

# ЭВОЛЮЦИЯ ЗОЛОТА В ЗОНЕ ОКИСЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОПТО (Республика Тува, Россия)

Калинин Ю. А., Кужугет Р. В., Хусаинова А. Ш., Гаськова О. Л., Бутанаев Ю. В.

## Аннотация

Месторождение Копто в Северо-Восточной Тuve относится к классу золоторудных объектов, своеобразие которых обусловлено совмещенностью в нём Au-Cu-скарнового типа оруденения и наложенного на него кварц-золото-сульфидного штокверкового. С поверхности всё это подверглось интенсивному окислению, сформировавшему зону вторичного золотого обогащения, содержащую своеобразный гипергенный парагенезис с халькогенидами Au и Ag и с новообразованным золотом. Глубина распространения окисленных руд от поверхности составляет 80-90 м. Содержание Au варьирует от долей г/т до 150 г/т (среднее – 30.8 г/т).

Методом компьютерного термодинамического моделирования показано, как трансформируется рудная золото-сульфидно-кварцевая ассоциация в окислительных условиях при снижении рН растворов – золото становится все более высокопробным, появляется и исчезает акантит, преобладает лимонит (рН 1.65, Eh 0.69 В). Найдены условия устойчивости пирита, гидроксидов железа и халькогенидов золота и серебра – петровскаита (AgAuS) и ютенбогаардита (Ag<sub>3</sub>AuS<sub>2</sub>). Для этого необходимы слабокислые растворы с рН 5-6 и значениями Eh близкими к нулевому, что обеспечивает устойчивость тиосульфатных и гидросульфидных комплексов благородных металлов. Главное отличие между растворами, равновесными с петровскаитом и ютенбогаардитом – это отношения Ag/Au, максимальные в первом случае и приблизительно одинаковые во втором.

Статья посвящена сравнительному анализу морфологических особенностей золота из первичных и окисленных руд золоторудного месторождения Копто с целью выявления комплекса признаков гипергенной природы золота и оценки масштабов его перераспределения.

## Ключевые слова:

Тува, месторождение Копто, золото, зона окисления, физико-химическая модель

**ЭВОЛЮЦИЯ ЗОЛОТА В ЗОНЕ ОКИСЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОПТО  
(Республика Тыва, Россия)**

**Ю.А. Калинин<sup>1</sup>, Р.В. Кужугет<sup>2</sup>, А.Ш. Хусаинова<sup>1</sup>, О.Л. Гаськова<sup>1</sup>, Ю.В. Бутанаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

<sup>2</sup> *Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а, Россия*

Месторождение Копто в Северо-Восточной Тыве относится к разряду золоторудных объектов, своеобразие которых обусловлено совмещенностью в нём Au-Cu-скарнового типа оруденения и наложенного на него кварц-золото-сульфидного штокверкового. С поверхности всё это подверглось интенсивному окислению, сформировавшему зону вторичного золотого обогащения, содержащую своеобразный гипергенный парагенезис с халькогенидами Au и Ag и с новообразованным золотом. Глубина распространения окисленных руд от поверхности составляет 80-90 м. Содержание Au варьирует от долей г/т до 150 г/т (среднее – 30.8 г/т).

Методом компьютерного термодинамического моделирования показано, как трансформируется рудная золото-сульфидно-кварцевая ассоциация в окислительных условиях при снижении рН растворов – золото становится все более высокопробным, появляется и исчезает акантит, преобладает лимонит (рН 1.65, Eh 0.69 В). Найдены условия устойчивости пирита, гидроксидов железа и халькогенидов золота и серебра – петровскаита (AgAuS) и ютенбогаардита (Ag<sub>3</sub>AuS<sub>2</sub>). Для этого необходимы слабокислые растворы с рН 5-6 и значениями Eh близкими к нулевому, что обеспечивает устойчивость тиосульфатных и гидросульфидных комплексов благородных металлов. Главное отличие между растворами, равновесными с петровскаитом и ютенбогаардитом – это отношения Ag/Au, максимальные в первом случае и приблизительно одинаковые во втором.

Статья посвящена сравнительному анализу морфологических особенностей золота из первичных и окисленных руд золоторудного месторождения Копто с целью выявления комплекса признаков гипергенной природы золота и оценки масштабов его перераспределения.

*Тыва, месторождение Копто, золото, зона окисления, физико-химическая модель*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Поведение золота в экзогенных условиях является актуальной проблемой геохимии золота. Накопленный фактический материал по золотоносным корам выветривания с каолинитовыми и каолинит-гидрослюдистыми профилями, а также значительный реферативный массив данных по различным климатическим и геоморфологическим зонам, включая латеритные коры выветривания тропического пояса Земли, позволяет говорить фактически о новом облике гипергенной геохимии золота в связи с достаточно высокой его мобильностью и способностью, изменяя минеральные и растворимые формы, концентрироваться на геохимических барьерах [Калинин и др., 2006].

Понимание того, что зоны окисления рудных месторождений представляют собой частный случай региональной коры выветривания, давно и прочно укоренилось среди отечественных исследователей [Альбов, 1960; Шахов, 1960; Петров, 1967; Росляков, 1981]. По способу концентрирования в окисленных рудах благородного металла, классик сибирской геологии М.А. Усов [1933] эти месторождения выделил в самостоятельную группу – вторичного обогащения рудных месторождений. Они нередко представляли главную промышленную ценность золотоносного участка. Объектами добычи служили окисленные руды, баритовые и кварцевые «сыпучки» зон вторичного золотого обогащения и выходы бурых железняков (железные шляпы) жильных собственно золоторудных и комплексных золотосодержащих месторождений. Зона окисления рудных месторождений является продуктом локального сернокислотного выветривания, но по характеру распределения металлов и минеральному составу – это фактически новое месторождение с совершенно иными характеристиками, делающими его более привлекательным для освоения, что и привело к их практически полной отработанности.

Месторождение Копто в Северо-Восточной Туве относится к разряду золоторудных объектов, своеобразие которых обусловлено совмещенностью в нём Au-Cu-скарнового типа оруденения и наложенного на него кварц-золото-сульфидного штокверкового. С поверхности всё это подверглось интенсивному окислению, сформировавшему зону вторичного золотого обогащения, содержащую своеобразный гипергенный парагенезис с новообразованным золотом.

Настоящее исследование посвящено сравнительному анализу морфологических особенностей золота из первичных и окисленных руд золоторудного месторождения Копто с целью выявления комплекса признаков гипергенной природы золота и оценки масштабов его перераспределения.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Копто, расположенное в пределах Тарданского рудного узла (ТРУ) в Северо-Восточной Туве, открыто в 1965 г. при проведении поисковых работ масштаба 1:10000 с применением площадной геохимической и геофизической съёмки.

ТРУ расположен в зоне Каахемского глубинного разлома и краевой части одноименного полихронного батолита, представленного Копто-Байсютским габбро-диорит-плагиогранитным массивом раннетаннуольского комплекса ордовика ( $O_1tn$ ). Возраст плагиогранитов Копто-Байсютского массива, определенный по биотиту Ar-Ar методом, составляет  $485.7 \pm 4.4$  млн лет [Гаськов, 2008], по цирконам U-Pb методом –  $479 \pm 2$  млн лет [Руднев и др., 2015].

Месторождения и рудопроявления золота ТРУ приурочены к зоне контакта Копто-Байсютского массива с вулканогенно-карбонатными породами туматтайгинской ( $R-C_1tt$ ) и тапсинской свит ( $C_1tp$ ), в зоне влияния Каахемского глубинного разлома. Их рудные тела представлены минерализованными зонами типа линейных штокверков [Кудрявцева, 1969; Коробейников и др., 1987, 2006; Кужугет и др., 2020].

Месторождения ТРУ в скарнах имеют гидротермальный генезис и сопряжены с метасоматитами лиственит-березитового ряда, развивающимися за счёт вулканитов, гранитоидов, сланцев, магнезиальных и известковых скарнов в брекчированных и тектонических зонах (рис. 1). В скарнах отмечена вкрапленность пирита, халькопирита, гнезда и линзы магнетита. Количество сульфидов от 3-5 до 10-15 %, в среднем – 5 %. Продуктивные минеральные ассоциации месторождений характеризуются Au-Bi-Te

ассоциациями, которые близки месторождениям золото-висмутового геохимического типа [Гамянин и др., 1998; Гамянин и др., 2003; Горячев, Гамянин, 2006]. По классификации зарубежных исследователей они отвечают классу месторождений, парагенетически связанных с интрузиями («intrusion related gold deposits») [Lang, Baker, 2001], т.е. плутоногенно-гидротермальным месторождениям золота [Спиридонов, 2010].

