

Особенности химического состава тонкого золота из пород Ишлинского грабена (западный склон Южного Урала)

Ковалев С. Г., Ковалев С. С.

ИГ УФИЦ РАН,
г. Уфа
kovalev@ufaras.ru

Аннотация

Объектом исследования явились терригенные породы Ишлинского грабена (западный склон Южного Урала), представленные серицит-кварцевыми алевролитами, алевросланцами и углеродсодержащими сланцами, в которых развиты кварц-кальцитовые прожилки с тонким золотом. Au образует изометрично-неправильные выделения размером до 5 мкм, рассеянные в кварцевой матрице. Проведенный анализ показал, что химический состав медистого Au из кварц-кальцитового прожилка отличается от описанных на различных объектах западного склона Южного Урала (Толпаровского рудопоявления и метаморфизованных габброидов курманайского комплекса). Наблюдаемая для этих объектов общая тенденция, направленная на уменьшение количества меди и увеличение количества золота при небольших вариациях содержания серебра, не является взаимосвязанной и генетически обусловленной. Состав палладистого Au кардинальным образом отличается от аналогов, описанных на уральских объектах. Наиболее близкие значения характерны для магматогенных объектов: палладистого золота из рудопоявления Марафон, Канада и отчасти палладистого золота норильских месторождений. Показано, что одним из возможных механизмов перераспределения и концентрации золота является формирование золотохлористоводородной кислоты с последующим восстановлением $[\text{AuCl}_4]^-$ до металлического Au в кислой среде по реакции с двухвалентным железом.

Ключевые слова:

западный склон Южного Урала, Ишлинский грабен, тонкое золото, медистое золото, палладиевое золото

Введение

Урал является регионом, в котором золотодобыча развивается уже несколько столетий. Существует огромное количество публикаций, рассматривающих разнообразные вопросы генезиса как золоторудных месторождений, так и характеризующих золотую минерализацию, присутствующую в структурно-вещественных комплексах раз-

Peculiarities in the chemical composition of fine gold from rocks of the Ishlya graben (western slope of the Southern Urals)

Kovalev S. G., Kovalev S. S.

Institute of Geology UFRS RAS,
Ufa
kovalev@ufaras.ru

Abstract

The study material is terrigenous rocks of the Ishlya graben (western slope of the Southern Urals) represented by sericite-quartz siltstones, siltshists and carbonaceous shales, which have quartz-calcite veinlets with fine gold. Au forms isometrically irregular precipitates up to 5 μm in size, dispersed in a quartz matrix. By the analytical results, the composition of copper Au from quartz-calcite veinlets differs from analogs described for various sites on the western slope of the Southern Urals (Tolparovo ore occurrence and metamorphosed gabbroids of the Kurmanai complex). These sites have been identified for a general trend, particularly the reducing amount of copper and the increasing amount of gold with small variations in silver content. This trend is not interrelated and genetically determined. The composition of palladium-bearing Au is fundamentally different from analogs described at the Ural sites. The closest values are characteristic of magmatic sites: palladium-bearing gold from the Marathon ore occurrence, Canada, and, to some extent, palladium-bearing gold from the Norilsk deposits. One possible mechanism for the redistribution and concentration of gold is the formation of chloroauric acid, followed by the reduction of $[\text{AuCl}_4]^-$ to metallic gold in an acidic environment *via* a reaction with Fe^{2+} .

Keywords:

western slope of the Southern Urals, Ishlya graben, fine gold, copper gold, palladium gold

личной генетической природы. Проблемы тонкого золота начали активно обсуждаться в литературе относительно недавно как с точки зрения его генезиса, так и при рассмотрении технологических вопросов процесса добычи металла [1–4].

В статье приведены материалы по особенностям химического состава тонкого золота, полученные в 2024–2025 гг. при детальном изучении пород Ишлинского грабена, расположенного на западном склоне Южного Урала.

Материалы и методы

Пробоподготовка включала резку образца алмазным диском ГОСТ 10110–87 (СТ СЭВ 5906–87). Металлическая связка алмазного порошка режущей кромки представлена сплавом на основе меди, содержащим олово и механолегированные гранулы, включающие алюминий и углерод. Ее состав (мас. %): Sn – 5,0–8,0; Al – 0,9–2,8; C – 0,4–0,8; Cu – 90,1–88,4. Следующий этап заключался в выравнивании образца методом грубой «обдирки» и шлифовке рабочей поверхности препарата абразивными порошками, представленными белым электрокорундом (Al_2O_3 –99 %, марки 22А, 23А, 24А и 25А) различной зернистости. После этого рабочую поверхность образца обрабатывали алмазными пастами на жировой основе с размером зерна по ГОСТу: 14/10; 7/5; 3/2; 1/0 мкм.

Составы минералов изучены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа). Съемку проводили при следующих параметрах: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда 4 нА, время накопления спектра в точке – 60 с в режиме «Point&ID», диаметр пучка – ~3 мкм. При анализе использовали встроенный комплект эталонов Oxford Instruments Standards, представленный природными и синтетическими соединениями. Графитовое напыление производили на установке Quorum 150g plus.

Геологическое строение Ишлинского грабена

Отложения Ишлинского грабена располагаются в зоне Юрюзано–Зюраткульского разлома (западный склон Южного Урала), образуя полосу субмеридионального простирания, прослеженную на расстоянии около 15 км. Породы изучали как в естественных обнажениях, так и по скважинам двух разрезов: Улуелгинского и Кудашмановского (рис. 1).

Терригенные отложения представлены серицит-кварцевыми алевролитами, алевросланцами и углеродсодержащими сланцами. Основным отличием углеродсодержащих сланцев от алевролитов и алевросланцев являются пелитовая размерность зерен кварца и присутствие углеродистого вещества, образующего послойно-полосовидные, шнуровидные и комковатые выделения. Содержание углерода в сланцах колеблется от 1,1 до 2,6 %. Анализ термограмм показал, что углерод характеризуется сложным фазовым составом, включающим асфальтиты, керит, оксикерит и скрытокристаллический графит [5, 6].

Магматические породы образуют вулcano-плутоническую ассоциацию, которая представлена интрузивными телами габбродолеритов и эффузивами основного состава с небольшим количеством пирокластического материала. Породы метаморфизованы и в крайней степени

изменения представляют собой карбонат-эпидот-альбит-кварц-хлоритовые и эпидот-альбит-кварц-амфиболовые сланцы, трассирующие тектонические нарушения внутри габбродолеритового тела. В верхней части разреза присутствуют жилы альбититов, состоящие из ксеноморфных зерен альбита, крупночешуйчатого мусковита, небольшого количества кварца и хлорита [там же].

