

Научная статья

УДК 553.411: 549.283: 543:576

doi: 10.17223/25421379/34/7

АУТИГЕННОЕ ЗОЛОТО РОССЫПЕЙ АМЫЛО-СИСТИГХЕМСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО РАЙОНА, ЗАПАДНЫЙ САЯН

Чаяна Март-ооловна Хертек¹, Анатолий Максимович Сазонов²

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

^{1,2} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹ chayana83@mail.ru

² sazonov_am@mail.ru



Аннотация. В россыпях Амыло-Систигхемского района выявлены природные и техногенные разновидности нового (аутигенного) золота. Новое золото, представлено каймами, чешуйчатыми, криптоконическими и волосовидными наростами хемогенно-биогенного серебристого золота, полифазными каймами техногенной золото-серебряной амальгамы и спутанно-волокнистыми агрегатами техногенно-биогенного ртутистого золота. В формировании аутигенного золота и пленок гидроксидов Fe преимущественную роль играют электрохимические способы отложения и сорбция Au и Hg тельцами цианобактерий.

Ключевые слова: золото, аутигенное, техногенно-биогенное, техногенная амальгама золота, пленки гидроксидов железа, электронная микроскопия, коренной источник

Благодарности: авторы признательны руководству лаборатории электронной микроскопии R&D центра НорНикель ИЦМ СФУ; С.Г. Прудникову и Р.В. Кужугету за всестороннюю помощь и поддержке исследований; С.А. Сильянову, Б.М. Лобастову и Н.В. Нелюбину за помощь в изготовлении препаратов, исследовании состава и строения частиц самородного золота на электронном микроскопе.

Источник финансирования: работа выполнена по государственному заданию Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (FUPS-2021-0002).

Для цитирования: Хертек Ч.М., Сазонов А.М. Аутигенное золото россыпей Амыло-Систигхемского рудно-россыпного района, Западный Саян // Геосферные исследования. 2025. № 1. С. 95–108. doi: 10.17223/25421379/34/7

Original article

doi: 10.17223/25421379/34/7

AUTHIGENIC GOLD FROM PLACERS OF THE AMYLO-SISTIGKHEM ORE AND PLACER DISTRICT, WESTERN SAYAN

Chayana M. Khertek¹, Anatoliy M. Sazonov²

¹ Tuva Institute of Integrated Development of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, Russia

^{1,2} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ chayana83@mail.ru

² sazonov_am@mail.ru

Abstract. Authigenic gold in placers of the Amylo-Sistigkhemsy ore placer district of the Khemchik-Kurtushubinsky metallogenic zone of the Western Sayan has been studied by electron microscopic method. Structural-morphological features and chemical composition of natural and anthropogenic varieties of new (authigenic) gold of repeatedly developed placers are revealed and systematized in the present work. Aggregates of authigenic gold are represented by rims, flakes, cryptoconical and hair-like outgrowths of chemogenic-biogenic natural authigenic silver gold (937–1,000 ‰), polyphase rims of technogenic gold-silver amalgam (Au 71–95.2 ‰; Ag n/o– 4.3 ‰; Hg 4.75–25 ‰) and entangled-fiber aggregates of technogenic-biogenic mercury gold (Au 71.1–81.5 ‰; Ag 2.75–5.9 ‰; Hg 15.2–23.4 ‰). Electrochemical methods of deposition and sorption of gold and mercury by cyanobacteria cells played the predominant role in the formation of authigenic gold and iron hydroxide layers. The mass amount of authigenic gold is less than tenths of ‰. The formation of authigenic gold occurs at the stage of syngeneses, during the formation of natural gold-bearing strata and during the formation of gold-bearing separated payers in anthropogenic dumps broken by a significant time interval. Authigenic gold deposition occurs from pore waters saturating the sediment of terrigenous material, to a greater extent, in the upper zone of the gold-bearing layer. Gold in pore waters is in the form of Au ions, colloids and complex compounds of AuClOH^- , and $\text{AuCl}(\text{OH})_2^-$; AuCl_2^- ; $(\text{Au,Ag})(\text{S}_2\text{O}_3)^{3-}$ and others. Gold deposition was carried out by chemogenic

method; largely the formation of aggregates of authigenic gold was promoted by goldophilic bacteria. Galvanic processes played a significant role in the coagulation of gold-bearing colloids and recovery of gold from weakly saturated true solutions. In our opinion, the formation of high-grade rims due to metasomatic purification of metal from Ag and Cu impurities caused the formation of positive charge on the surface of clastogenic gold particles. Layers of iron hydroxides and new gold were deposited on the positively charged surface as a result of galvanic process from pore waters.