Скарновая залежь (850x150 м) имеет сложное внутреннее строение, обусловленное различной степенью контактово-метасоматических и гидротермальных изменений, а также интенсивным тектоническим воздействием (см. рис. 1). Простираение скарновой залежи северо-западное (аз. 330–340°), падение, предположительно, крутое на северо-восток. Скарны гидротермально изменены (в основном, лиственизированы) и содержат наложенную золото-сульфидно-кварцевую минерализацию штокверкового типа.

В скарновой зоне выявлено пять рудных тел протяжённостью 30–100 м и мощностью 1.0–11.0 м со средними содержаниями Au от 4.7 до 12.9 г/т (при бортовых содержаниях 0.1–2.0 г/т). Рудные тела вытянуты по простиранию зоны дробления. Наиболее крупное тело 1 прожилкового типа имеет длину по простиранию 68 м и среднюю мощность 11 м. Средние содержания Au составляют 11.3 г/т, Ag – 10-40 г/т, Cu – 1.6 мас. %.

При изучении взаимоотношений жил и прожилков установлено, что золотая минерализация на месторождении наложена на кварцевые диориты, гранатовые, пироксеновые и гранат-пироксеновые скарны и апоскарновые метасоматиты и парагенетически связана с дайками гранит-порфиров раннетаннуольского комплекса ( $O_{1tn}$ ) и сопряжёнными с ними метасоматитами березит-лиственитового ряда.

Минералообразование золото-сульфидно-кварцевого оруденения на месторождении Копто происходило в три стадии: 1) **дорудная березит-лиственитовая** (кварц, пирит, серицит, фуксит, кальцит, доломит, анкерит, альбит и т.д.); 2) **рудная золото-сульфидно-кварцевая** (кварц, пирротин, пирит, халькопирит, арсенопирит, галенит, золото, электрум, акантит-I, Zn-теннантит-тетраэдрит, барит, самородный висмут); 3) **пострудная карбонат-кварцевая** (кальцит, анкерит и кварц).

Образование минеральных агрегатов рудной золото-сульфидно-кварцевой стадии происходило при температурах 230–165 °С из растворов состава NaCl–H<sub>2</sub>O, NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O и MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O с концентрациями солей 4–8 мас. % NaCl-экв. [Кужугет и др., 2018].

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Штуфные пробы отобраны из коренных выходов и горных выработок (рудное тело 1). По количественным соотношениям минералов, текстурно-структурным особенностям руд и составу вмещающих пород выделяются 2 минеральных типа окисленных руд (рис. 2).

Золото извлекалось гравитационным методом с помощью лотка. При описании Au авторы опирались на классические труды [Петровская, 1973; Николаева и др., 2015]. Оптические исследования проведены на микроскопах Olympus VX41, ПОЛАМ П-213М и П-212М. Определение гранулометрического состава золота производилось ситовым методом.

Химический состав минералов и детальные минералогические исследования проводились с помощью растровых сканирующих электронных микроскопов Tescan Vega 3 sbu с ЭДС Oxford Instruments X-act (г. Миасс), Hitachi TM-1000 с ЭДС QUANTAX XFlash (г. Кызыл) и TESCAN MIRA 3LMU (Tescan, Чехия) с энергетическим спектрометром

«OXFORD» (Oxford Instruments, Великобритания) в режимах вторичных (SE) и обратно-рассеянных электронов (BSE) при различных увеличениях (при ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ) (г. Новосибирск).

Содержание Au и Ag в исходных пробах (навеска 5-10 г.) определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) с использованием спектрометра 3030 В (фирма Perkin-Elmer) и фотометра Solar М6 (фирма Thermo Electron) (аналитик Ильина В.Н.).

Физико-химическое моделирование проведено с помощью пакета программ «HCh» [Шваров, 2008], включающего базу термодинамических данных “UNITHERM” и данные из работ [Пальянова, 2008; Tagirov et al., 2006], при 25°C и общем давлении 1 атм. Расчеты проводились в 10-компонентной гетерогенной системе  $H_2O - Ca - Si - Cl - C - S - Fe - Ag - Au$ , включающей частицы в растворе, минералы и газы. Исходной информацией служили аналитические данные по минеральным ассоциациям золота и серебра в гипергенных обстановках, представленные на рис. 8. Окислительно-восстановительные условия задавались открытием системы по кислороду (вполне подвижный компонент), кислотность создавалась степенью окисления сульфидов при разных Eh, щелочность корректировалась присутствием в растворе карбонат- и бикарбонат-ионов в равновесии с  $CO_{2(газ)}$ , соответствующим атмосферному, т.е.  $10^{-3.5}$  атм.

### МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СОСТАВ РУДНОГО ЗОЛОТА

По данным предшественников [Лебедев и др., 1998] и собственным исследованиям, гранулометрический состав золота прожилковых руд в скарнах и апоскарновых метасоматитах на месторождении варьирует незначительно (рис. 3): количественно преобладают фракции <0.1 мм (58.37 %), 0.25-0.10 мм (35.58 %), и, в меньшей степени, 0.5-0.25 (4.99 %), 1.0-0.5 мм (1.06%).

Гипогенное золото (золото-I) образует мелкие и тонкие (0.006–5 мм) выделения комковидной, комковидно-ветвистой, трещинно-прожилковой, интерстициальной, дендритовидной, удлинённой, идиоморфной и смешанной формы (рис. 4-5).

Идиоморфные формы представлены кристаллами с комбинациями ромбододекаэдра с кубом и октаэдром, пентагондодэкаэдрического облика, которые образуют сростки между собой и зёрнами смешанной морфологии (рис. 4, д–е). Поверхность золотин-I шагреневая и мелко-ямчатая, ямчато-бугорчатая, иногда ровная. Для некоторых зёрен фиксируются ступени роста (см. рис. 4, а, ж, 5, б, г). Цвет зёрен варьирует от золотисто-жёлтого до серебристого с желтоватым оттенком.

В золото-сульфидно-кварцевых и слабоокисленных лимонит-кварцевых рудах гипогенное золото по содержанию Ag представлено (мас. %): 1) золотом: Au 69.87–96.61; Ag 3.04–29.38; 2) электрумом: Ag 30.63–47.56; Au 52.42–69.00; Cu 0.00–0.90. Гипогенное золото и электрум ассоциируют с акантитом-I (зёрна до 30 мкм), который отмечается в кварце и халькопирите. Химический состав акантита-I (мас. %): Ag 85.96–86.91; S 12.67–13.10, формула (расчёт на 3 атома) –  $Ag_{2.01-1.98}S_{1.02-0.99}$ .

Для зёрен гипогенного золота характерна зональность: содержание Au от центра зерна к периферии уменьшается на 3-13 мас. % при увеличении Ag. Основываясь на наблюдениях текстурно-структурных особенностей и возрастных взаимоотношений минеральных агрегатов в рудах, установлена следующая последовательность образования минеральных парагенезисов рудной стадии: кварц + пирротин + пирит → халькопирит + арсенопирит + галенит + весьма высокопробное золото (969–957‰) → высокопробное

золото (929–902‰) → среднепробное золото (899–817‰) → низкопробное золото (800–704‰) → электрум (695–524‰) + Zп-теннантит-тетраэдрит + барит + акантит-I ± самородный висмут.

В количественном отношении преобладает золото, в меньшей степени, электрум (18.8%). Средняя пробность гипогенного золота месторождения составляет 783‰ при вариациях от 524 до 969 ‰ [Кужугет и др., 2018].

### **ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ**

Окисленные руды представлены халькозином, ковеллином, лимонитом, гётитом, гидрогётитом, гематитом, малахитом, азуритом, хризоколлой, бисмутитом и другими минералами. Предполагается, что бисмутит  $\text{Bi}_2\text{O}_2(\text{CO}_3)$  является продуктом окисления сульфидов и теллуридов висмута, т.к. последние широко развиты в других месторождениях ТРУ. Глубина распространения окисленных руд от поверхности составляет 80-90 м. Содержание Au варьирует от долей г/т до 150 г/т (среднее – 30.8 г/т).

Гранулометрический анализ золота показал, что в окисленных рудах преобладает мелкое, тонкое золото класса <0.1 мм (84,95 %), значительно меньше содержание класса 0.25-0.1 мм (10.41 %), доля остальных классов незначительна (для класса 0.5-0.25мм (4.52 %) и >0.5 мм (0.12 %)) (см. рис. 3).

