состав, Qz — кварц, Aln — алланит, Cay — кайсикхит (Y), CoF — коффинит; *в* — золото в сростании с альбитом (Ab), эпидот-алланитом (Aln), Cr-содержащим алланитом (Cr-Aln) и фукситом (Cr-Ms); *г-е* — фрагменты *в* — зерна золота отличаются фазовым составом. Изображения в отраженном свете (*a*) и отраженных электронах (*б-е*). Полированный шлиф 31-246-249.

не превышает 0.5 мас. % и часто ниже предела обнаружения, Pd фиксируется чаще, его содержание достигает 1.1 мас. %.

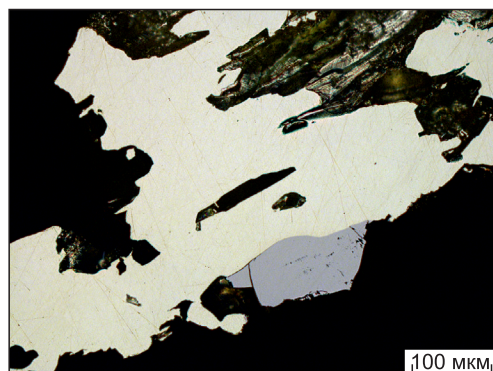
Наиболее высокие содержания серебра в самородном золоте отмечены в северо-восточной части рудной зоны, где по результатам изучения двух проб (1417 и 1501) содержания Ag составляют 29.0—29.8 и 31.3—33.8 мас. % соответственно. В юго-восточной части зоны содержания серебра в самородном золоте ниже, причем отмечена дискретность в изменении его состава. В пробе 1502, отобранной с площади 2 м², состав золота разделяется на две группы (Ag — 18.9—21.4 и 25.0—25.8 мас. %), что отражает приуроченность золота к различным сериям фукситовых прожилков.

На глубине около 60 м рудная зона пересекается скважинами С-31 (см. рис. 9) и С-34. В составе самородного золота в северо-восточной части рудной зоны (С-31) отмечено относительно низкое содержание Ag, составляющее 12.7—14.5 мас. %, к юго-западу (С-34) содержание Ag в самородном золоте заметно более высокое — 23.7—25.5 мас. %.

Таким образом, общие тенденции изменения состава самородного золота в рудной зоне Людная сводятся к следующему. На поверхности происходит уменьшение содержания серебра в юго-западном направлении. По падению в северо-восточной части рудной зоны отмечено значительное уменьшение содержания серебра, в юго-западной изменения содержания серебра незначительны. При этом наиболее важной особенностью изменений состава золота яв-

Рис. 12. Золото рудной зоны Людная гомогенного строения (светлое) в сростании с арсеноантимонидом палладия — мертинитом II.

Полированный шлиф 1501. Отраженный свет.



ляется ее дискретный характер — в каждой части рудной зоны золото имеет свой специфический состав, отражающий линзовидно-прерывистое ее строение.

Вторичное высокопробное золото. Первичное самородное золото, охарактеризованное выше, подвержено эпигенетическим изменениям и замещается вторичным высокопробным золотом, соответствующим ранее выделенному золоту II типа [Тарбаев и др., 1996].

Вторичное золото отмечается во всех рудных зонах, включая самые глубокие их части, где замещает любые разновидности первичного золота. Вместе с этим можно отметить, что наиболее серебристое золото подвержено этому процессу значительно реже. Вторичным золотом обычно замещено не более 5 % объема первичного золота, но замещение проявляется весьма неравномерно и многие зерна этим процессом совсем не затронуты, но в отдельных участках руд замещение вторичным золотом проявлено настолько интенсивно, что от первичного золота остаются только мелкие реликты. Вторичное золото образует прожилковидные выделения (рис. 13, а), пятна неправильной формы, клиновидные вроски и прерывистые периферийные каймы при сохранении первоначальной формы зерен самородного золота.