Keywords: gold, new, authigenic, technogenic-biogenic, technogenic gold amalgam

Acknowledgements: The authors thank the management of the electron microscopy laboratory of the NorNickel R&D Center (Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University); S.G. Prudnikov and R.V. Kudzhuget for comprehensive assistance and support of the research; S.A. Silyanov, B.M. Lobastov, and N.V. Nelyubin for their help in making preparations and studying the composition and structure of native gold particles using an electron microscope.

Sour of financing: The work was carried out according to the state assignment of the Tuva Institute for Integrated Development of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FUFs-2021-0002).

For citation: Khertek Ch.M., Sazonov A.M. (2025) Authigenic gold from placers of the Amylo-Sistigkhem ore and placer district, Western Sayan. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 95–108. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/34/7

Введение

Особенностью россыпного золота является наличие на частицах кайм метасоматического высокопробного (коррозионного), пленок аутигенного золота, межзерновых прожилков, техногенной золото-серебряной амальгамы, пленок гидроксидов железа, марганца и других минералов. Образование аутигенного золота, непосредственно в россыпях, показательно для неоднократно разрабатываемых месторождений. Об этом свидетельствуют находки медной и вольфрамовой проволоки, гвоздей, рыболовных крючков и других рукотворных предметов с наростами золота, имеющих весовые количества [Петровская, 1973; Наумов, 2010; Кузнецова, 2011; Никифорова и др., 2020]. Текстурно-структурные особенности золота россыпей формировались в приповерхностной зоне золотоносных песков в цепи длительных последовательных динамических экзогенных процессов – выветривания и окисления коренных руд, транспортировки обломочного, хемогенного, коллоидного и биогенного материала из кор выветривания в область накопления с формированием осадка в виде золотоносного пласта и перекрывающих отложений. В терригенных осадочных отложениях широко распространены оолитовые, аксиолитовые, пленочные, регенерационные, псевдоморфно-зоогенные новообразования в собственно терригенном субстрате [Кузнецов, 2007; 2011; Япаскурт, 2008]. Изучены морфологические особенности и внутренняя структура индивидов и агрегатов, связанные с аутигенным минералообразованием.

В корах выветривания крупные частицы золота приобретают кавернозное строение, диспергируются с образованием большого количества шаровидных и ограненных частиц микронного размера [Silyanov et al., 2021], которые в процессе переноса растворяются и теряются. По свидетельству Л.В. Фирсова [1985],

95 % коренного золота при переносе из области питания в область отложения теряется. По свидетельству геологов-россыпщиков [Петровская, 1973], количество аутигенного золота в россыпях доли процентов, но иногда повышается до первых процентов. В золотоносных пластах россыпных месторождений Амыло-Систигхемского района отмечены значительные преобразования обломочного золота [Хертек, Сазонов, 2023] – слипание частиц, облагораживание, увеличение частиц в размерах за счет образования минеральных каемок, в том числе и аутигенного золота, иногда с регенерационной кристаллографической огранкой.

Целью статьи является характеристика аутигенных новообразований золота в россыпных месторождениях Амыло-Систигхемского района, отражающие индивидуальные особенности строения, образования и преобразования металла.

Общие сведения о геологии рудно-россыпного района

Амыло-Систигхемский рудно-россыпной район расположен в междуречье рр Амыл и Систиг-Хем (Западный Саян). Золотоносные россыпи водотоков II и III порядков, являющихся правыми притоками этих рек, наследуют северо-западные и субширотные разрывные нарушения. Истоки рек расположены в пределах хр. Ергак-Таргат-Тайга, имеющего в пределах района ССВ простираение (рис. 1).