В окисленных рудах отмечается как остаточное (гипогенное) (см. рис. 4, 5), так и новообразованное гипергенное золото. Последнее представлено как кристаллами и их сростками, дендритами (рис. 6), так и единичными наростами и «губчатыми» скоплениями нано- и микрочастиц Au неправильных, округлых и чешуйчатых форм (см. рис. 5).

Поверхность золотин из окисленных руд сильно преобразована. Среди скульптур роста можно отметить скопления нано- и микрочастиц Au неправильных, округлых и чешуйчатых форм, которые формируют «губчатые» выделения как на поверхности гипогенного (остаточного) золота (рис. 7а), так и в ассоциации с гидроксидами железа (рис. 7б). Скульптуры растворения представлены в виде микроямчатого, натечного рельефа (рис. 7в), образующегося при взаимодействии поровых растворов с поверхностным слоем золота.

Пробность гипергенного золота (золото-II) варьирует от 735 до 1000 ‰. Гипергенное золото ассоциирует с гидроксидами железа, акантитом-II, ютенбогаардтитом и петровскаитом (рис. 8, табл. 1).

Акантит-II наблюдается в виде мелких включений (до 30 мкм) в гидроксидах Fe и хризоколле (рис. 8а). Ютенбогаардтит находится в виде мелких включений (до 30 мкм) в лимоните или на поверхности зерен золота-I в виде пленок (рис. 8б). Петровскаит наблюдается в виде пленок и кайм (шириной до 40 мкм) на поверхности зерен золота-I в ассоциации с золотом-II. Химические составы акантита-II, ютенбогаардтита и петровскаита стехиометричны или имеют небольшие отклонения (см. табл. 1).

Ютенбогаардтит менее распространен, чем петровскаит, что, видимо, обусловлено незначительным распространением низкопробного золота. По данным [Савва, Пальянова, 2007], если исходная пробность самородного золота будет высокой (более 650 ‰), то образуется петровскаит, при более низкой пробности (370–650 ‰) – ютенбогаардтит.

### **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ**

Для выяснения условий формирования наблюдаемых минеральных ассоциаций золота в гипергенных обстановках нами решалась обратная задача, т.е. рассчитывались Eh-pH параметры и концентрации золота и серебра, характерные для того или иного парагенезиса при P-T условиях окружающей среды зон окисления рудных месторождений.

В частности, ассоциация золота с гидроксидами железа имеет широкий диапазон Eh-pH условий устойчивости, и как только появляются гидраты оксида железа (III), она остается стабильной. Пример расчета приведен в табл. 2. Исходными фазами являлись  $\text{FeS}_2$  и  $\text{Au}_{0.912}\text{Ag}_{0.088}$ .

Очевидно, что уже при Eh -0.26 (pH 7.61) начинается растворение пирита и повышение пробы золота с концентрацией серебра в индивидуальной фазе ( $\text{Ag}_2\text{S}$  акантит). По мере развития процесса химического выветривания, наряду с пиритом появляется лимонит, и золото низкой пробы исчезает из ассоциации (обратим внимание на увеличение количества  $\text{Ag}_2\text{S}$ ). При положительных Eh 0.24 и 0.69 вольт, растворы становятся кислыми за счет полного растворения пирита и выноса сульфатной серы в раствор. Нужно сказать, что значение pH зависит от количества пирита в твердой фазе и минералов, способных нейтрализовать кислоту [Гаськова, Бортникова, 2007]. Например, при Eh 0.24 и pH 1.79 устойчивы только соединения благородных металлов, железо находится в растворе в виде  $\text{Fe}^{++}$  и его сульфатных комплексов. Это зона выщелачивания. Наконец, последняя колонка, где преобладают лимонит и высокопробное золото, маркирует самые окислительные условия.

Гораздо сложнее оказалось найти условия устойчивости пирита, гидроксидов железа и халькогенидов золота и серебра – петровскаита ( $\text{AgAuS}$ ) и ютенбогардита ( $\text{Ag}_3\text{AuS}_2$ ). В табл. 3 показаны условия их существования с пиритом и в случае, когда вместо пирита при окислении уже образовался лимонит, и они переотлагаются в процессе изменения первичных минералов.

Для образования петровскаита и ютенбогардита необходимы Eh, близкие к нулевому значению, и слабокислые pH 5-6. Обусловлено это тем, что именно в этих условиях еще устойчивы сульфидные и тиосульфатные комплексы золота и серебра, которые позволяют им накапливаться в растворах в значительных количествах, обеспечивая пересыщенность по отношению к указанным сложным сульфидам даже в гипергенных низкотемпературных обстановках. Главное отличие между растворами, равновесными с петровскаитом и ютенбогардитом – это отношения  $\text{Ag}/\text{Au}$  – максимальные в первом случае и приблизительно одинаковые во втором. По термодинамическим расчетам низкопробного золота с ютенбогардитом получить в ассоциации не удалось, устойчивыми оказываются акантит и какой-либо из сплавов золота.

Комплексами, позволяющими обеспечить высокие концентрации серебра, являются  $\text{AgHS}^0$ , а для золота они более разнообразны (табл. 4). Сульфидный и тиосульфатный комплексы золота сложной стехиометрии играют ведущую роль.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

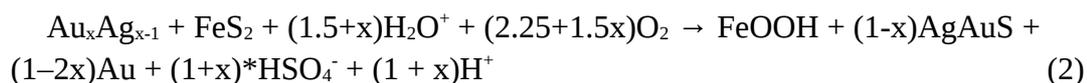
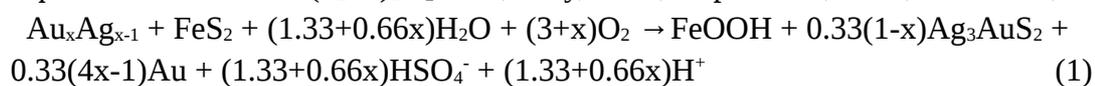
Вопрос о масштабах процессов растворения, перераспределения и образования нового золота является дискуссионным [Петровская, 1973; Росляков, 1981; Калинин и др., 2006, 2009; Shuster, Reith, 2018; Никифорова и др., 2020]. Остаются также недостаточно

изученными отличительные признаки гипергенного и эндогенного золота [Mann, 1984; Николаева, Яблокова, 2007; Осовецкий, 2012; Reith et al., 2012 и др.].

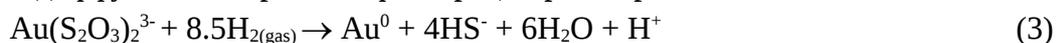
Детальные геологические, минералогические и геохимические исследования месторождений кор выветривания и зон окисления золота [Петровская, 1973; Росляков, 1981; Калинин и др., 2006, 2009, 2018; Shuster, Reith, 2018; Kalinin et al., 2019] позволили выделить признаки, доказывающие подвижность золота в экзогенных условиях. Например, это наличие *микрористалломорфологических особенностей золота, изменение его химического состава и ассоциация с гипергенными минералами* [Петровская, 1973; Росляков, 1981; Осовецкий, 2012; Shuster et al., 2017; Dunn et al., 2019; Хусаинова и др., 2020, 2021]. Сочетание скульптур роста и растворения, присутствие на поверхности золотин нано- и микронного золота червеобразных, округлых, игольчатых, кристаллических, «губчатых» форм разных генераций указывает на нестабильные физико-химические условия среды. Благодаря хемогенным процессам Au осаждается из коллоидных или ионных растворов [Росляков, 1981; Калинин и др., 2018, 2019; Shuster, Reith, 2018] на поверхности золота или в ассоциации с гипергенными минералами, способствуя образованию геохимических аномалий, в частности в виде горизонтов вторичного обогащения [Калинин и др., 2006; Хусаинова и др., 2020]. Присутствие золотин «агрегатного» типа (рис. 6г) свидетельствует, что не малую роль в изменении гранулометрии золота играют процессы «слипания» частиц [Наумов, 2010; Осовецкий, 2012; Кузнецова и др., 2019; Хусаинова и др., 2021].

Следующим признаком эволюции золота является изменение *гранулометрического распределения частиц*. Для месторождения Копто отмечена тенденция увеличения количества тонкого класса золота (<0.1 мм) в 1.5 раза, и уменьшение в 3.4 раза класса 0.25-0.1 мм (см. рис. 3) по сравнению с первичными рудами. Источником «нового» золота могут быть золотосодержащие минералы. Согласно [Чернышов и др., 2003], на месторождениях ТРУ содержание Au в магнетите может достигать 344 мг/т, в халькопирите и пирите до 9151 и 278 мг/т, соответственно.