Вторичное золото характеризуется высоким содержанием Au, которое заключено в интервале 94.6—100 мас. %, средний состав ($n = 141$, мас. %): Au — 98.0, Pd — 1.2, Ag — 0.6, Cu — 0.2. Содержания Cu и Ag часто ниже предела обнаружения, палладий, напротив, присутствует в высокопробном золоте практически всегда, максимальное содержание Pd — 3.0 мас. %. В рудной зоне Лидер (С-38) обнаружено золото с более высоким содержанием Pd, которое совместно с высокопробным золотом обычного состава (Pd — 1.9 мас. %) образует прожилковое выделение в первичном золоте гомогенного строения. Палладистое золото образует выделения размером 10—15 мкм. Содержание Pd заключено в пределах 5.4—9.3 мас. %, средний состав ($n = 4$, мас. %): Au — 93.0, Pd — 6.8, Ag — 0.2, Cu — 0.1.

Высокопробное золото обычно имеет пористое строение и содержит мелкие каверны, в некоторых случаях пористость золота в соседних выделениях значительно различается, но в составе золота это не отражается. Высокопробное золото в отраженном свете отличается желтой окраской, в отраженных электронах выглядит наиболее ярким.

В первичном золоте с хорошо выраженной структурой распада твердого раствора проявлено избирательное замещение пластинок медистого золота высокопробным золотом [Онищенко и др., 2020]. При этом часто наблюдается точное наследование пластинчато-решетчатого строения структуры распада твердого раствора (см. рис. 13, б). Замещение пластинок проявлено неравномерно. В одних выделениях золота замещены только единичные пластинки медистого золота, в других — большая их часть, при этом всегда остаются пластинки, не затронутые этим процессом. Отдельно взятые пластинки медистого золота замещаются целиком, реже частично. Замещение пластинок медистого золота высокопробным золотом нередко сочетается с прожилковидными его выделениями. В некоторых случаях избирательному замещению подвергаются не пластинки медистого золота, а его более крупные обособления (см. рис. 13, в), образовавшиеся при частичной перекристаллизации золота пластинчато-решетчатого строения.

Образование высокопробного золота сопровождается выносом из первичного золота Ag и Cu, в единичных случаях (пр. 31-246-249) отмечена фиксация выносимой меди в виде тонких (5 мкм) каемок халькопирита с внешней стороны зерен золота.

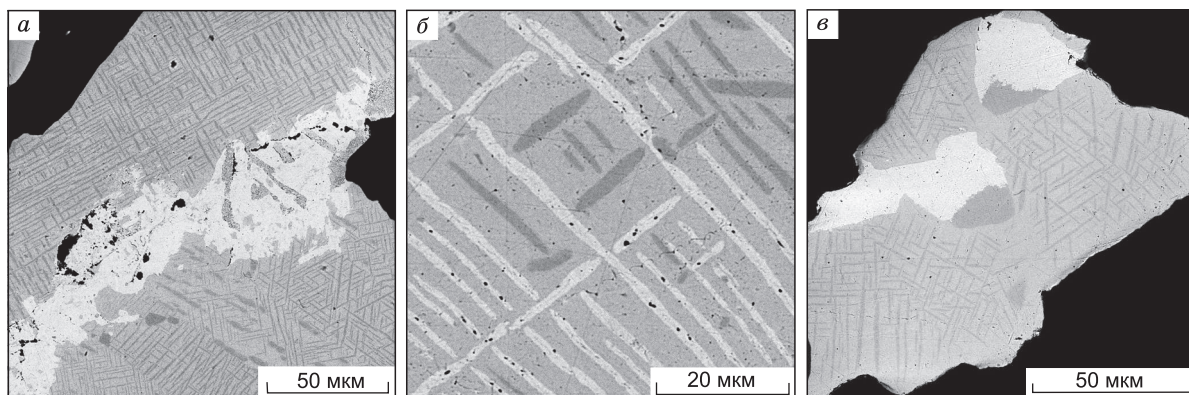


Рис. 13. Вторичное высокопробное золото.