Для всех пород разрезов характерна значительная дислоцированность, которая в сланцах выражается в смятии, гофрировании, микробудинаже, завальцовке кварцевых обломков с мозаичным, облачным погасанием и формировании текстур пластического течения. В породах широко развиты окварцевание и карбонатизация, которые выражаются в наличии кварцевых, кварц-карбонатных и карбонатных жил и прожилков различной формы и переменной мощности (рис. 2). Минеральный состав карбонатов разнообразен, установлены практически все их разновидности: кальцит, доломит, магнезит, сидерит и анкерит. Изучение последовательности формирования кварцевых жил позволяет выделить как минимум три этапа их генерации: первый, связанный с внедрением магматических пород (экзоконтактовый), второй – синтетонический, третий – посттектонический.

Физико-химические параметры метаморфизма реконструируются по составам метаморфогенных минералов. Наиболее высокотемпературным этапом является амфиболоизация магматических пород ($T=500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P\sim 3\text{--}5$ кбар), а процесс формирования светлых слюд в терригенных породах реализовывался при $P\sim 2\text{--}10$ кбар, $T=390\text{--}490\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]. Состав флюидной фазы определен методом термодинамики флюидных включений в кварце из жильных тел, приуроченных к углеродсодержащим сланцам. В результате изучения установлено присутствие первичных и вторичных двухфазных (жидкость+газ) включений с различными температурами гомогенизации ($180\text{--}408\text{ }^{\circ}\text{C}$), высокая соленость (13,4–16,3 экв. NaCl) с одинаковым составом солей, представленных $CaCl_2+NaCl$. Кроме того, в двух образцах установлено присутствие метана. Во вторичных включениях температура гомогенизации гораздо ниже ($121\text{--}248\text{ }^{\circ}\text{C}$), а состав солей соответствует $FeCl_2$, т. е. при метаморфизме химический состав флюида изменялся от $CaCl_2+NaCl$ до $FeCl_2$ [6].

Возраст отложений машакской свиты, к которой относятся породы Ишлинского грабена, соответствует среднему рифею ($1380,3\pm 0,4$ млн лет) [7], а возраст метаморфизма, определенный по содержанию радиогенного свинца в уранинитах из углеродсодержащих сланцев, – около 600 млн лет [5]. В этот временной этап западный склон Южного Урала развивался в режиме сжатия, обусловленного вендской коллизией [8] с формированием Белорецкого метаморфического (с эклогитами) комплекса [9], в «обрамлении» которого располагаются отложения Ишлинского грабена.

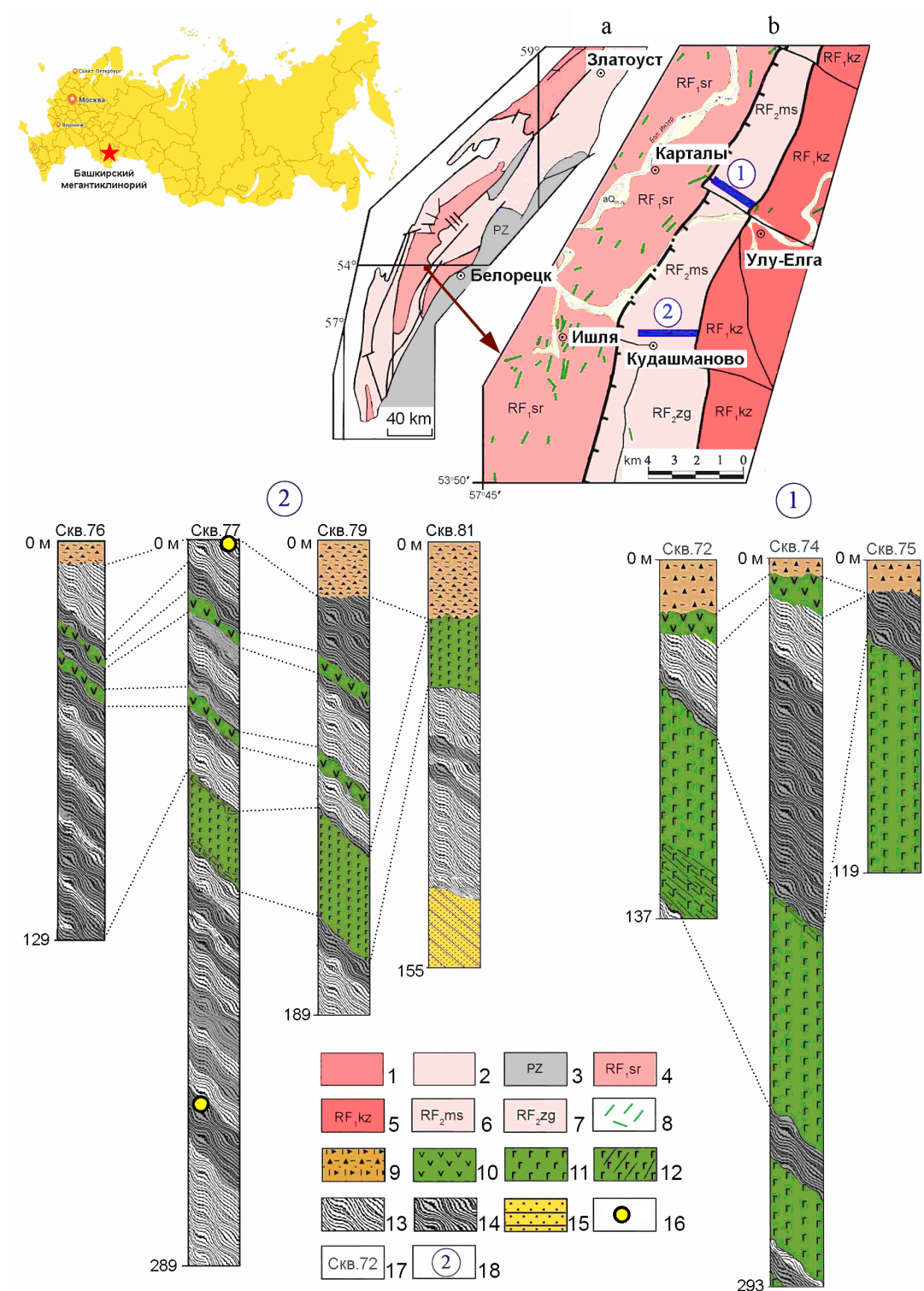


Рисунок 1. Геологическая схема западного склона Южного Урала (а), Ишлинского грабена (b) и его разрезы (1, 2).