Присутствие халькогенидов Au и Ag в окисленных рудах свидетельствует о дифференциации Au и Ag в системе. Поскольку петровскаит, ютенбогаардит и акантит-II (см. рис. 8) находятся в ассоциации с гидроксидами железа разной степени преобразованности, то их образование связано с окислением Au-содержащих сульфидов [Нестеренко и др., 1984; Савва, Пальянова, 2007] согласно реакциям (1, 2) [Савва и др., 2010], что свидетельствует о преобладании и распространении сульфитных (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) и тиосульфатных комплексов (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>3-</sup> [Craw, Lilly, 2016; Харламова, 2018; Liua et al., 2020].



Тиосульфатные комплексы разрушаются с образованием сульфат- или гидросульфид-ионов и самородного золота в зависимости от Eh-pH условий среды (3, 4). Это приводит к укрупнению золотин или образованию агрегатов в зависимости от наличия затравок и диффузионного режима фильтрации раствора.



Дестабилизация золотоносных комплексов происходит посредством: 1) деятельности бактерий, которые используют серу, железо и др. элементы в качестве источника энергии (восстановительная биоминерализация золота) [Lengke, Southam, 2005; Etschmann et al., 2016; Shuster et al., 2017]; 2) присутствием таких восстановителей как органическое вещество и ионы  $Fe^{2+}$ ; 3) при снижении pH, когда золото восстанавливается с осаждением на уже существующей поверхности самородных частиц [Hyland, Bancroft, 1989; Mucroft et al., 1995].

На образование разных генераций золота влияют геохимические барьеры [Kirillov et al., 2018, Хусаинова и др., 2020]. Образование Ag-содержащего (14-20 мас. % Ag) самородного Au является результатом распада смешанных тиосульфатных комплексов типа  $(Au,Ag)(S_2O_3)_2^{3-}$ . При дальнейшем воздействии кислых растворов Ag-содержащее вторичное Au подвергается повторному растворению в форме гидросульфидных комплексов и перераспределению. Более высокая растворимость Au в кислых окислительных условиях приводит к осаждению нескольких генераций крайне высокопробного Au различной морфологии при смене условий. Это подтверждается ассоциацией «губчатого» золота с гидроксидами Fe на поверхности массивного золота.

Все это позволяет полагать, что формирование гипергенного золота в зоне окисления происходило в условиях значительного растворения невидимого золота сульфидов, его локального перераспределения и отложения в окислительных условиях. В пользу этого свидетельствует и отмечаемая тенденция увеличения размеров зерен золота к верхним горизонтам коры выветривания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ морфологических и геохимических особенностей золота из первичных руд и зоны окисления месторождения Копто показал следующее.

1. В зоне окисления сформировался горизонт вторичного золотого обогащения, содержащий новообразованное золото в ассоциации со своеобразным гипергенным парагенезисом (гидроксиды железа, акантит-II, ютенбогаардит и петровскаит).

2. «Гипергенное» золото представлено кристаллами, сростками, дендритами, а также «губчатыми» скоплениями на поверхности остаточных частиц. Кроме того, встречаются собственные золото-серебряные минералы – петровскаит, ютенбогаардит, акантит-II.

3. Для образования петровскаита и ютенбогаардита необходимы слабокислые растворы с pH 5-6 и значениями Eh близкими к нулевому. Комплексами, позволяющими обеспечить высокие концентрации серебра, являются  $AgHS^0$ , а для золота – сульфидные  $(AuHS)$  и тиосульфатные  $(AuS_2O_3(SO_3)_2^{5-}, Au(SO_3)^-$ .

4. В окисленных рудах доля мелкого и тонкого золота класса <0.1 мм увеличена в 1.5 раза по сравнению с первичными рудами. Формирование гипергенного золота в зоне окисления происходило в условиях значительного растворения невидимого золота сульфидов, его локального перераспределения и отложения в окислительных условиях.

5. Средняя пробность гипогенного золота составляет 783‰ (при вариациях от 524 до 969 ‰). Пробность гипергенного золота (золото-II) варьирует от 735 до 1000 ‰.

6. Преобразование золота в зоне окисления месторождения Копто происходит благодаря хемогенным и механическим процессам.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и ТуВИКОПР СО РАН (0384-2016-0012). Аналитические работы выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

**Альбов М.Н.** Вторичная зональность золоторудных месторождений Урала. М.: Госгеолтехиздат. 1960. 215 с.

**Гаськова О.Л., Бортникова С.Б.** К вопросу о количественном определении нейтрализующего потенциала вмещающих пород // Геохимия, 2007, №4, с. 461-464.

**Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А.** Золото-редкометалльные месторождения Северо-Востока России // Тихоокеанская геология, 1998, т. 17, № 3, с. 94–103.

**Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г., Колесниченко П.П., Зайцев А.И., Диман Е.Н., Бердников Н.В.** Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. Магадан, 2003, СВКНИИ ДВО РАН, 196 с.

**Гаськов И.В.** Новые данные о соотношении скарновой и золоторудной минерализации на Тарданском месторождении (Северо-Восточная Тува) // Геология и геофизика, 2008, т. 49, № 12, с. 1227–1237.

**Горячев Н.А., Гамянин Г.Н.** Золото-висмутовые (золото-редкометалльные) месторождения Северо-Востока России: типы и перспективы промышленного освоения // Золоторудные месторождения Востока России. Магадан, СВНЦ ДВО РАН, 2006, с. 50—62.

**Никифорова З.С., Калинин Ю.А., Макаров В.А.** Эволюция самородного золота в экзогенных условиях // Геология и геофизика, 2020, т. 61, № 11, с. 1514-1534.

**Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г.** Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск: «Гео», 2006, 339 с.

**Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Наумов Е.А., Кириллов М.В.** Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) // Геология и геофизика, 2009, т. 50, №3, с. 241-257.

**Калинин Ю.А., Пальянова Г.А., Бортников Н.С., Наумов Е.А., Ковалев К.Р.** Механизмы агрегации и дифференциации золота и серебра при формировании золотоносных кор выветривания (на примере месторождений Казахстана) // ДАН, 2018, т. 482, № 2, с. 190-195.

**Кильчичаков К.М., Плеханов А.М., Кацапов А.Н.** Результаты поисково-оценочных работ на рудное золото в районе Тарданского месторождения. Кызыл, 1977. 139 с.

**Коробейников А.Ф., Номоконова Г.Г., Ерофеев Л.Я.** Закономерности проявления золотого оруденения в геолого-геохимических и физических полях контактовых ореолов гранитных интрузий // Геология рудных месторождений, 1987, т. 29, № 2, с. 58–70.

**Коробейников А.Ф., Зотов И.А.** Закономерности формирования месторождений золото-скарновой формации. Томск, Изд-во ТПУ, 2006, 234 с.

**Кудрявцева А.И.** Некоторые закономерности распределения золота в минералах скарнов Тарданского месторождения // Материалы по геологии Тувинской АССР. Вып. 1. Кызыл, Тув. кн. изд-во, 1969, с. 68–72.

**Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Ооржак Ш.Н., Бутанаев Ю.В.** Состав золота и условия образования руд гидротермального месторождения Копто (Северо-Восточная Тува) // Минералогия. 2018. №3. С. 61–69.

**Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Прокопьев И.Р., Редина А.А.** Минералого-геохимические особенности и условия образования золото-сульфидно-кварцевого месторождения Гардан (Северо-Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 2. С. 194–215.

**Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В.** Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей – потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия) // Георесурсы, 2019, 21(1), с. 2-14.

**Наумов В.А.** Минерагения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия. Автореф. дис. ... док-ра геол.-мин. н., Пермь: ПГУ, 2010, 42 с.

**Нестеренко Г.В., Кузнецова А.И., Пальчик Н.А., Лаврентьев Ю.Г.** Петровскиит  $AuAg(S,Se)$  – новый селеносодержащий сульфид золота и серебра // Зап. Всесоюзн. минерал. общ., 1984, т. 4, №. 5, с. 602-607.

**Никифорова З.С., Калинин Ю.А., Макаров В.А.** Эволюция самородного золота в экзогенных условиях // Геология и геофизика, 2020, т. 61, № 11, с. 1514-1534.

**Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В.** Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. Москва: ЦНИГРИ, 2015, 200 с.

**Николаева Л.А., Яблокова С.В.** Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах // Руды и металлы, 2007, №6, с. 41-57.

**Осовецкий Б.М.** Наноскульптура поверхности золота: монография. Пермь: ПГНИУ, 2012, 232 с.

**Пальянова Г.А.** Физико-химические особенности поведения золота и серебра в процессах гидротермального рудообразования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 221 с.