а — прожилковидные выделения высокопробного золота (белое с черными кавернами) в первичном золоте с решетчатой структурой распада; б — высокопробное золото (белое) точно наследует форму пластинок Au_3Cu ; в — высокопробное золото (белое) избирательно замещает обособления Au_3Cu . Полированные шлифы 24-97-99 (а), 23-63-68 (б), 24-106-111 (в). Изображения в отраженных электронах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Золото-палладиевая минерализация месторождения Чудное рассматривается большинством исследователей как продукт гидротермальных процессов. Ассоциация Сг-содержащего мусковита (фуксита) с золотом и платиноидами свидетельствует о едином глубинном источнике этих элементов, в качестве которого наиболее вероятны производные базит-гипербазитового магматизма. Согласно существующим представлениям, происходил привнос этих элементов в риолиты восходящими гидротермальными растворами из возможно находящихся на глубине пород основного или ультраосновного состава [Тарбаев и др., 1996; Шумилов, Осташенко, 2000; Суренков, 2003; Моралев и др., 2005a; Борисов, 2005; Palyanova et al., 2021]. Наиболее важным обстоятельством, оказывающим влияние на генетические представления, является неопределенность, связанная с наличием в рудах хромсодержащих минералов. Как показано в ряде работ, высокохромистый фуксит формируется только в непосредственной близости от тел ультрабазитов и пикритов [Сазонов и др., 2001]. Между тем наличие пород ультраосновного или близкого состава в районе месторождения не установлено. Не находит пока своего объяснения и тесная взаимосвязь золота с фукситом в прожилках и, напротив, отсутствие такой взаимосвязи в пятнах осветления риолитов, в которых хромсодержащие минералы не обнаружены.

Изотопно-геохронологическое датирование по фукситу $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ методами показало несколько возрастных значений (млн лет): 249, 254, 265 и около 300, отвечающих позднему и среднему палеозою [Кузнецов, Андреичев, 1998; Моралев и др., 2005b]. Можно заметить, что это время проявления регионального метаморфизма зеленосланцевой фации и гидротермальных процессов, обусловивших формирование различной жильной минерализации, в частности, хрусталеносных кварцевых жил, возраст которых оценивается как пермский или пермско-триасовый. Вместе с этим отмечается, что фукситовые прожилки могут быть более древними — докембрийскими, претерпевшими впоследствии неоднократные гидротермальные воздействия. В частности, рядом авторов [Шумилов, Осташенко, 2000; Галанкина, 2001; Ефанова, Юдович, 2002] предполагается, что золотое оруденение в перекрывающих породах алькесвожской свиты (рудопоявление Нестеровское) образовалось в результате размыва докембрийских рудоносных пород. Существует также точка зрения, что золотое оруденение на месторождении Чудное образовалось в алькесвожское время путем механической просадки золота по трещинам в риолитах с последующим метаморфизмом пород [Озеров, 1996].

Характерной чертой месторождения является практически полное отсутствие сульфидов в риолитах, но, как показывают результаты наших исследований, на дорудном этапе в них существовала халькопирит-пирротиновая минерализация, реликты которой сохранились в виде включений в аксессуарном цирконе. Не менее характерной чертой риолитов является повсеместное распространение гематита, в котором железо находится в высшей степени окисления, в то время как первичными минералами пород являлись ильменит и Ti-содержащий магнетит. Таким образом, рудовмещающие породы подверглись сильному окислению, в результате которого произошло удаление серы и именно это обстоятельство создавало необходимые условия для вхождения меди в самородное золото. Ранее для месторождения Золотая Гора уже отмечалось [Спиридонов, Плетнев, 2002], что минералы группы медистого золота формировались при крайне низкой фугитивности серы. Применительно к месторождению Чудное можно утверждать, что медьсодержащее золото образовалось в условиях низкой активности сульфид-иона при повышенной фугитивности кислорода. Это заключение подтверждается характером рудной минерализации в андезитах на продолжении по падению руд в риолитах. В сульфидсодержащих андезитах преобладающим оксидом железа является магнетит, самородное золото в качестве примеси содержит только серебро, а медь и палладий не обнаружены. В этих условиях медь заключена в халькопирите, а палладий, помимо арсеноантимонидов фиксируется в арсеносульфиде — Pd-содержащем кобальтине.

Самородное золото месторождения в период образования, вероятнее всего, имело гомогенное строение, однако впоследствии претерпело достаточно сложные преобразования. Ведущим процессом являлся распад твердого Au-Ag-Cu раствора, обусловленный снижением температуры, в результате которого в зависимости от исходного состава твердый раствор оставался гомогенным или распадался на две или три фазы, при этом каждое зерно золота являлось в этот период закрытой системой. Фазовый состав самородного золота отображается на диаграмме Au—Ag—Cu закономерным образом (см. рис. 3, б), что позволило уточнить фазовую диаграмму для низких температур [Онищенко, Кузнецов, 2022]. Равновесными фазами при распаде на две фазы являются Au_3Cu и Au-Ag твердый раствор или AuCu и Au-Ag твердый раствор, при распаде на три фазы — Au_3Cu , AuCu и Au-Ag твердый раствор (рис. 14).