Амыло-Систигхемский рудно-россыпной район входит в состав Хемчикско-Куртушубинской металлогенической зоны [Берзон, 1983]. Геология района определяется сочленением Куртушубинского офиолитового пояса (трассирующего осевую линию хр. Ергак-Таргат-Тайга) позднего рифея, метаморфизованных образований джебашской серии Центрально-Саянской СФЗ, позднерифейско-раннекембрийских переслаивающихся парасланцев и метабазальтов Куртушубинского офиолитового пояса,

средне-верхнекембрийскими терригенными отложениями Хемчикско-Систигхемской СФЗ [Государственная..., 2000].

Интрузивные образования представлены массивами ультрабазит-базитов иджимского комплекса, субвулканическими телами метабазитов золотогенерирующего макаровско-орешковского (изинзюльского) (V–C₁) комплекса, расслоенными анортозит-габбровыми интрузиями булкинского (O–D₁?) комплекса и

нижнедевонскими вулканоплутоническими ассоциациями сиенит-щелочно-гранитового кукшинского и основных, средних и кислых гипабиссальных тел и эффузивов киндейско-саглинского комплексов.

На территории района развиты фрагменты Саяно-Тувинского, Систигхемского и Кандатского граничных разломов, определивших положение и ориентировку золотоносных водотоков разных порядков.