**Петров В.П.** Основы учения о древних корах выветривания. М.: Недра. 1967. 343 с.

**Петровская Н.В.** Самородное золото. М: Наука, 1973, 347 с.

**Росляков Н.А.** Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск: Наука. 1981. 237 с.

**Руднев С.Н., Серов П.А., Киселева В.Ю.** Венд-раннепалеозойский гранитоидный магматизм Восточной Тувы // Геология и геофизика, 2015, т. 56, № 9, с. 1572–1600.

**Савва Н.Е., Пальянова Г.А.** Генезис сульфидов золота и серебра на месторождении Улахан (Северо-Восток России) // Геология и геофизика, 2007, Т. 48, № 10, с.1028—1042.

**Савва Н.Е., Пальянова Г.А., Колова Е.Е.** Минералы золота и серебра в зоне вторичного сульфидного обогащения // Вестник СВНЦ ВО РАН, 2010, №1, с. 33-45.

**Спирidonov Э.М.** Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, Изд-во К&М, 2010, с. 143–171.

**Усов М.А.** Формации месторождений полезных ископаемых Салаира // Вестник ЗСГРТ. 1933. Вып. 6. С. 1-26.

**Харламова В.Ю.** Высокостойчивые комплексы золото (I) с серосодержащими лигандами в водном растворе. Авторефер. диссер. ... канд. хим. наук. ИНХ СО РАН, 2018, 22 с.

**Хусаинова А.Ш., Гаськова О.Л., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б.** Физико-химическая модель преобразования золота в продуктах переработки колчеданно-полиметаллических месторождений (Салаирский край, Россия) // Геология и геофизика, 2020, т. 61, № 9, с. 1181-1193.

**Хусаинова А.Ш., Калинин Ю.А., Гаськова О.Л., Бортникова С.Б.** Типоморфная характеристика золота из хвостохранилищ колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири // Георесурсы, 2021, Т. 23, № 3.

**Чернышев Н.М., Молотков С.П., Резникова О.Г.** Золото-платиноносность главнейших типов железорудных формаций мира (формационно-аналитический обзор) // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология, 2003, № 2, с.137–162.

**Шахов Ф.Н.** Морфологические черты зон окисления. Новосибирск: РИО СО АН СССР. 1960. С. 3-42. (Тр. ИГиГ СО АН СССР. Вып. 4).

**Шваров Ю.В.** HCh: Новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемы Windows // Геохимия, 2008, №8, с. 898-903.

**Craw D., Lilly K.** Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand // Ore Geology Reviews, 2016, V. 79, pp. 301-315.

**Dunn S.C., Heyden B.P., Rozendaal A., Taljaard R.** Secondary gold mineralization in the Amani Placer Gold Deposit, Tanzania // Ore Geology Reviews, 2019, V. 107, pp. 87-107.

**Etschmann B., Brugger J., Fairbrother L., Grosse C., Nies D.H., Martinez-Criado G., Reith F.** Applying the Midas touch: Differing toxicity of mobile gold and platinum complexes drives biomineralization in the bacterium *Cupriavidus metallidurans* // Chemical Geology, 2016, 438, pp. 103-111.

**Hyland M.M., Bancroft G.M.** An XPS study of gold deposition at low temperatures on sulphide minerals: reducing agents // Geochim. Cosmochim. Acta, 1989, 53, pp. 367-372.

**Lang J.R., Baker T.** Intrusion related gold systems: the present level of understanding // Miner. Deposita, 2001, v. 36, p. 477–489.

**Kalinin Y.A., Palyanova G.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Pirajno F.** Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: a case study from Kazakhstan // Ore Geology Reviews, 2019, V. 109, pp. 358-369.

**Kirillov M.V., Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Shevko E.P.** Authigenic gold in stale tailings of cyanide leaching of gold-sulfide-quartz ores (Komsomol'skii gold-extracting factory, Kemerovo Region) // Doklady Earth Sciences, 2018, Vol. 481, № 2, pp. 1091-1094.

**Lengke M.F., Southam G.** The effect of thiosulfate-oxidizing bacteria on the stability of the gold-thiosulfate complex // Geochim. Cosmochim. Acta, 2005, 69, pp. 3759-3772.

**Liu X., Jianga T., Xua B., Zhang Y., Lia Q., Yanga Y., He Y.** Thiosulphate leaching of gold in the  $\text{Cu-NH}_3\text{-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$  system: An updated thermodynamic analysis using predominance area and species distribution diagrams // Minerals Engineering, 2020, V. 151, 12 pp.

**Mann A.W.** Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observations from Western Australia // Econ. Geol., 1984, Vol. 79 (1), pp. 38-49.

**Mycroft J.R., Bancroft G.M., McIntyre N.S., Lorimer J.W.** Spontaneous deposition of gold on pyrite from solutions containing Au(III) and Au(I) chlorides. 1. A surface study // Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59, pp. 3351-3365.

**Reith F., Stewart L., Wakelin S.A.** Supergene gold transformation: Secondary and nanoparticulate gold from southern New Zealand // *Chemical Geology*, 2012, 320-321, pp. 32-45.

**Shuster J., Reith F.** Reflecting on gold geomicrobiology research: thoughts and considerations for future endeavors // *Minerals*, 2018, 8(9):401, 12 pp.

**Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J.E., Parsons J.M., Southam G.** Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments // *Chemical Geology*, 2017, V. 450, pp. 154-164.

**Tagirov, B.R., Baranova, N.N., Zotov, A.V., Schott, J., Bannykh, L.N.** Experimental determination of the stabilities of  $\text{Au}_2\text{S}(\text{cr})$  at 25 °C and  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  at 25–250 °C // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, Vol. 70, pp. 3689-3701.

**Рис. 1. Геологическая схема и разрезы месторождения Копто [по данным Кильчичаков и др., 1977].**

1 – суглинисто-щебнистых элювиально-делювиальных образования; 2 – осадочно-вулканогенные породы туматтайгинской свиты (R- $C_{1tn}$ ): риолиты и их туфы с прослоями доломитов; 3–4 – раннетаннуольский габбро-диорит-плагиогранитный комплекс ( $O_{1tn}$ ): 3 – кварцевые диориты; 4 – дайки гранит-порфиров; 5 – скарны; 6 – метасоматиты березит-лиственитовой формации; 7 – рудные тела и их номера; 8 – зоны дробления; 9 – уровень зоны окисления по данным геологоразведочных скважин; 10 – геологические границы.

**Рис. 2. Выходы окисленных руд золоторудного месторождения Копто.**

а – общий вид карьера с выделенными контурами участков (б, в); б – схематический разрез по скважинам (С – содержание Au) выходов окисленных руд (красный цвет) с горизонтом вторичного обогащения (зеленый цвет); в – интенсивно лимонитизированные (каркасные лимонитовые) прожилковые руды.

**Рис. 3. Соотношение крупности самородного золота в первичных (1) и окисленных (2) рудах.**

**Рис. 4. Формы выделения гипогенного золота (а–з: 750–903‰) и электрума (и: 641‰) в кварце (Qz) и лимоните (Lm) в слабоокисленных золото-сульфидно-кварцевых прожилках.**

**Рис. 5. Формы выделения электрума (El), гипогенного (Au-I) и гипергенного (Au-II) золота в кварце (Qz) и лимоните (Lm) из окисленных лимонит-кварцевых руд.**

**Рис. 6. Формы выделения гипергенного золота:**

а – сростки кристаллов золота; б – золото дендритоподобного облика; в – золото уплощенной лентовидной формы; г – «агрегатное» золото.

**Рис. 7. Скульптуры поверхностей золота:**

а – скульптуры роста, представленные в виде наростов Au округлых форм, формирующие «губчатое» Au (Au-II) на поверхности гипогенного золота (Au-I); б) «губчатое» золото (Au-II) в ассоциации с лимонитом (Lm); в) скульптуры растворения – микроямчатый (изъеденный) рельеф поверхности золота.