Распад твердого раствора обусловлен наличием меди, а ее содержанием определяются особенности структуры распада. При повышении содержания меди в твердом растворе пластинчато-решетчатая структура распада сменяется таблитчатой. Процесс распада твердого раствора сопровождался или прерывался перекристаллизацией золота с образованием зернистых сростаний.

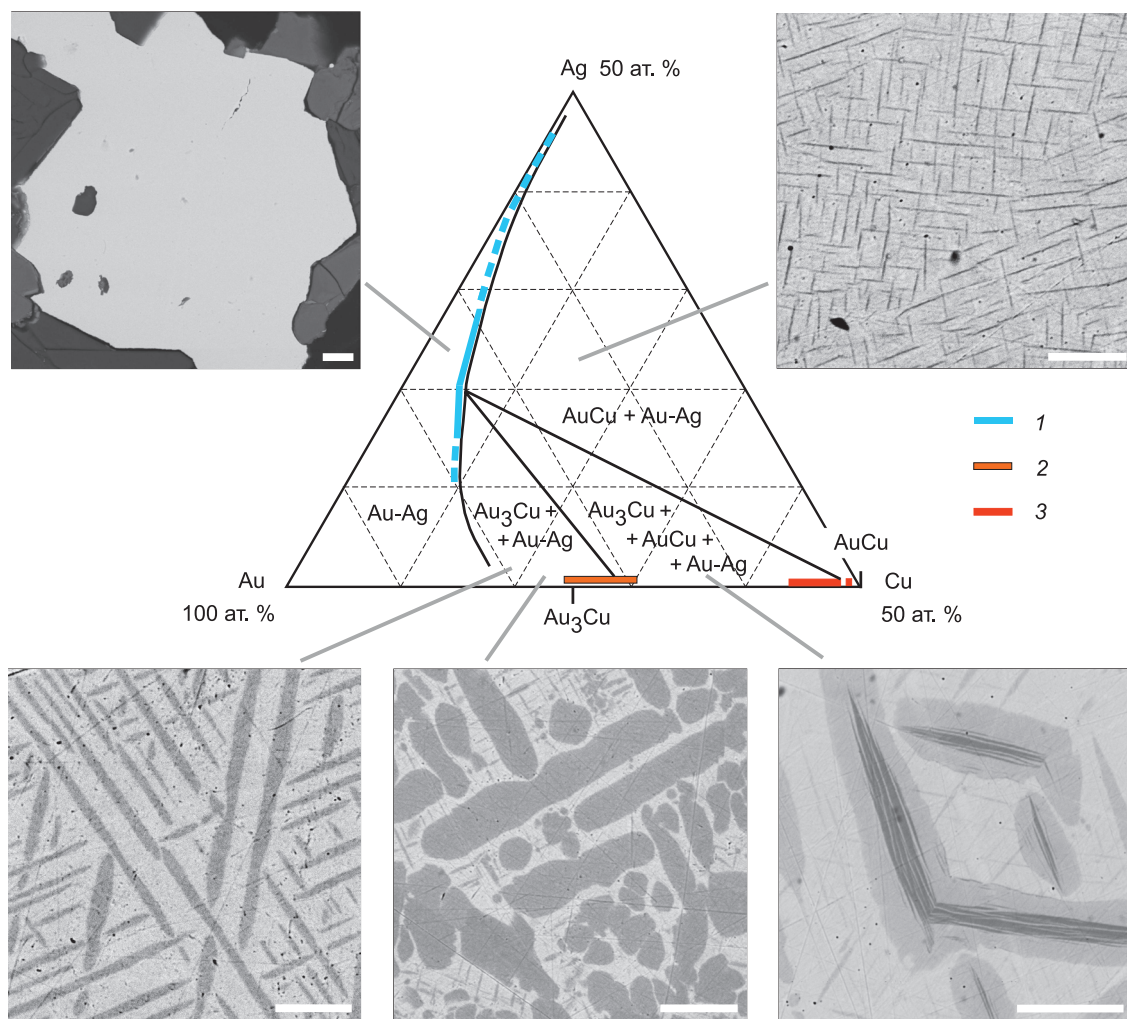


Рис. 14. Фазовая диаграмма Au—Ag—Cu в богатой Au области при низкой (около 100 °C) температуре.