Условные обозначения. 1–7 – нерасчлененные отложения (1 – нижнего рифея; 2 – среднего рифея; 3 – палеозоя; 4 – суранской свиты нижнего рифея; 5 – кызылташской свиты нижнего рифея; 6 – машакской свиты среднего рифея; 7 – зигальгинской свиты среднего рифея); 8 – дайки габбро-дolerитов; 9 – кора выветривания, осыпи; 10 – эпидот-кварц-хлоритовые сланцы по эффузивам и пирокластике; 11 – магматические породы основного состава; 12 – зоны рассланцевания; 13 – серицит-кварцевые алевролиты и алевросланцы; 14 – углеродсодержащие сланцы; 15 – кварцитопесчаники; 16 – места находок самородного золота; 17 – номера скважин; 18 – номера разрезов (1 – Улуелгинский; 2 – Кудашмановский).

Figure 1. Geological sketch-map of the western slope of the Southern Urals (a), Ishlya graben (b) and its cross-sections (1, 2).

Keys. 1–7 – undifferentiated deposits (1 – Lower Riphean; 2 – Middle Riphean; 3 – Paleozoic; 4 – Suran suite of the Lower Riphean; 5 – Kyzyltash suite of the Lower Riphean; 6 – Mashak suite of the Middle Riphean; 7 – Zigalga suite of the Middle Riphean); 8 – gabbro-dolerite dikes; 9 – weathering crust, scree; 10 – epidote-quartz-chlorite schists after effusives and pyroclastics; 11 – igneous rocks of basic composition; 12 – shear zones; 13 – sericite-quartz siltstones and silt-schists; 14 – carbonaceous shales; 15 – quartzite sandstones; 16 – locations of native gold finds; 17 – borehole numbers; 18 – section numbers (1 – Uluelga; 2 – Kudashmanovo).

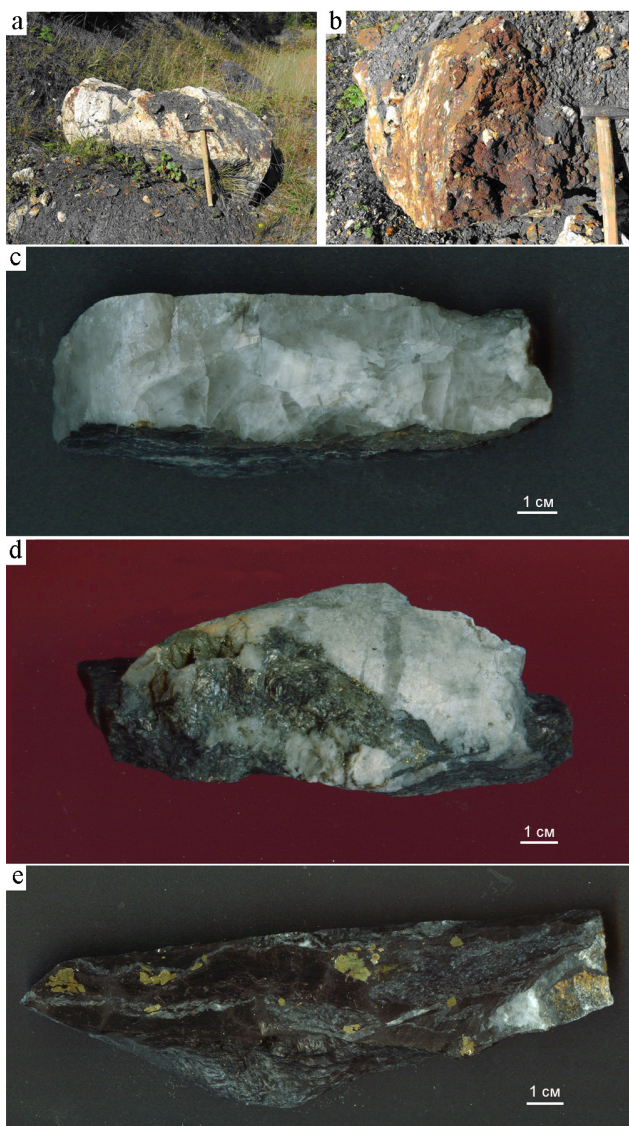


Рисунок 2. Кварцевая (а, б) и кварц-карбонатная (с-е) минерализации в породах Ишлинского грабена.

Figure 2. Quartz (a, b) and quartz-carbonate (c-e) mineralisation in the rocks of the Ishlya graben.

Результаты и их обсуждение

Ранее проведенными работами самородное золото было обнаружено в пробе-протолочке из будинированной кварцевой жилы, залегающей в углеродсодержащих сланцах, сложенной серовато-белым (голубовато-серым) полупрозрачным кварцем. Золотины имеют сложную форму (рис. 3 а-с) и различаются по окраске – с красноватым оттенком и соломенно-желтые. Золото высокопробное, в его химическом составе была обнаружена медь (от 0,21 до 0,41 вес. %), а содержание серебра варьирует в пределах 4,58–6,50 вес. % [5].

Тонкое золото (размером до 5 мкм) обнаружено в кварц-кальцитовом прожилке в виде изометрично-неправильных выделений, рассеянных в кварцевой матрице (рис. 3 d-i). Прожилок залегает в углеродсодержащих сланцах (скв. 77, глубина – 227 м, см. рис. 1), занимая секущее положение по отношению к слоистости сланцев. Его мощность варьирует от 2–3 до 5–6 см в раздувах. По

химическому составу обнаруженное Au в значительной степени отличается от самородного золота, описанного ранее в приповерхностном жильном кварце [5] (таблица). Кроме того, отличительной особенностью золота является присутствие во всех выделениях хлора в количестве от 0,57 до 3,85 мас. % (таблица, рис. 4).

Здесь же необходимо подчеркнуть, что палладистое золото впервые обнаружено на западном склоне Южного Урала в кварц-кальцитовом прожилке из метаморфизованных терригенных пород. Особенности химического состава характеризующихся золотин свидетельствуют, что описываемые интерметаллиды являются результатом эволюции систем Au-Ag-Cu и Au-Ag-Cu-Pd.