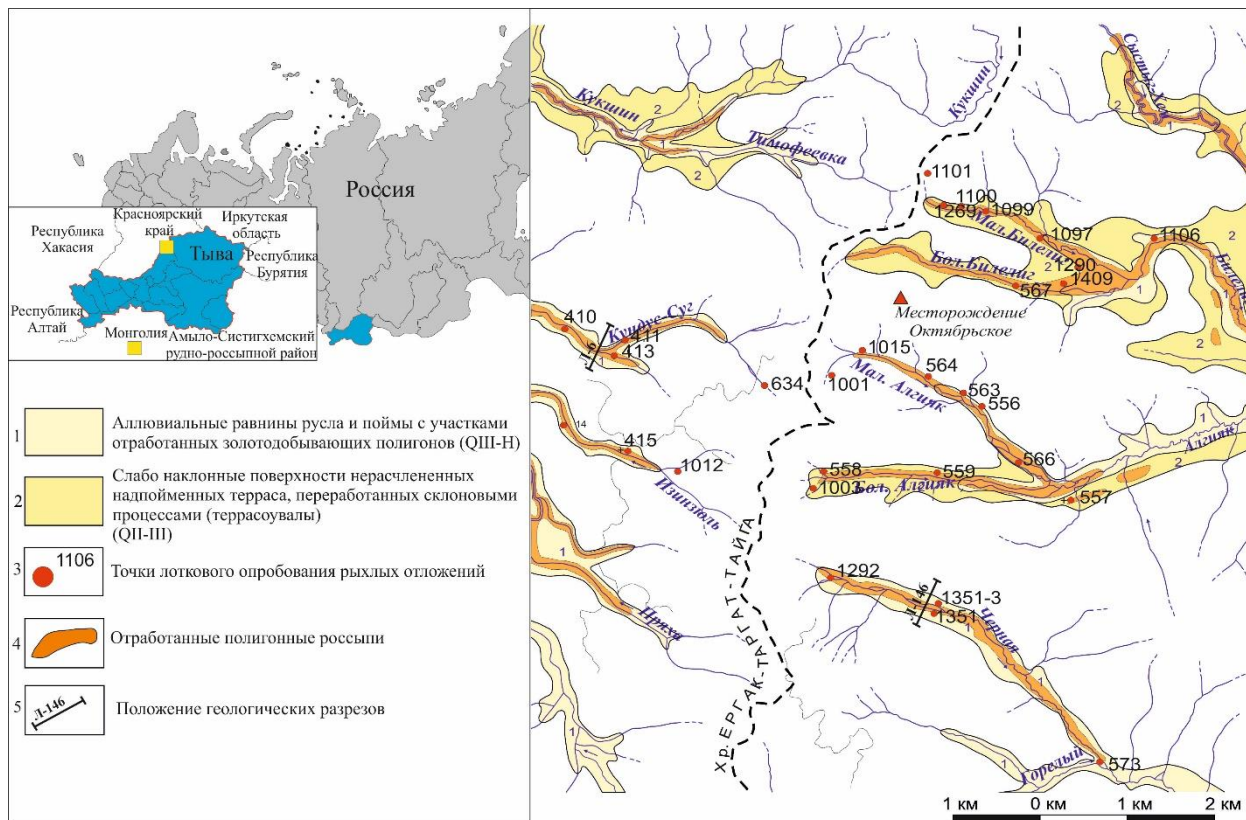


Рис. 1. Амыло-Систигхемский рудно-россыпной район

Fig. 1. Amylo-Sistigkhem ore and placer district

Большая часть рудно-россыпного района расположена в пределах Амыло-Систигхемской депрессии неогенового заложения. С момента открытия (1836) в отработку вовлекались преимущественно долинные и террасовые россыпи. В настоящее время они требуют доизучения в связи с организацией добычных работ погребенных, неогеновых и отвальных россыпей [Прудников, 2005].

Россыпи характеризуются струйчатым или кустовым распределением золота. Ширина россыпей от 15–20 м в верхнем течении рек и возрастает до 100–200 м в нижнем. Содержание золота вдоль россыпи не постоянное, наблюдается закономерное уменьшение его вниз по течению реки. Золото в продуктивном пласте распределено неравномерно: высокие и значительные содержания чередуются между собой. Не всегда

проявляется увеличение содержания к подошве пласта. По данным эксплуатационных работ, головные части россыпей отличались содержанием золота в пределах 3–5 г/м³ массы, а содержание по пласту нередко достигало 10–15 г/м³ песков. Вниз по россыпи отмечалось общее уменьшение средних содержаний, обычно скачкообразно.

Разрез отложений в долине р. Кундусуг (правый приток р. Амыл) по линии 6 (см. рис. 1) включает (сверху вниз):

- 1 – почвенно-растительный слой, мощность 0,3 м;
- 2 – склоновые отложения с обломками, щебнем и древесно-глинистым материалом (арQ_{III-H}), мощность 1–2 м;
- 3 – промытые сортированные золотоносные гравийно-галечные отложения с песчано-глинистым зеленовато-серым заполнителем (аQ_{III¹}), мощность 4–5 м;

4 – плотик – габбро, сильно выветрелые эффузивы.

Разрез отложений, в долине р. Черной (правый приток р. Систиг Хем), по линии 146 представлен (сверху вниз):

1 – почвенно-растительным слоем, мощность 0,3 м;

2 – глинистыми и илесто-глинистыми отложениями серого, сине-зеленого и коричневого цветов с различными оттенками, количество обломочного материала 5–35 % (гравий, галька, дресва, щебень) (арQ_{III-N}), мощность слоя от 0,5–1,5 до 5–7 м;

3 – золотоносными галечно-гравийными отложениями яркой желтовато-красной окраски с глинистым заполнителем до 15–25 %. Гальки и гравий от 40 до 70 %, хорошо окатаны. Обломки пород сильно выветрелые, легко разрушаются. Состав обломков: кварц (5–10 %), эффузивы, габбро-диабазы, песчаники, конгломераты, мощность 2–7 м;

4 – плотик – эффузивы интенсивно выветрелые.

Тяжелая фракция шлиха песков из россыпи р. Черной включает (%) магнитную (магнетит 80–85, титаномагнетит 10–15, хромшпинелид 5–10, единичные знаки железистого хромита и гетита); электромагнитную (ильменит + манганоильменит 70–75, эпидот 10–15, мартит + гематит 15–20, единичные знаки амфибола и турмалина) и немагнитную фракции (эпидот-клиноцоизит 90, циркон 3–5, золото, пирит, арсенопирит, шеелит, киноварь, барит, знаки граната, рутила, анатаза, апатита, титаниа и мусковита).