Золото в зависимости от валового состава сохраняет первичное гомогенное строение или приобретает характерные структуры распада Au-Ag-Cu твердого раствора. Изображения в отраженных электронах, масштабная линейка 10 мкм. Состав фаз в структурах распада: 1 — Au-Ag — твердый раствор, 2 — фаза Au_3Cu , 3 — фаза AuCu; прерывистые линии состава фаз по данным работы [Knight, Leitch, 2001].

Золото со значительным преобладанием Cu над Ag в Au-Ag-Cu твердом растворе, к которому на месторождении Чудное относится золото с содержанием Cu около 25 ат. %, можно рассматривать как бинарную систему Au—Cu. Соединение Au_3Cu при таком составе сплава образуется из неупорядоченного твердого раствора при понижении температуры примерно до 220 °C [Дриц и др., 1979; Okamoto et al., 1987]. Оценка нижнего предела температуры формирования самородного золота может быть распространена на первичное золото любого состава в риолитах, поскольку характер его выделений и минеральные парагенезисы являются однотипными для всего месторождения. Кроме того, несмотря на то, что минеральные ассоциации золота в риолитах и андезитах резко отличаются, но их объединяет Au-Pd характер минерализации, что позволяет предполагать ее образование в ходе единого процесса.

Распад Au-Ag-Cu твердого раствора, начавшийся при 220 °C, продолжался при понижении температуры. Температура отжига, при которой окончательно была образована наблюдающаяся структура распада твердого раствора, может быть примерно определена по фазовой диаграмме Au—Cu [Федоров, Волков, 2016], построенной путем экстраполяции экспериментальных данных в область низких температур. Предельное содержание меди в фазе Au_3Cu , находящейся в равновесии с фазой AuCu, на месторождении Чудное составляет 29.6 ат. %, что соответствует температуре отжига (низкотемпературного равновесия) около 100 °C.

Обращают на себя внимание пространственные вариации химического и, как следствие этого, фазового состава самородного золота в пределах месторождения и отдельных рудных зон. Состав золота месторождения на диаграмме Au—Ag—Cu (см. рис. 3, а) отражается в виде непрерывного поля, но золоту каждой рудной зоны присущи свои особенности. В рудной зоне Славная состав золота относительно выдержан и характеризуется присутствием серебра, меди и палладия. В мощной толще руд центральной части зоны золото содержит в основном 3—4 мас. % меди, что вызывает двух- и редко трехфазный распад твердого раствора. Золото в нижней части рудной зоны, а также на северо-восточном и юго-западном ее флангах содержит меди значительно меньше, чем обусловлено его гомогенное строение. В составе золота рудной зоны Лидер также присутствуют серебро, медь и палладий. Для большей части рудной зоны характерно золото гомогенного строения с невысоким содержанием меди, но в ее северо-восточной части на значительной глубине распространено золото с очень высоким содержанием меди, имеющего вследствие этого двух- и трехфазное строение. Для рудной зоны Людная характерно серебристое гомогенное золото с крайне низкими содержаниями меди. Подобное золото встречается также в юго-западном окончании рудной зоны Лидер. Рассматривая месторождение в целом, можно отметить, что устойчивых пространственных закономерностей в изменении состава золота не установлено, но серебристое золото с низкими содержаниями меди определенно тяготеет к периферии месторождения.

Изменчивость состава самородного золота проявляется не только в различиях между рудными зонами, но и в дискретном характере изменения состава золота в рудных зонах, что согласуется с их прожилковым строением. Каждая из рудных зон состоит из ряда субпараллельных рудных тел, объединяющих множество золотиносных фукситовых прожилков. Вариации состава первичного самородного золота вызываются, вероятно, как неоднородностью состава рудоносного раствора, так и процессами его взаимодействия с окружающей породой.