Кроме самородного золота в кварц-кальцитовом прожилке обнаружены пирит, монацит, ксенотим, бастнезит, мусковит и катранит – $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_2$ (рис. 5).

Как уже отмечалось выше, для тонкого золота из кварц-кальцитового прожилка Ишлинского грабена характерно наличие двух разновидностей – медистой и палладистой. Анализ диаграммы Au-Ag-Cu (рис. 6) показывает, что химический состав медистого золота из объектов западного склона Южного Урала: Толпаровского рудопроявления в доломит-кальцитовых жилах, описанное в данной работе и обнаруженное в метаморфизованных габброидах курманайского комплекса, в значительной степени отличается друг от друга. Наблюдаемая для этих объектов общая тенденция, направленная на уменьшение количества меди и увеличение количества золота при небольших вариациях содержаний серебра, не является взаимосвязанной и генетически обусловленной. Закономерность, установленная С. А. Онищенко и С. К. Кузнецовым [10] о том, что фаза Au_2Cu образуется в результате упорядочивания твердого раствора Au-Cu при температуре 240 °С, в нашем случае не реализуется. В целом, за некое реперное значение эволюции системы Au-Ag-Cu для рассматриваемых объектов можно принять результаты взаимодиффузии на контактах самородных Au и Cu в низкотемпературных условиях зоны гипергенеза Аннинского месторождения [11] (рис. 6). В таком случае объекты западного склона Южного Урала, включая и медистое золото Ишлинского грабена, являются дискретными частями данной системы.

Химический состав палладистого золота из кварц-кальцитового прожилка Ишлинского грабена кардинальным образом отличается от аналогов, описанных на уральских объектах, в первую очередь по количеству палладия (рис. 6 б). Наиболее близкие значения характерны для магматогенных объектов: палладистого золота из рудопроявления Марафон, Канада [12] и отчасти палладистого золота норильских месторождений [13].

Несмотря на различия в химическом составе отдельных золотин из кварц-кальцитового прожилка Ишлинского грабена, их объединяет присутствие значимых содержаний хлора во всех разновидностях (таблица, рис. 4). Нам представляется, что эта особенность химического состава является определяющей при рассмотрении вопроса их генезиса. Один из возможных механизмов перераспределения и концентрации золота может быть представлен в следующем виде.

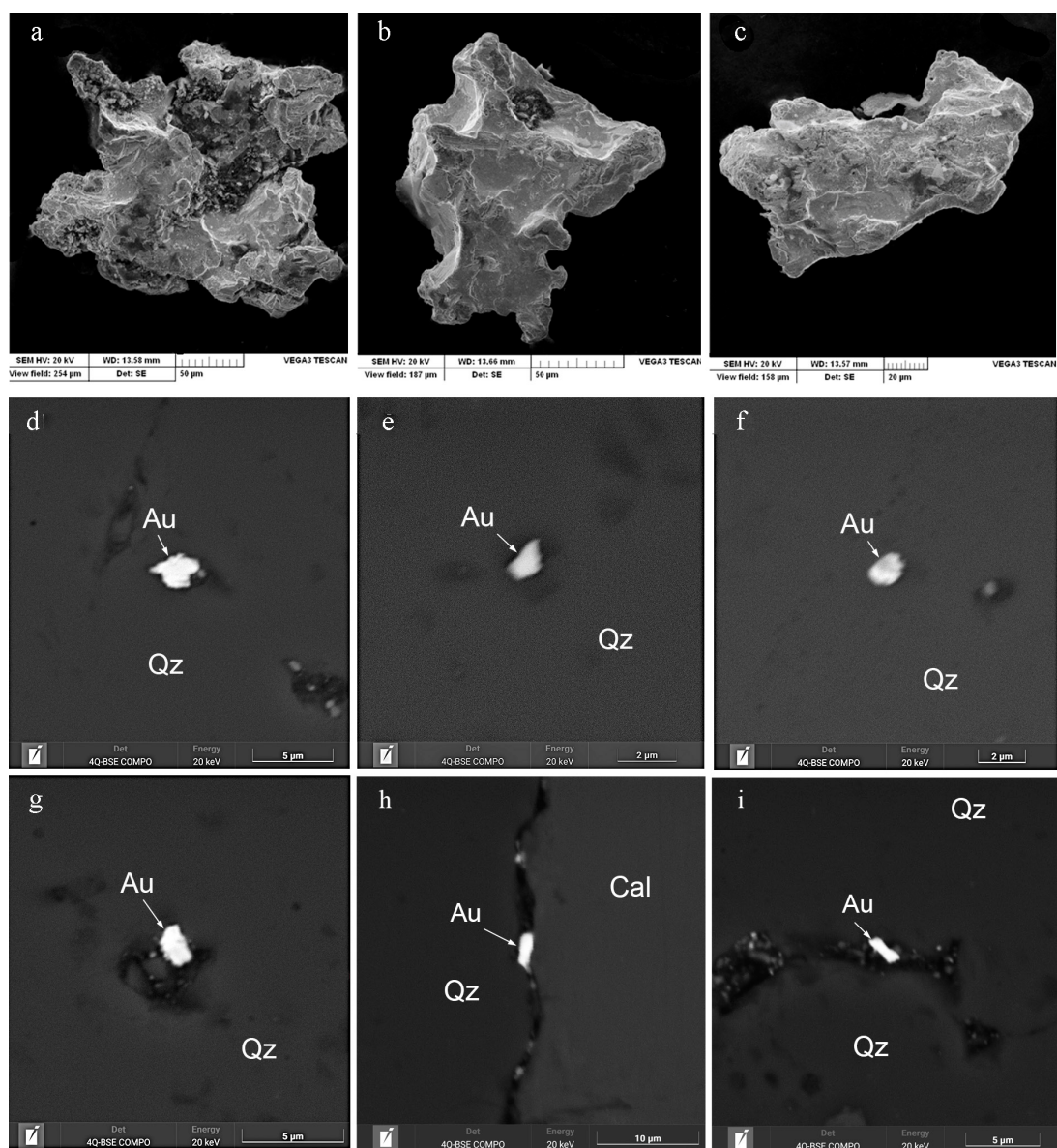
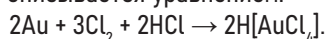
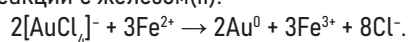


Рисунок 3. Самородное золото из приповерхностной кварцевой жилы (а-с) и кварц-кальцитового (d-i) прожилка.
Figure 3. Native gold from a near-surface quartz vein (a-c) and a quartz-calcite vein (d-i).