**Рис. 8. Формы выделения гипогенного (Au-I) и гипергенного (Au-II) золота, акантита-II (Acp-II), ютенбогаардтита (Utb) и петровскаита (Ptk) в кварце (Qz), лимоните (Lm) и хризокolle (Ccl) в окисленных лимонит-кварцевых рудах.**

Таблица 1. Химический состав петровскаита, ютенбогаардтита и акантита (I и II) (мас. %)

| Образец        | Анализ | Au    | Ag    | S     | Сумма  | Формула                      |
|----------------|--------|-------|-------|-------|--------|------------------------------|
| Петровскаит    |        |       |       |       |        |                              |
| КП-5-1         | 1      | 52.09 | 37.07 | 10.64 | 99.80  | $Au_{0.84}Ag_{1.10}S_{1.06}$ |
|                | 2      | 53.44 | 37.89 | 8.66  | 99.99  | $Au_{0.91}Ag_{1.18}S_{0.91}$ |
| КП-5а          | 3      | 61.73 | 26.80 | 11.47 | 100    | $Au_{1.02}Ag_{0.81}S_{1.17}$ |
|                | 4      | 64.85 | 23.93 | 11.22 | 100    | $Au_{1.10}Ag_{0.74}S_{1.16}$ |
|                | 5      | 49.40 | 41.23 | 9.37  | 100    | $Au_{0.81}Ag_{1.24}S_{0.95}$ |
|                | 6      | 52.09 | 37.27 | 10.13 | 99.49  | $Au_{0.86}Ag_{1.12}S_{1.02}$ |
|                | 7      | 61.56 | 27.46 | 10.86 | 99.88  | $Au_{1.04}Ag_{0.84}S_{1.12}$ |
|                | 8      | 62.76 | 27.26 | 10.39 | 100.41 | $Au_{1.07}Ag_{0.85}S_{1.08}$ |
| Ютенбогаардтит |        |       |       |       |        |                              |
| КП-5а          | 9      | 32.04 | 56.82 | 10.27 | 99,13  | $Ag_{3.13}Au_{0.97}S_{1.90}$ |
| Акантит-I      |        |       |       |       |        |                              |
| КП-1           | 10     | -     | 86.87 | 12.67 | 99.54  | $Ag_{2.01}S_{0.99}$          |
| КП-5-1         | 11     | -     | 85.96 | 13.10 | 99.06  | $Ag_{1.98}S_{1.02}$          |
| Акантит-II     |        |       |       |       |        |                              |
| КП-5а          | 12     | -     | 86.40 | 12.95 | 99.35  | $Ag_{1.99}S_{1.01}$          |
| КП-5-1         | 13     | -     | 86.36 | 12.97 | 99.33  | $Ag_{1.99}S_{1.01}$          |
|                | 15     | -     | 86.91 | 13.07 | 99.98  | $Ag_{1.99}S_{1.01}$          |

*Примечание.* Состав золота определен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU с ЭДС Oxford Instruments X-act, аналитик И. А. Блинов, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Прочерк – не обнаружено. Формула ютенбогаардтита рассчитана на 6 атомов, петровскаита и акантита – на 3 атома.

Таблица 2. Условия устойчивости минералов железа и золота в гипергенных условиях

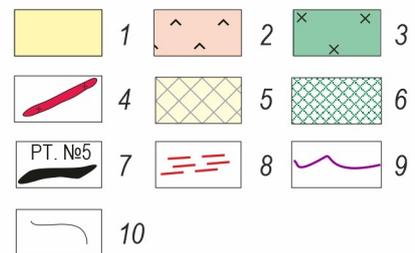
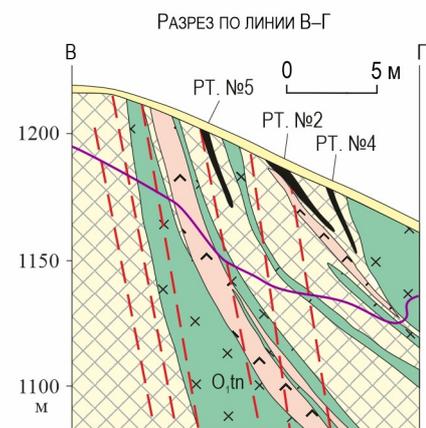
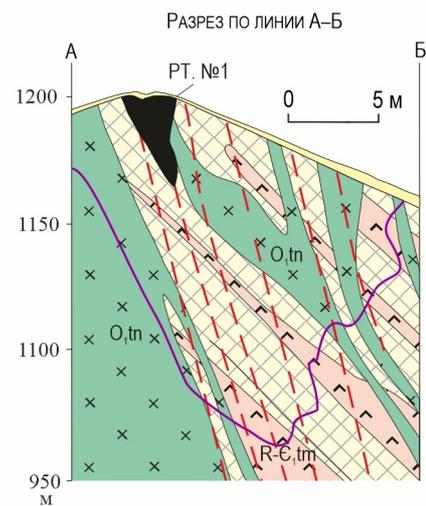
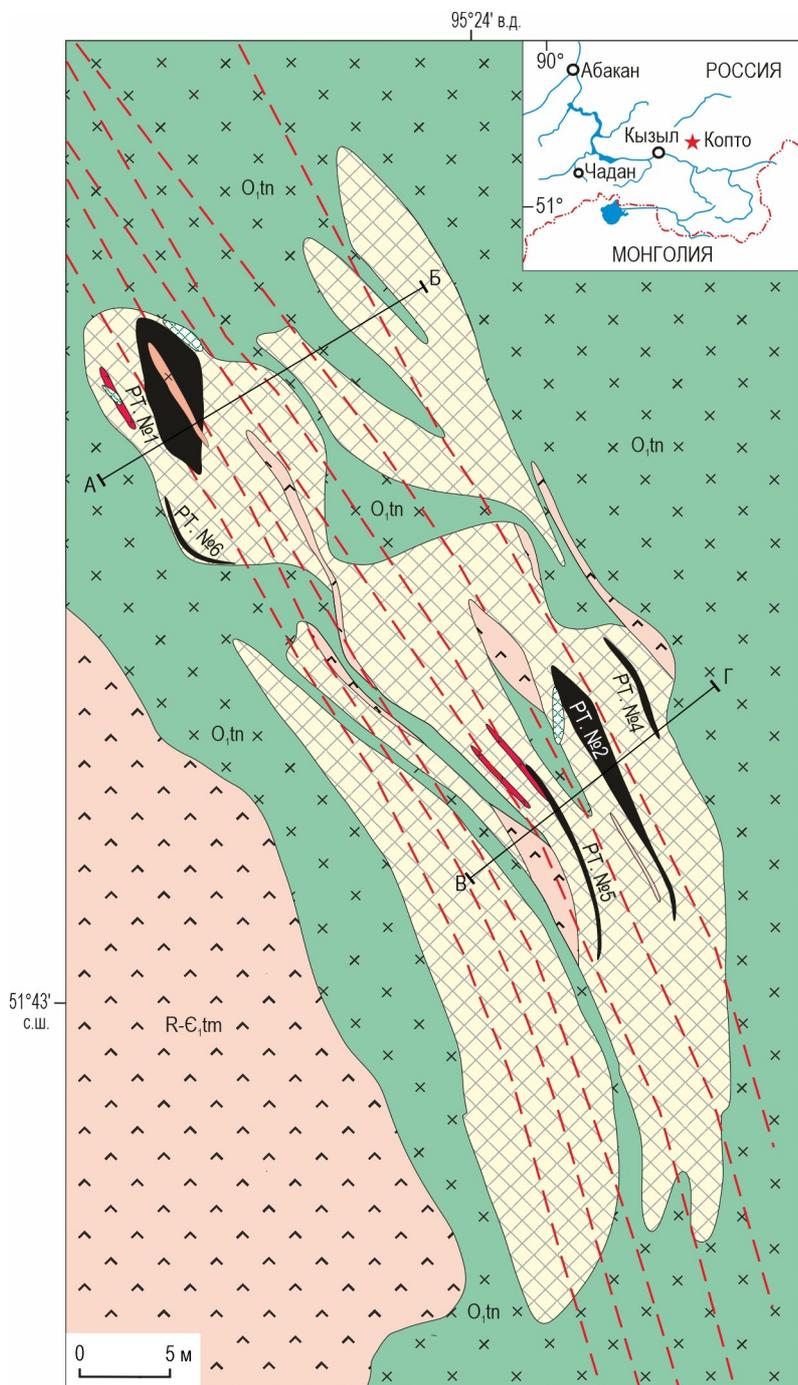
|   |                   |          |          |          |
|---|-------------------|----------|----------|----------|
| Eh, В   | -0,26             | -0,18    | 0,24     | 0,69     |
| pH  | 7,61              | 7,01     | 1,79     | 1,65     |
| Ассоциация  | Количество (моль) |          |          |          |
| Пирит   | 2,50E-02          | 1,59E-02 | -        | -        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O | -                 | 7,69E-04 | -        | 7,50E-03 |
| Ag <sub>2</sub> S                                 | 4,01E-07          | 1,59E-03 | 1,59E-03 | -        |
| Au <sub>0.912</sub> Ag <sub>0.088</sub>           | 3,47E-03          | 3,48E-03 | 3,48E-03 | 3,48E-03 |
| Au <sub>0.687</sub> Ag <sub>0.323</sub>           | 9,82E-06          | -        | -        | -        |
| Ag, мкг/л   | 1.85E-04          | 4.07E-05 | 3.25E-03 | 3.42E+05 |
| Au, мкг/л   | 5.77E-09          | 7.71E-10 | 6.56E-06 | 1.58E-03 |