Образование вторичного золота связано с воздействием эпигенетических растворов на первичное самородное золото, в результате которого происходил вынос серебра и меди при относительно инертном поведении золота и палладия. Согласно экспериментальным данным, в гомогенных сплавах Ag—Au и Cu—Au наблюдается анодное селективное растворение серебра и меди, золото в большинстве сред остается нерастворимым [Маршаков и др., 1988]. В золоте, испытывавшем распад твердого раствора, наблюдается избирательное замещение пластинок и обособлений Cu—Au состава, заключенных в Ag—Au матрице, что обусловлено, видимо, более высокой разностью электродных потенциалов в паре Cu—Au по сравнению с Ag—Au. Определенную роль могут играть также химические процессы между Cu—Au и Ag—Au фазами, составляющими гальваническую пару.

Следует отметить значительное сходство в характере развития и составе вторичного золота с высокопробными каймами на самородном золоте, возникающими в условиях гипергенеза в зоне окисления золоторудных месторождений и россыпях [Мурзин, Малюгин, 1987]. Рядом авторов при изучении месторождения Чудное с поверхности предполагается гипергенное происхождение высокопробного золота [Тарбаев и др., 1996; Palyanova et al., 2021]. Нами установлено, что вторичное золото встречается в рудах на любой глубине от поверхности, что позволяет связывать его образование с низкотемпературными растворами поздних стадий минералообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самородное золото месторождения Чудное характеризуется значительными вариациями состава и строения. Содержание Au заключено в интервале от 65.8 до 92.7 мас. % (51.5—85.7 ат. %), Ag — от 0.4 до 33.8 мас. % (0.6—47.7 ат. %), почти всегда присутствует Cu — до 12.7 мас. % (30.6 ат. %) и Pd (до 2.9 мас. %), отмечается Hg.

Золото локализовано преимущественно в фукситовых прожилках, выполняющих многочисленные трещины в риолитах, обычно согласные региональной сланцеватости пород и простирающие крупные разрывные нарушения. Формирование золото-фукситовых прожилков связано с гидротермальными процессами, проявившимися, вероятнее всего, в послеордовикское время. Ассоциация хрома, палладия и золота свидетельствует о едином глубинном источнике этих элементов, в качестве которого наиболее вероятны производные базит-гипербазитового магматизма. Образование самородного золота и сопутствующих минералов происходило в условиях низкой активности сульфид-иона и повышенной фугитивности кислорода, чем обусловлено отсутствие в рудах сульфидных минералов. Эти специфические условия создавали возможность для вхождения меди в самородное золото.

Самородное золото формировалось в виде гомогенного Au—Ag—Cu твердого раствора при температуре выше 220 °С. При понижении температуры в зависимости от исходного состава твердый раствор остается гомогенным или при содержании Cu, превышающем 1.1—2.5 мас. %, распадается на две или три фазы. Основное влияние на характер распада Au—Ag—Cu твердого раствора и состав образовавшихся фаз оказывает присутствие меди. Характерны пластинчато-решетчатые и таблитчатые структуры рас-

пада (иногда 2-3-кратного) твердого раствора, формирование которых завершилось при температуре около 100 °С. Матрица в структурах распада имеет Ag-Au состав, пластинки или таблички соответствуют фазам Au_3Cu и AuCu . Процесс распада твердого раствора сопровождался перекристаллизацией золота с образованием зернистой структуры.

В каждой из рудных зон состав золота варьирует, при этом золоту каждой из них присущи свои особенности. Для золота главной рудной зоны (Славная) наиболее типично умеренно медистое золото с двухфазной структурой распада, в зоне Людная распространено серебристое золото гомогенного строения с крайне низкими содержаниями меди. Наибольшим разнообразием характеризуется золото рудной зоны Лидер, причем только в ней встречается золото с содержанием меди более 6 мас. %.

Установлены изменения состава золота по простиранию, мощности и падению в отдельных рудных зонах, не имеющие при этом устойчивых закономерностей для всего месторождения. Показано, что изменчивость состава золота в рудных зонах носит дискретный характер, что согласуется с их прожилковым строением. Общие черты строения и минерального состава руд позволяют считать их образование связанным с единым процессом рудообразования, но каждая серия золотоносных прожилков формировалась в некоторой степени обособленно.

Первичное самородное золото как гомогенного строения, так и претерпевшее распад твердого раствора и частичную перекристаллизацию, подвергалось эпигенетическому изменению, в результате которого происходило его замещение высокопробным золотом пористого строения. В этом процессе, имеющем электрохимическую природу, из первичного золота выносились Cu и Ag.

Исследования выполнены согласно госзаданию ИГ ФИЦ Коми НЦ Уро РАН при частичной поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00393А.