А. В. Пантелеевым с соавторами был предложен механизм гидрохлорирования при подземном выщелачивании золота из черносланцевых отложение Кумакского рудного поля [18], который описывается уравнением:



Комплексноеводорастворимоесоединение – золотохлористоводородная кислота, может являться подвижным соединением, ответственным за перераспределение Au. Здесь же необходимо отметить, что медь и палладий также способны формировать соединения с хлором – CuCl_4^{2-} и PdCl_4^{2-} соответственно, что объясняет наличие сложных соединений, охарактеризованных выше. Восстановление $[\text{AuCl}_4]^-$ до металлического золота в кислой среде возможно по реакции с железом(II):



Химический состав тонкого золота из кварц-карбонатного прожилка, мас. % Chemical composition of fine gold from quartz-carbonate vein, wt. %

№ п/п	Cl	Fe	Ni	Cu	Pd	Ag	Au	Сумма
1	1,04	–	0,38	3,74	13,17	24,98	56,68	100,00
2	1,25	0,19	0,62	4,38	13,67	25,53	54,36	100,00
3	0,57	0,90	–	24,69	–	9,29	64,55	100,00
4	0,85	–	–	28,20	–	10,42	60,53	100,00
5	1,22	–	–	26,36	–	8,11	64,31	100,00
6	1,81	0,80	–	30,52	–	11,78	55,09	100,00
7	1,37	–	–	25,32	–	9,68	63,62	100,00
8	3,85	0,60	–	30,36	–	8,62	56,57	100,00
9	1,49	–	–	23,77	–	12,21	62,53	100,00
10	1,39	–	–	27,43	–	9,22	61,96	100,00
11	–	–	–	28,39	–	9,11	62,50	100,00

Примечание. Прочерк – содержание элемента ниже предела обнаружения. Анализы пересчитаны на 100 %.

Note. Dashes indicate element content below the detection limit. The data are recalculated to 100 %.

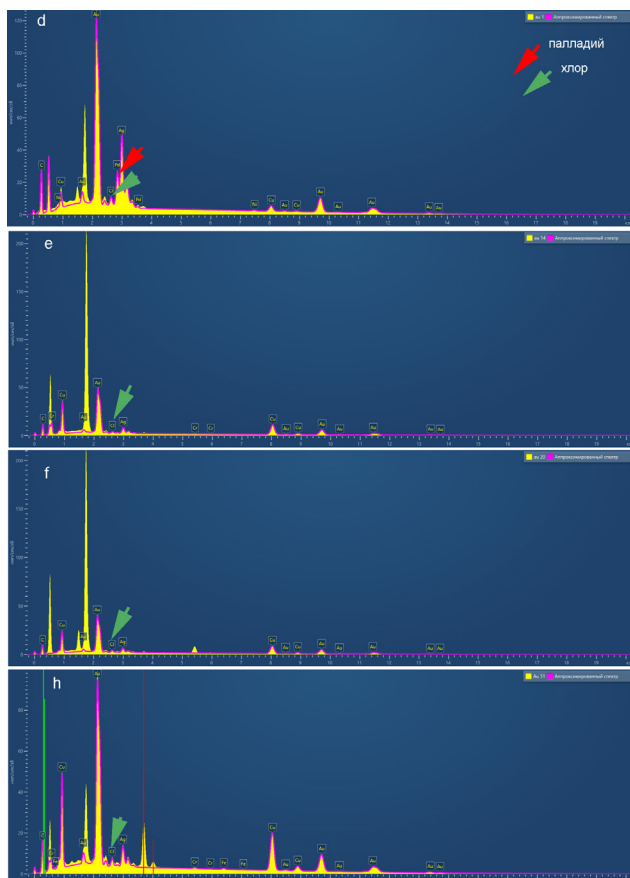


Рисунок 4. Спектры химического состава тонкого золота. Индексы соответствуют индексам микрофотографий на рис. 3.
Figure 4. Chemical composition spectra of thin gold. Indices correspond to the indices of the micrographs in Fig. 3.

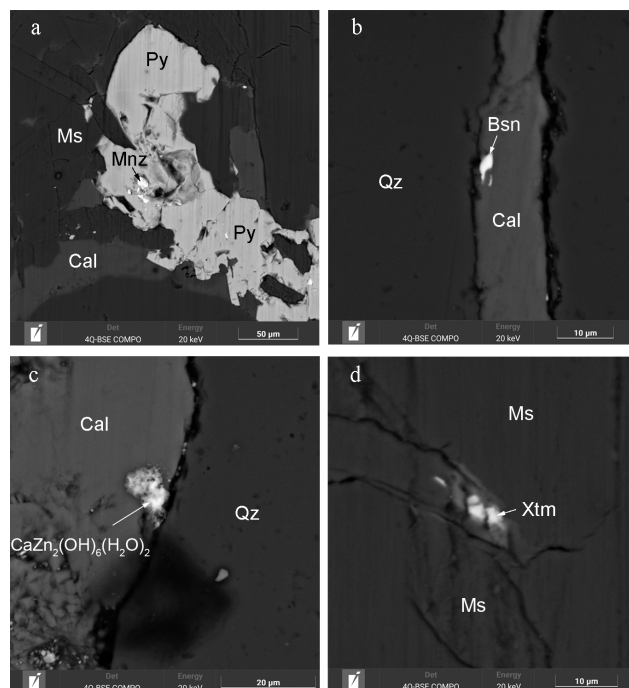


Рисунок 5. Микрофотографии минералов из кварц-кальцитового прожилка.
Условные обозначения. Cal – кальцит; Qz – кварц; Ms – мусковит; Py – пирит; Mnz – монацит-(Ce); Xtm – ксенотим-(Y); Bsn – бастнезит; $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_2$ – катранит.
Figure 5. Micrographs of minerals from a quartz-calcite vein.
Keys. Cal – calcite; Qz – quartz; Ms – muscovite; Py – pyrite; Mnz – monazite-(Ce); Xtm – xenotime-(Y); Bsn – bastnaesite; $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_2$ – kattranite.