Таблица 3. Условия устойчивости петровскита и ютенбогардита с минералами железа и кварцем в гипергенных условиях

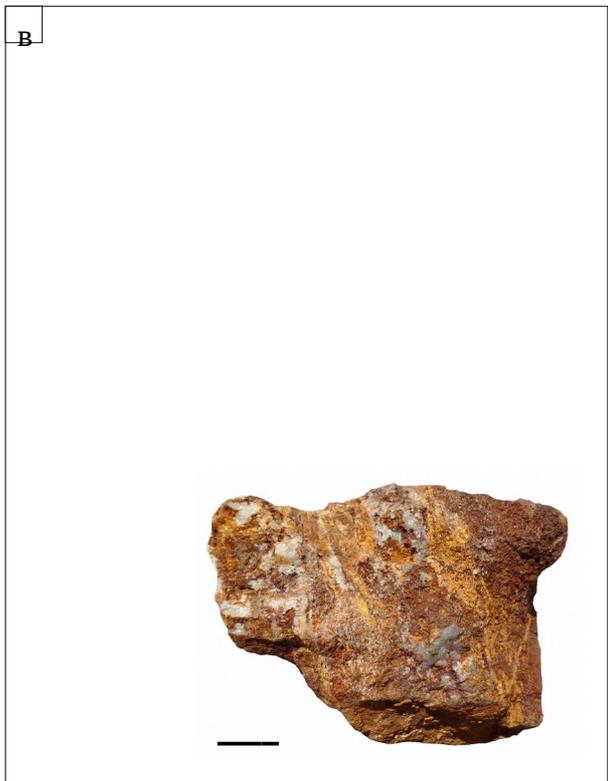
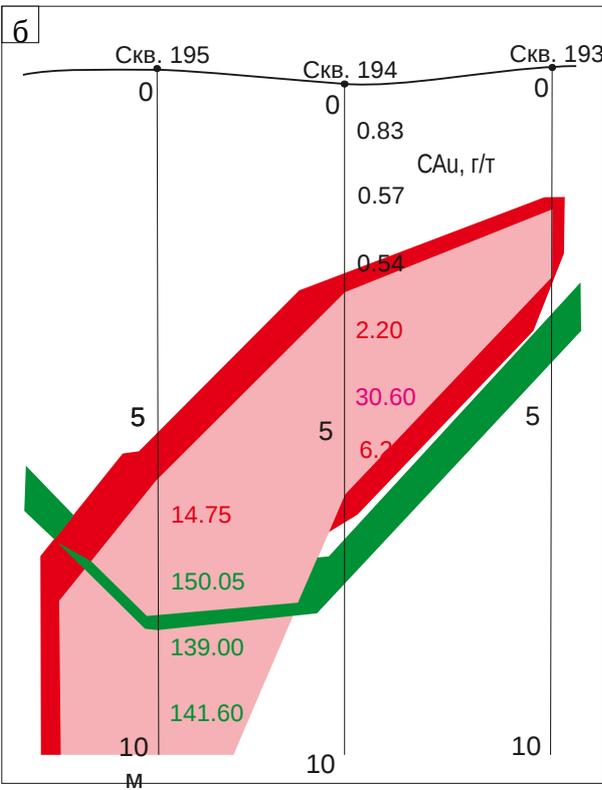
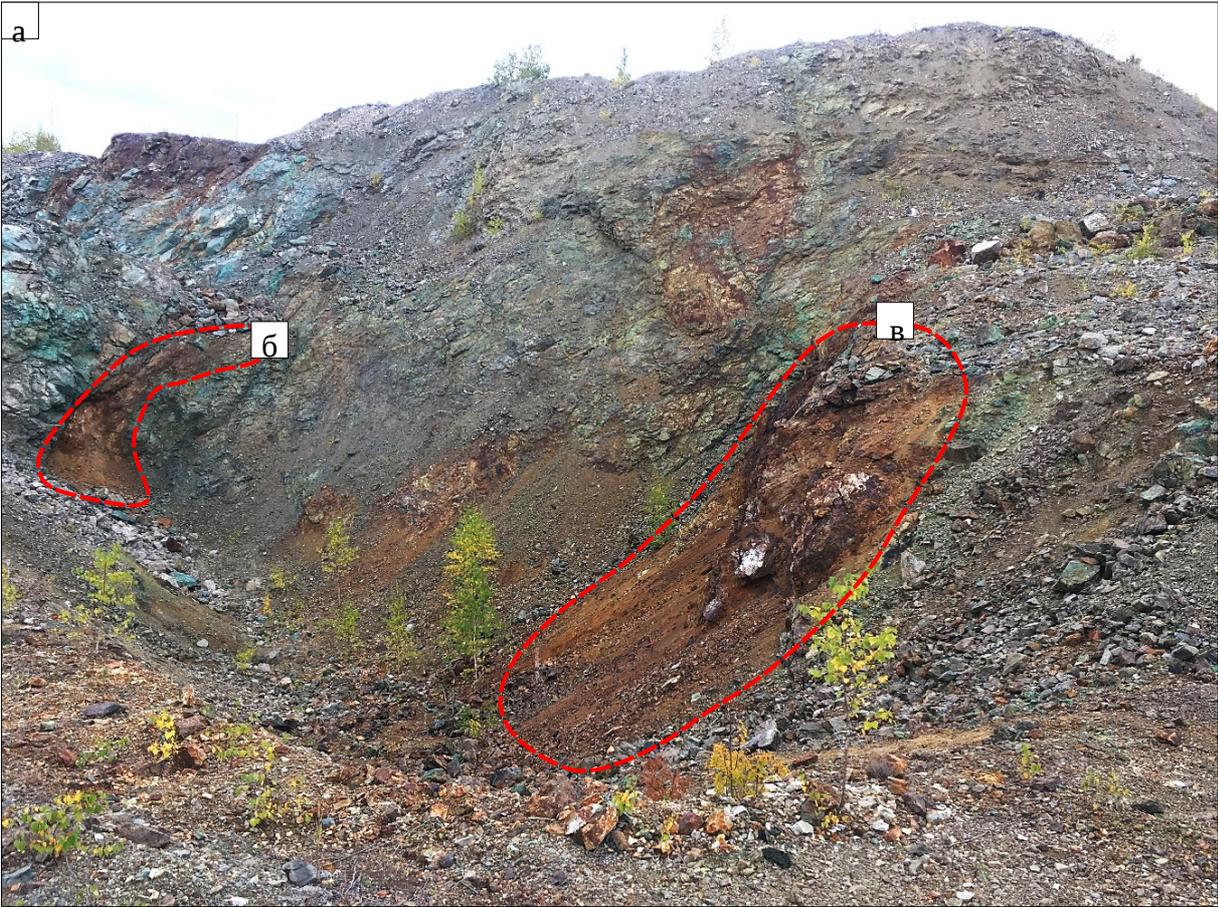
|   |                   |          |                                  |                   |
|---|-------------------|----------|----------------------------------|-------------------|
| pH                                      | 5,95              | 5,11     | pH                               | 5,95              |
| Eh, В                                   | -0,084            | 0,039    | Eh, В                            | -0,084            |
| Ассоциация                              | Количество (моль) |          | Ассоциация                       | Количество (моль) |
| Quartz                                  | 1,65E-02          | 1,65E-02 | Quartz                           | 1,65E-02          |
| Pyrite                                  | 5,03E-03          | -        | Pyrite                           | 4,26E-03          |
| Goethite                                | 1,12E-02          | 5,97E-03 | Goethite                         | 1,03E-02          |
| AgAuS                                   | 8,02E-03          | 7,69E-03 | Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> | 2,80E-03          |
| Au <sub>0.831</sub> Ag <sub>0.169</sub> | 2,20E-03          | 2,61E-03 | -                                | -                 |
| Ag, мкг/л                               | 2,12E-02          | 2,90E+04 | Ag, мкг/л                        | 19,62             |
| Au, мкг/л                               | 5,26E-09          | 8,66E-13 | Au, мкг/л                        | 12,12             |