Методы лабораторных исследований

Частицы россыпного золота изучались на электронном микроскопе Tescan Vega III SBH (Чехия) с интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа Oxford X-Act в лаборатории R&D центре НорНикель ИГДГиГ СФУ (операторы Б.М. Лобастов и С.А. Сильянов). Фактическим материалом для исследований явились частицы россыпного золота, выбранные из шлихов лоткового опробования россыпей района (рис. 2, 3). Наблюдаемые структуры и неоднородности состава частиц охарактеризованы по микрофотографиям, полученных в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE). Значения яркости и контраста подбирались с условием наилучшей визуализации внутренней структуры зерен.

Структурно-морфологические агрегаты и состав аутигенного золота

Главные структурные особенности россыпного золота заключаются в наличии в них последовательно нарастающих друг на друга каемок по перифе-

рии частиц, которые образовались в зонах гипергенеза. Наиболее эффектно выглядят высокопробные каймы-ободки (ВКО) метасоматического замещения периферии обломочных частиц, окружающие реликтовые ядра частиц. Менее приметны каймы и наросты нового, собственно аутигенного золота, отложившиеся на ВКО обломочных частиц непосредственно в россыпи (рис. 2). Кроме этого, встречаются каймы техногенной амальгамы, развитые на частицах, в случае использования ртути при ранних отработках россыпи. Техногенно-биогенное золото представлено спутанно волокнистыми агрегатами. Агрегаты аутигенного золота обычно ассоциируют с пленками гидроксидов железа на кластогенном золоте (рис. 3) и пористой, микрозернистой смесью гидроксидов железа, гидрослюдистых глинистых минералов, серпентинохлорита, кварца и пылеватого золота (в практике называемых лимонитовыми «сухарями»).

Каймы аутигенного золота. Собственно аутигенное (новое) золото часто отмечается в виде тонкой (от десятых долей до нескольких микрометров) ободочки на внешней поверхности метасоматической высокопробной каймы. Аутигенная кайма золота развивается только на метасоматической высокопробной, и, по нашему мнению, их образование генетически связано.

Внутренняя часть аутигенной каймы, примыкающая к ободочной зоне метасоматической ВКО, представляет собой микронной мощности криптозернистый агрегат, видимо, хемогенного осаждения металла. Внешняя граница каемок нового золота обычно микро- и даже криптозубчатая, с шиповидными, конусовидными и волосовидными микровыступами, ящичными и каньенообразными криптоуглублениями (рис. 2, а, б). Основание углублений является базисом каймы нового золота хемогенного и биогенного строения.

Почти постоянно в обрамлении частиц отмечаются чешуйчатые отростки, субпараллельные поверхности, а волосовидные отростки с раздувами плавно- и каленообразно изогнуты в направлении основания частицы. При обрастании частиц золота гидроксидами железа внешняя граница аутигенной каймы имеет пористое, «моховидное» строение, в лимонитовой среде на золотой подложке концентрируются «облачные» массы точечного и «моховидного» нового золота (см. рис. 1, а).

Пробность аутигенного золота по единичным анализам – 957–1 000 ‰ (табл. 1). В BSE изображениях электронного микроскопа граница между метасоматической ВКО и аутигенной каймами по их цветовым оттенкам надежно не выделяется.