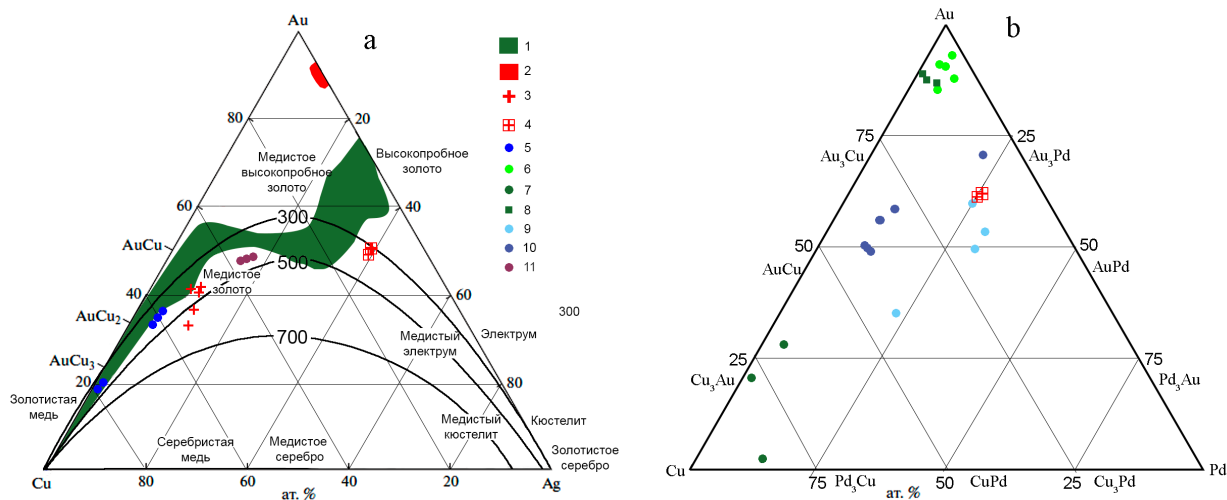


Рисунок 6. Составы минералов систем Au-Ag-Cu (a) и Au-Pd-Cu (b) из различных объектов мира: 1 – самородное золото Аннинского месторождения, Средий Урал (по: [11]); 2 – самородное золото из поверхностной кварцевой жилы, Ишлинский грабен (по: [6]); 3 – тонкое золото из кварц-кальцитового прожилка, Ишлинский грабен; 4 – палладистое золото из кварц-кальцитового прожилка, Ишлинский грабен; 5 – медистое золото Толпаровского рудопоявления, Южный Урал, (по: [12]); 6 – самородное золото рудопоявления Чудное (по: [13]); 7 – самородное золото рудопоявления Нестеровское (по: [там же]); 8 – самородное золото рудопоявления Озерное, Полярный Урал (по: [14]); 9 – палладистое золото рудопоявления Марафон, Канада (по: [15]); 10 – палладистое золото Норильск (по: [16]); 11 – медистое золото из метаморфизованных габброидов курманайского комплекса. Изотермы (по: [17]).
Figure 6. Compositions of minerals of the Au-Ag-Cu (a) and Au-Pd-Cu (b) systems from different sites of the world: 1 – native gold of the Anninsk deposit, Middle Urals (according to: [11]); 2 – native gold from a surface quartz vein, Ishlya graben (according to: [6]); 3 – fine gold from a quartz-calcite veinlet, Ishlya graben; 4 – palladium gold from a quartz-calcite veinlet, Ishlya graben; 5 – copper gold of the Tolparovo ore occurrence, Southern Urals (according to: [12]); 6 – native gold of the Chudnoye ore occurrence (according to: [13]); 7 – native gold of the Nesterovsk ore occurrence (according to: [see above]); 8 – native gold of the Ozeroye ore occurrence, Polar Urals (according to: [14]); 9 – palladium gold of the Marathon ore occurrence, Canada (according to: [15]); 10 – palladium gold of Norilsk (according to: [16]); 11 – copper gold from metamorphosed gabbroids of the Kurmanai complex. Isotherms (according to: [17]).

В целом химизм среды минералообразования и состав флюида – FeCl_2 (см. выше) не противоречат данной схеме. Кроме того, экспериментально установлено, что микроконцентрации золота при pH 2 активно сорбируются стеклом (около 30 %) и кварцем (около 60 %) [15].

Таким образом, можно констатировать, что рассмотренная упрощенная модель формирования тонкого золота в кварц-кальцитовых прожилках Ишлинского грабена не противоречит наблюдаемым фактам.

Выводы

1. В породах Ишлинского грабена обнаружено тонкое золото двух разновидностей – медистое и палладистое.

2. Проведенный анализ показал, что химический состав медистого Au из кварц-кальцитового прожилка отличается от описанных на различных объектах западного склона Южного Урала (Толпаровского рудопоявления и метаморфизованных габброидов курманайского комплекса). Наблюдаемая для этих объектов общая тенденция, направленная на уменьшение количества меди и увеличение количества золота при небольших вариациях содержания серебра, не является взаимосвязанной и генетически обусловленной. Состав палладистого Au кардинальным образом отличается от аналогов, описанных на уральских объектах. Наиболее близкие значения характерны для магматогенных объектов: палладистого золота из рудопоявления Марафон, Канада и отчасти палладистого золота норильских месторождений.