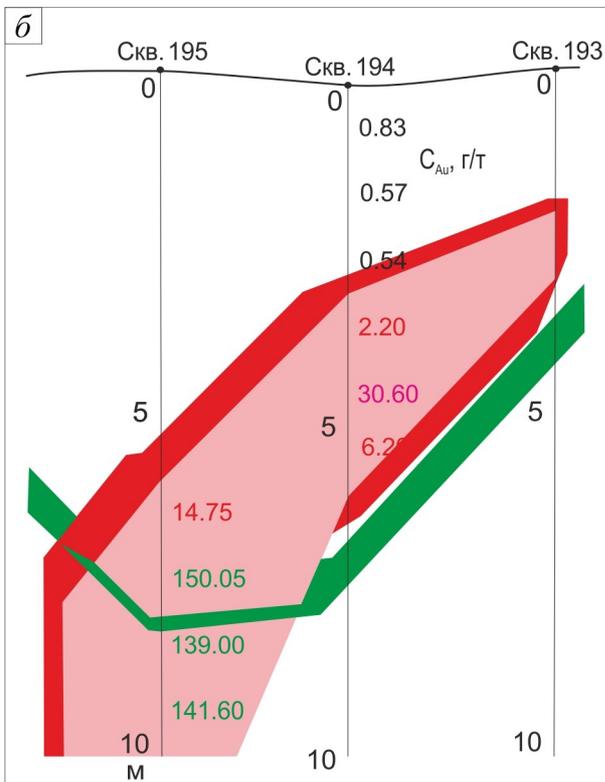
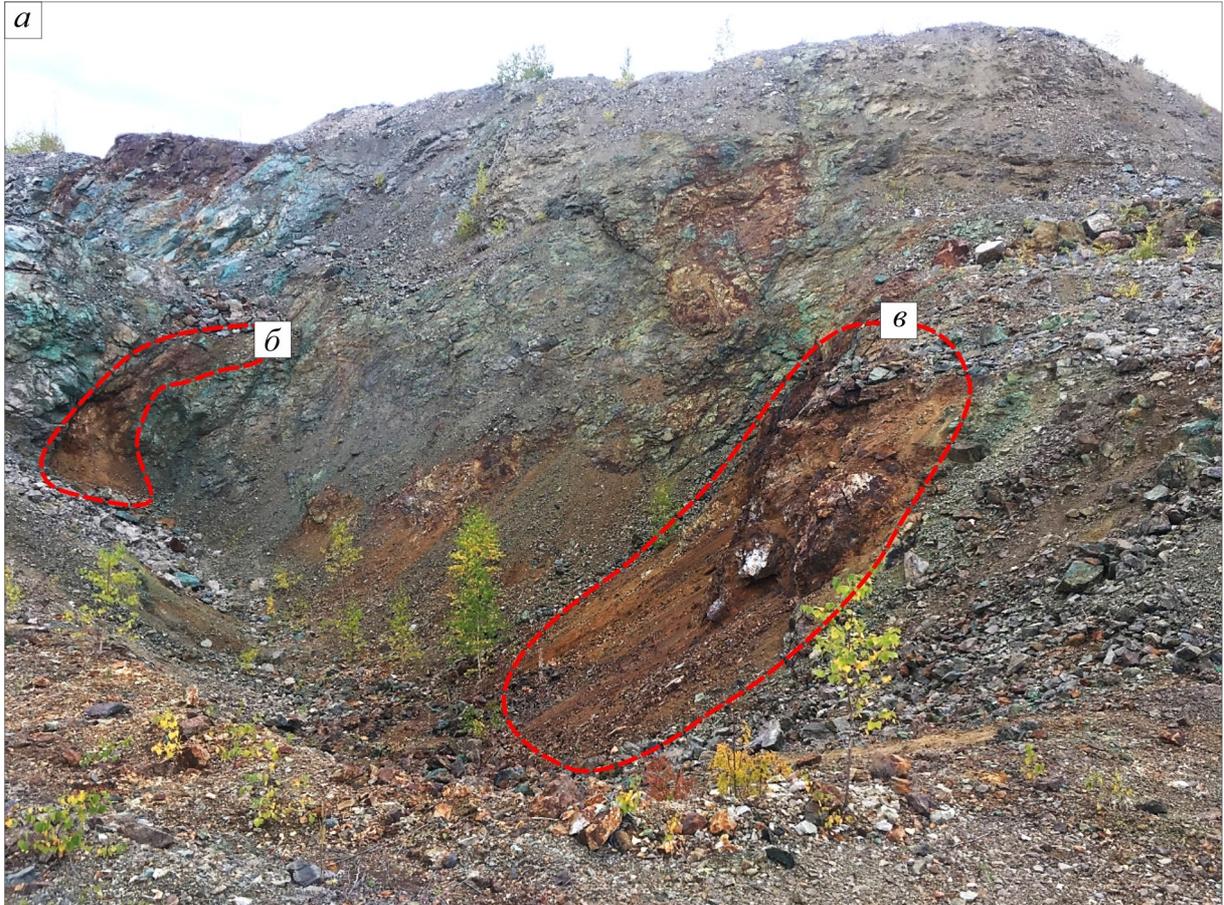
Таблица 4. Концентрация комплексов золота в растворах при Eh -0.08, pH 5.9 (25°C) в ассоциации с петровскситом (Aus + Pet) и ютенбогаардитом (Aus + Uyt)

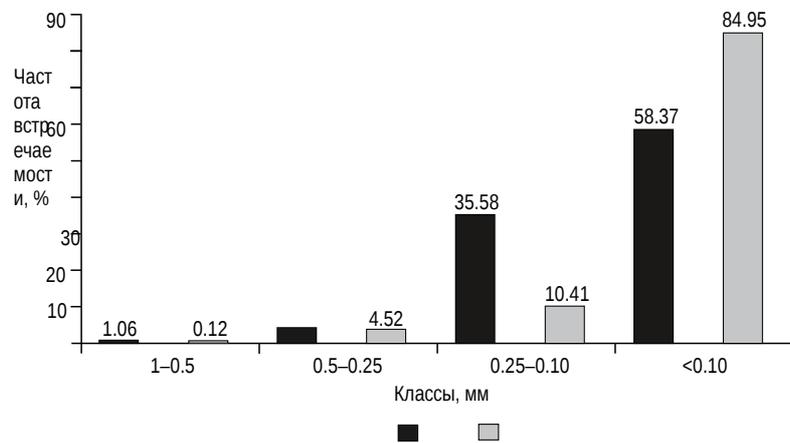
| Au <sub>s</sub> + Pet   |                    | Au <sub>s</sub> + Uyt   |                    |
|---|--------------------|---|--------------------|
| Комплексы   | Количество, моль/л | Комплексы   | Количество, моль/л |
| AuOH  | -                  | AuOH  | 4,34E-12           |
| AuHS  | 1,05E-18           | AuHS  | 2,41E-09           |
| AuS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>-5</sup> | 2,51E-17           | AuS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>-5</sup> | 5,79E-08           |
| -   | -                  | Au(SO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>   | 1,49E-10           |

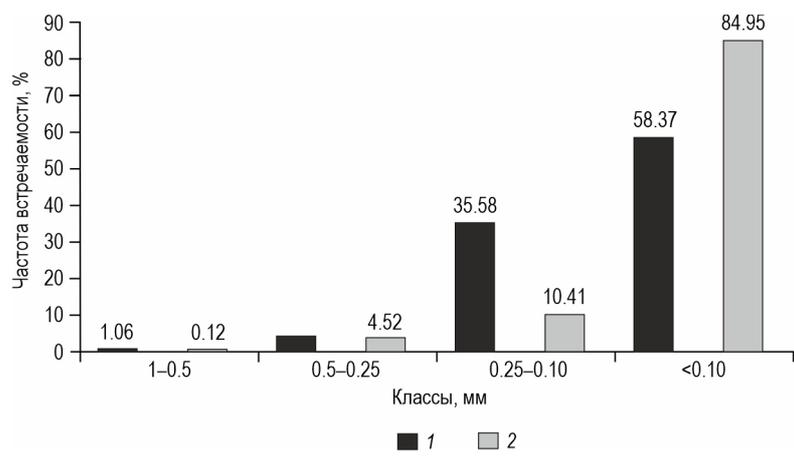












a

Qz

Qz

15 mm

б

Qz

Qz

17 mm

в

Qz

Qz

12 mm

г

Qz

Qz

40 mm

д

Qz

50 mm

Qz

е

Qz

12 mm

Qz

ж

Qz

Qz

Qz

15 mm

з

Qz

Lm

Qz

17 mm

и

Qz

17 mm

Qz