ЛИТЕРАТУРА

Аникина Е.В., Алексеев А.В. Минералого-геохимическая характеристика золото-палладиевого оруденения в Волковском габбро-диоритовом массиве (Платиноносный пояс Урала) // Литосфера, 2010, № 5, с. 75—100.

Билибина Т.В., Мельников Е.К., Савицкий А.В. О новом типе месторождений комплексных руд в Южной Карелии // Геология рудных месторождений, 1991, т. 33, № 6, с. 3—14.

Борисов А.В. Геолого-генетические особенности Au-Pd-REE рудопроявлений хребта Малдынырд (Приполярный Урал): Автореф. ... дис. к. г.-м. н. М., МГУ, 2005, 27 с.

Галанкина О.Л. Особенности минералогии палладий-золотых проявлений Приполярного Урала: Автореф. ... дис. к. г.-м. н. СПб, СПбГУ, 2001, 22 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 200 000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-41-XXV. Объяснительная записка. М., МФ ВСЕГЕИ, 2013, 252 с.

Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Гузей Л.С. Двойные и многокомпонентные сплавы на основе меди. М., Наука, 1979, 248 с.

Ефанова Л.И., Юдович Я.Э. Бонанцевые руды золота на месторождении Нестеровское // Геохимия древних толщ Севера Урала. Сыктывкар, Геопринт, 2002, с. 285—292.

Кузнецов С.К., Андреев В.Л. Возраст золото-фукситовой минерализации в риолитах хребта Малдынырд // Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов. Материалы Всероссийской конференции. Сыктывкар, 1998, с. 18—19.

Калустов С.В., Ефанова Л.И. Золоторудное месторождение Чудное на этапе подготовки к промышленному освоению // Горный журнал, 2013, № 9, с. 42—44.

Кузнецов С.К., Онищенко С.А. Золотоносность локальных участков метасоматического изменения риолитов месторождения Чудное (Приполярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018, № 12, с. 39—45.

Кузнецов С.К., Тарбаев М.Б., Соболева А.А. Минералого-геохимические особенности золото-фукситовых прожилков в риолитах хребта Малдынырд // Сыктывкарский минералогический сборник № 28. Сыктывкар, 1999, с. 146—154.

Малюгин А.А., Червяковский С.Г., Сазонов В.Н. Новый россышеобразующий тип золотоносного оруденения // Докл. АН СССР, 1986, т. 288, № 3, с. 697—699.

Маршаков И.К., Введенский А.В., Кондрашин В.Ю., Боков Г.А. Анодное растворение и селективная коррозия сплавов. Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 1988, 205 с.

Моралев Г.В., Борисов А.В., Суренков С.В., Нагаева С.П., Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К., Онищенко С.А., Ефанова Л.И., Соболева А.А. Распределение и формы нахождения редкоземельных элементов на Au-Pd-REE рудопроявлениях Чудное и Нестеровское (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Геохимия, 2005а, № 11, с. 1175—1195.

Моралев Г.В., Борисов А.В., Суренков С.В., Тарбаев М.Б., Пономарчук В.А. Первые Ag/Ar датировки слюд Au-Pd-P3Э проявления Чудное (Приполярный Урал) // ДАН, 2005б, т. 400, № 2, с. 243—246.

Мурзин В.В., Малюгин А.А. Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск, УНЦ АН СССР, 1987, 96 с.

Озеров В.С. Метаморфизованные россыпи золота Приполярного Урала // Руды и металлы, 1996, № 4, с. 28—37.

Онищенко С.А., Кузнецов С.К. Распад твердого раствора в системе Au—Ag—Cu в богатой золотом области // Геохимия, 2022, т. 67 (7), с. 639—654.

Онищенко С.А., Онищенко Л.В., Ефанова Л.И., Артеева Т.А. Золоторудное месторождение Чудное на Приполярном Урале // Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России. Материалы XVI съезда Республики Коми. Т. III. Сыктывкар, ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014, с. 172—175.

Онищенко С.А., Кузнецов С.К. Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2019, № 6, с. 20—27.

Онищенко С.А., Кузнецов С.К., Тропников Е.М. Эпигенетические изменения медистого золота в структуре распада Au—Ag—Cu—Pd твердого раствора // ДАН, 2020, т. 492, № 2, с. 35—38.