3. Один из возможных механизмов перераспределения и концентрации золота заключается в формировании золотохлористоводородной кислоты с последующим восстановлением $[\text{AuCl}_4]^-$ до металлического Au в кислой среде по реакции с двухвалентным железом.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. Конев, Р. И. Наноминералогия золота эпипермальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан) / Р. И. Конев. – СПб.: Дельта, 2006. – 218 с.
2. Марченко, Л. Г. Микро-наноминералогия золота и платиноидов в черных сланцах / Л. Г. Марченко. – Алматы: Интерпесс-Казахстан, 2010. – 146 с.
3. Кузнецова, И. В. О микро- и наноразмерном золоте в корях выветривания золотоносных территорий (на примере участка минерализации в бассейне р. Ада-миха, Приамурье) / И. В. Кузнецова, А. И. Дементенко // Георесурсы. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 191–197. – URL: <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.22> (дата обращения: 22.02.2026).
4. Сафронов, П. П. Нанозолото и пленочно-глобулярные наноструктуры в образцах самородного золота месторождения Пионер (Приамурье) / П. П. Сафронов, Н. В. Моисеенко, И. В. Кузнецова // Георесурсы. – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 162–177. – URL: <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.9> (дата обращения: 13.03.2026).
5. Геология, минералогия и металлогеническая специализация углеродсодержащих толщ Улуелгинско-Кудашмановской зоны (западный склон Южного Урала) / С. Г. Ковалев, И. В. Высоцкий, С. В. Мичурин, С. С. Ковалев // Литосфера. – 2013. – № 3. – С. 67–88.
6. Минералогия черносланцевых отложений Улуелгинско-Кудашмановской зоны (Башкирский мегантиклинорий) / С. С. Ковалев, А. А. Шарипова, С. Г. Ковалев, С. В. Мичурин // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2016. – Т. 21, № 2 (82). – С. 53–64.
7. Пучков, В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении) / В. Н. Пучков. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2010. – 280 с.
8. Первые данные о количественной оценке параметров вендского метаморфизма восточной части Башкирского мегантиклинория / С. Г. Ковалев, В. Н. Пучков, С. Г. Ковалев, С. И. Высоцкий // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 483, № 3. – С. 301–305.
9. Алексеев, А. А. Белорецкий метаморфический комплекс / А. А. Алексеев, С. Г. Ковалев, Е. А. Тимофеева. – Уфа: ИГ УНЦ РАН, ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2009. – 208 с.
10. Онищенко, С. А. Распад твердого раствора в системе Au–Ag–Cu в богатой золотом области / С. А. Онищенко, С. К. Кузнецов // Геохимия. – 2022. – Т. 67, № 7. – С. 639–654.
11. Мурзин, В. В. Диффузионные процессы на контактах самородных золота и меди в зоне окисления Аннинского месторождения на Среднем Урале / В. В. Мурзин, Д. А. Варламов // Записки Российского минералогического общества. – 2022. – Ч. CLI, № 6. – С. 18–28.
12. Michurin, S. V. Cu and Au mineralization of the Tolparovo ore occurrence: Evidence for the formation of red-bed copper occurrences in Neoproterozoic deposits of the Southern Urals / S. V. Michurin, G. M. Kazbulatova // Minerals. – 2024. – Vol. 14, № 2. – P. 148. – <https://doi.org/10.3390/min14020148>.
13. Борисов, А. В. Геолого-генетические особенности Au–Pd–REE рудопоявлений хр. Малдынырд: Приполярный Урал: автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.11 / А. В. Борисов. – М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2005. – 27 с.
14. The gold-palladium Ozerne occurrence (Polar Urals, Russia): Mineralogy, conditions of formation, sources of ore matter and fluid / V. Murzin, G. Palyanova, T. Mayorova, T. Beliaeva // Minerals. – 2022. – Vol. 12, № 6. – P. 765. – <https://doi.org/10.3390/min12060765>.
15. Ore mineralogy of Cu–PGE mineralized gabbros, Coldwell Alkaline Complex, Midcontinent rift: Supporting databases, scanning electron microscope and mineral chemistry / D. E. Ames, I. M. Kjarsgaard, D. J. Good, A. M. McDonald // Geological Survey of Canada, Bulletin. – 2016. – Volume Open File 8006. – <https://doi.org/10.4095/299054>.
16. Sluzhenikin, S. F. Gold and silver in PGE–Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia / S. F. Sluzhenikin, A. V. Mokhov // Mineralium Deposita. – 2015. – Vol. 50,

№ 4. – P. 465–492. – <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>.

17. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ. / М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей, Е. В. Лысова [и др.]. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
18. Черные сланцы Кумакского рудного поля (геология, петрохимия, рудоносность) / А. В. Пантелеев, А. В. Сначев, П. В. Панкратьев, А. М. Тюрин [и др.]. – Оренбург: ООО «ТИПОГРАФИЯ "АГЕНТСТВО ПРЕССА"», 2023. – 112 с.
19. Бусев, А. И. Аналитическая химия золота / А. И. Бусев, В. М. Иванов. – М.: Наука, 1973. – 263 с.