Пальянова Г.А., Мурзин В.В., Журавкова Т.В., Варламов Д.А. Au-Cu-Ag минерализация рудингитов и нефритовидов Агардагского гипербазитового массива (Южная Тува, Россия) // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (3), с. 300—321.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург, УГГА, 2001, 622 с.

Спиридонов Э.М., Плетнев П.А. Месторождение медистого золота Золотая Гора (о «золото-рудингитовой» формации). М., Научный мир, 2002, 220 с.

Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. Ассоциации минералов палладия, платины и золота в рудах Норильского месторождения // Геология рудных месторождений, 2004, т. 46, № 2, с. 175—192.

Суренков С.В. Условия образования и источники рудного вещества Au-PGE-REE рудопоявлений Алькесвожской площади (Приполярный Урал): Автореф.... дис. к. г.-м. н. М., ИГЕМ РАН, 2003, 23 с.

Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н., Ниелсен Т.Ф.Д., Шебанов А.Д. Сплавы и интерметаллиды золота и меди в золото-палладиевых рудах Скаергардского массива (Гренландия) // Зап. РМО, 2014, ч. 143 (4), с. 1—23.

Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К., Моралев Г.В., Соболева А.А., Лапутина И.П. Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала (Россия) // Геология рудных месторождений, 1996, т. 38, № 1, с. 15—30.

Федоров П.П., Волков С.Н. Фазовая диаграмма системы Au—Cu // Журнал неорганической химии, 2016, т. 61, № 6, с. 809—812.

Шумилов И.Х., Осташенко Б.А. Минералого-технологические особенности Au-Pd-TR оруденения на Приполярном Урале. Сыктывкар, Геопринт, 2000, 104 с.

Cabral A.R., Lehmann B., Kwitko R., Cravo Costa C.H. The Serra Pelada Au—Pd—Pt deposit, Carajás mineral province, northern Brazil: reconnaissance mineralogy and chemistry of very-high-grade palladian gold mineralization // Econ. Geol., 2002, v. 97, p. 1127—1138.

El Ghorfi M., Oberthür T., Melcher F., Lüders V., El Boukhari A., Maacha L., Ziadi R., Baoutoul H. Gold—palladium mineralization at Bleïda Far West, Bou Azzer—El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco // Miner. Deposita, 2006, v. 41, p. 549—564.

Knight J., Leitch C.H.B. Phase relations in the system Au—Cu—Ag at low temperatures, based on natural assemblages // Can. Mineral., 2001, v. 39, p. 889—905.

Menez J., Botelho N.F. Ore characterization and textural relationships among gold, selenides, platinum-group minerals and uraninite at the granite-related Buraco do Ouro gold mine, Cavalcante, Central Brazil // Mineral. Mag., 2017, v. 81 (3), p. 463—475.

Mernagh T.P., Heinrich C.A., Leckie J.F., Carville D.P., Gilbert D.J., Valenta R.K., Wyborn L.A.I. Chemistry of low-temperature hydrothermal gold, platinum, palladium (uranium) mineralization at Coronation Hill, Northern Territory, Australia // Econ. Geol., 1994, v. 89, p. 1053—1073.

Nekrasov I.Ya., Lennikov A.M., Zalishchak B.L., Oktyabrsky R.A., Ivanov V.V., Sapin V.I., Tskavaev V.I. Compositional variations in platinum-group minerals and gold, Konder alkaline-ultrabasic massif, Aldan shield, Russia // Can. Mineral., 2005, v. 43, p. 637—654.

Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B. The Au—Cu (Gold—Copper) system // Bull. Alloy Phase Diagrams, 1987, v. 8 (5), p. 454—474.

Olivo G.R., Gauthier M., Bardoux M., Leao de Sa E., Fonseca J.T.F., Santana F.C. Palladium-bearing gold deposit hosted by Proterozoic Lake Superior-type iron-formation at the Caue iron mine, Itabira district, southern Sao Francisco craton, Brazil: geologic and structural controls // *Econ. Geol.*, 1995, v. 90, p. 118—134.

Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. Native gold in the Chudnoe Au-Pd-REE deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, minerals in intergrowth and genesis // *Minerals*, 2021, v. 11, p. 451.

Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // *Miner. Deposita*, 2015, v. 50 (4), p. 465—492.