References

1. Konev, R. I. Nanomineralogiya zolota epitermalnykh mestorozhdenii Chatkalo-Kuraminskogo regiona (Uzbekistan) [Nanomineralogy of gold from epithermal deposits in the Chatkal-Kurama region (Uzbekistan)] / R. I. Konev. – Saint-Petersburg: Delta, 2006. – 218 p.
2. Marchenko, L. G. Mikro-nanomineralogiya zolota i platinoidov v chernykh slantsakh [Micro-nanomineralogy of gold and platinum group metals in black shales] / L. G. Marchenko. – Almaty: Interpress-Kazakhstan, 2010. – 146 p.
3. Kuznetsova, I. V. O mikro- i nanorazmernom zolote v korakh vyvetrivaniya zolotonosnykh territorii (na primere uchastka mineralizatsii v basseine r. Adamikha, Priamurye) [Micro- and nanoscale gold in weathering crusts of gold-bearing territories (on the example of a mineralised area in the Adamikha River basin, Amur Region)] / I. V. Kuznetsova, A. I. Dementienko // Georesursy [Georesources]. – 2023. – Vol. 25, № 3. – P. 191–197. – <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.22>. (date of access: 22.02.2026).
4. Safronov, P. P. Nanozoloto i plenkochno-globulyarnye nanostruktury v obraztsakh samorodnogo zolota mestorozhdeniya Pioneer (Priamurye) [Nanogold and film-globular nanostructures in native gold samples from the Pioneer deposit (Amur Region)] / P. P. Safronov, N. V. Moiseenko, I. V. Kuznetsova // Georesursy [Georesources]. – 2025. – Vol. 27, № 1. – P. 162–177. – <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.9>. (date of access: 13.03.2026).
5. Geologiya, mineralogiya i metallogenicheskaya spetsializatsiya uglerodsoderzhashchikh tolshch Uluelginsko-Kudashmanovskoi zony (zapadnyi sklon Yuzhnogo Urala) [Geology, mineralogy, and metallogenic specialisation of carbonaceous strata of the Uluelgin-Kudashman zone (western slope of the Southern Urals)] / S. G. Kovalev, I. V. Vysotskii, S. V. Michurin, S. S. Kovalev // Litosfera [Lithosphere]. – 2013. – № 3. – P. 67–88.
6. Mineralogiya chernoslantsevykh otlozhenii Uluelginsko-Kudashmanovskoi zony (Bashkirskii megantiklinorii) [Mineralogy of black shale deposits of the Uluelga-Kudashman zone (Bashkir meganticlinorium)] / S. S. Kovalev, A. A. Sharipova, S. G. Kovalev, S. V. Michurin // Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan. – 2016. – Vol. 21, № 2 (82). – P. 53–64.
7. Puchkov, V. N. Geologiya Urala i Priuralya (aktualnye vo-prosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cis-Urals (current issues on stratigraphy, tectonics, geodynamics, and metallogeny)] / V. N. Puchkov. – Ufa: DizainPoligrafServis, 2010. – 280 p.
8. Pervye dannye o kolichestvennoi otsenke parametrov vendenskogo metamorfizma vostochnoi chasti Bashkirskogo megantiklinorii [First quantitative data on the parameters of Vendian metamorphism in the eastern part of the Bashkir Meganticlinorium] / S. G. Kovalev, V. N. Puchkov, S. G. Kovalev, S. I. Vysotskii // Doklady Akademii Nauk [Academy of Sciences Reports]. – 2018. – Vol. 483, № 3. – P. 301–305.
9. Alekseev, A. A. Beloretskii metamorficheskii kompleks [Beloretsk metamorphic complex] / A. A. Alekseev, S. G. Kovalev, E. A. Timofeeva. – Ufa: IG USC RAS, DizainPoligrafServis, 2009. – 208 p.
10. Onishchenko, S. A. Raspad tverdogo rastvora v sisteme Au–Ag–Cu v bogatoi zolotom oblasti [Solid solution decomposition in the Au–Ag–Cu system in a gold-rich region] / S. A. Onishchenko, S. K. Kuznetsov // Geokhimiya [Geochemistry]. – 2022. – Vol. 67, № 7. – P. 639–654.
11. Murzin, V. V. Diffuzionnye protsessy na kontaktakh samorodnykh zolota i medi v zone okisleniya Anninskogo mestorozhdeniya na Srednem Urale [Diffusion processes at contacts of native gold and copper in the oxidation zone of the Anninskoye deposit in the Middle Urals] / V. V. Murzin, D. A. Varlamov // Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the Russian Mineralogical Society]. – 2022. – Ch. CLI, № 6. – P. 18–28.
12. Michurin, S. V. Cu and Au mineralization of the Tolparovo ore occurrence: Evidence for the formation of red-bed copper occurrences in Neoproterozoic deposits of the Southern Urals / S. V. Michurin, G. M. Kazbulatova // Minerals. – 2024. – Vol. 14, № 2. – P. 148. – <https://doi.org/10.3390/min14020148>.
13. Borisov, A. V. Geologo-geneticheskie osobennosti Au–Pd–REE rudoproyavlenii khr. Maldynyrd: Pripolyarnyi Ural [Geological and genetic features of Au–Pd–REE ore occurrences in the Maldynyrd Range: Subpolar Urals]: extended abstract of Candidate's thesis (Geology and Mineralogy): 25.00.11 / A. V. Borisov. – Moscow: M. V. Lomonosov Moscow State University, 2005. – 27 p.
14. The gold-palladium Ozerne occurrence (Polar Urals, Russia): Mineralogy, conditions of formation, sources of ore matter and fluid / V. Murzin, G. Palyanova, T. Mayorova, T. Beliaeva // Minerals. – 2022. – Vol. 12, № 6. – P. 765. – <https://doi.org/10.3390/min12060765>.
15. Ore mineralogy of Cu–PGE mineralized gabbros, Coldwell Alkaline Complex, Midcontinent rift: Supporting databases, scanning electron microscope and mineral chemistry / D. E. Ames, I. M. Kjarsgaard, D. J. Good, A. M. McDonald // Geological Survey of Canada, Bulletin. – 2016. – Volume Open File 8006. – <https://doi.org/10.4095/299054>.
16. Sluzhenikin, S. F. Gold and silver in PGE–Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia / S. F. Sluzhenikin, A. V. Mokhov // Mineralium Deposita. – 2015. – Vol. 50, № 4. – P. 465–492. – <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>.

17. Dvoynye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi: spravochnik [Dual and multi-component copper-based systems: a guide] / M. E. Drits, N. R. Bochvar, L. S. Guzei [et al.]. – Moscow: Nauka, 1979. – 248 p.
18. Chernye slantsy Kumakskogo rudnogo polya (geologiya, petrokhiimiya, rudonosnost) [Black shales of the Kumak ore field (geology, petrochemistry, ore content)] / A. V. Panteleev, A. V. Snachev, P. V. Pankratyev [et al.]. – Orenburg: OOO "TIPOGRAFIYA "AGENTSTVO PRESSA", 2023. – 112 p.
19. Busev, A. I. Analiticheskaya khimiya zolota [Analytical chemistry of gold] / A. I. Busev, V. M. Ivanov. – Moscow: Nauka, 1973. – 263 p.

Благодарность (госзадание)

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № FMRS-2025-0015).

Acknowledgements (state task)

The research was carried out within the frames of the state task (state registration number FMRS-2025-0015).

Информация об авторах:

Ковалев Сергей Григорьевич – доктор геолого-минералогических наук Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Scopus ID: 7101939824; ORCID: 0000-0001-6753-7484, SPIN-код: 6375-0285 (450077, Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2; e-mail: kovalev@ufaras.ru).

Ковалев Сергей Сергеевич – кандидат геолого-минералогических наук Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук; ORCID: 0000-0003-1780-6580; SPIN-код: 9796-1303 (450077, Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2).

About the authors:

Sergey G. Kovalev – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Scopus ID: 7101939824; ORCID: 0000-0001-6753-7484, SPIN-code: 6375-0285 (16/2 Karl Marx st., Ufa, 450077, Russian Federation; e-mail: kovalev@ufaras.ru).

Sergey S. Kovalev – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy) Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences; ORCID: 0000-0003-1780-6580; SPIN-code: 9796-1303 (16/2 Karl Marx st., Ufa, 450077, Russian Federation).

Для цитирования:

Ковалев, С. Г. Особенности химического состава тонкого золота из пород Ишлинского грабена (западный склон Южного Урала) / С. Г. Ковалев, С. С. Ковалев // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2026. – № 4 (89). – С. 117–125.

For citation:

Kovalev, S. G. Osobennosti himicheskogo sostava tonkogo zolota iz porod Ishlinskogo grabena (zapadnyj sklon Yuzhnogo Urals) [Peculiarities in the chemical composition of fine gold from rocks of the Ishlya graben (western slope of the Southern Urals)] / S. G. Kovalev, S. S. Kovalev // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2026. – № 4 (89). – P. 117–125.

Дата поступления рукописи: 09.10.2025

Прошла рецензирование: 20.11.2025

Принято решение о публикации: 15.04.2026

Received: 09.10.2025

Reviewed: 20.11.2025

Accepted: 15.04.2026