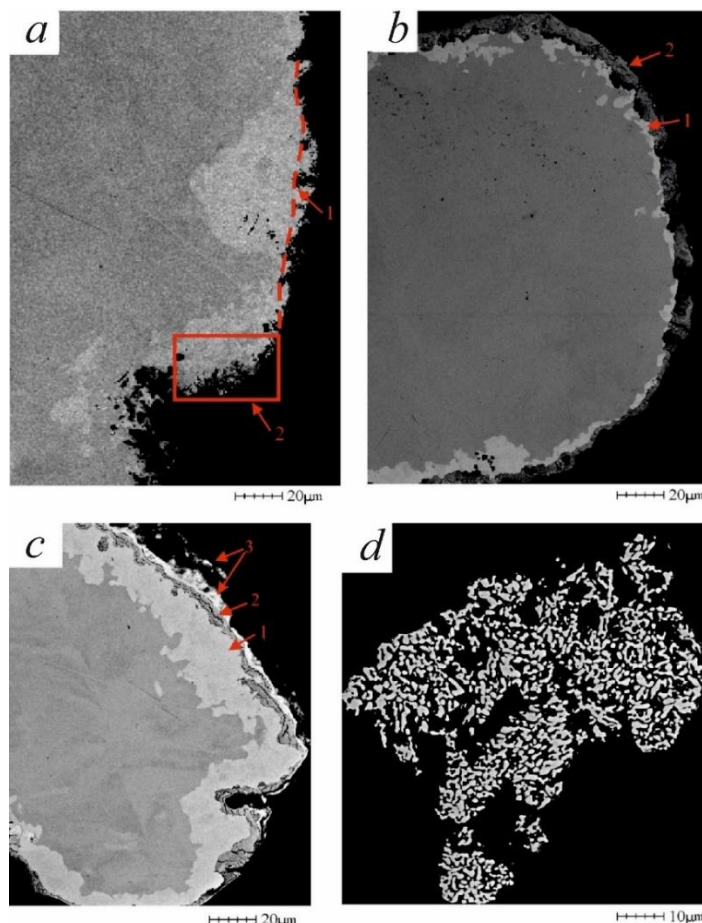


Рис. 2. Аутигенное золото

а – т.н. 411, р. Кундусуг. Кайма нового золота на высокопробной метасоматической: 1 – внутренняя граница нового золота; 2 – моховидное золото; б – р. Чёрная т.н. 573: 1 – высокопробная метасоматическая оболочка; 2 – кайма техногенной амальгамы золота; в – р. Чёрная, т.н. 573: 1 – метасоматическая высокопробная оболочка + реликты каймы аутигенного золота-I, ее внешняя граница сглажена растворением, участками сохранились шиповидные отростки аутигенного золота-I; 2 – кайма техногенной амальгамы; 3 – на поверхности амальгамы сегрегационная пленка аутигенного золота-II с шиповидными наростами биогенного золота-II; д – р. Чёрная, т.н. 573: спутанно-волокнистый пористый агрегат техногенно-биогенного золота

Fig. 2. Authigenic gold

а – OP 411, r. Kundusug. Fringe of new gold on a high-grade metasomatic shell: 1 – internal boundary of new gold; 2 – moss-like gold; б – Chernaya River OP 573: 1 – high-grade metasomatic shell; 2 – fringe of technogenic gold amalgam; в – Chernaya River, OP 573: 1 – metasomatic high-grade metasomatic shell + relicts of authigenic gold-I fringe, its outer boundary smoothed by dissolution, spiky outgrowths of authigenic gold-I preserved in some areas; 2 – fringe of technogenic amalgam; 3 – segregation film of authigenic gold-II with spiky outgrowths of biogenic gold-II on the amalgam surface; д – Chernaya River, OP 573: entangled-fibrous porous aggregate of technogenic-biogenic gold

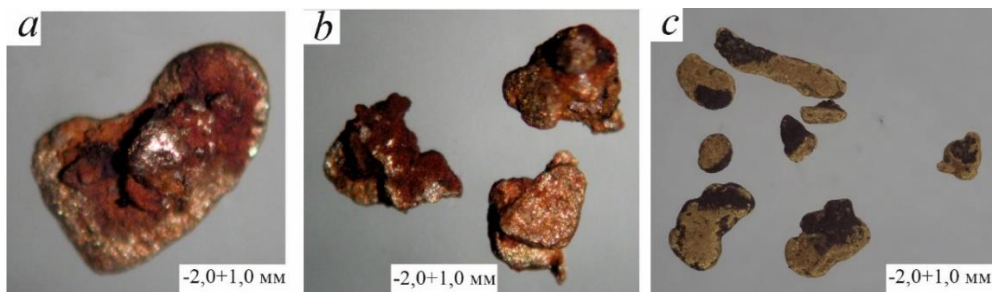


Рис. 3. Частицы россыпного золота с пленками гидроксидов железа

а – т.н. 573, р. Чёрная. Окатанная частица с контурным валиком по периметру, характерным для «эолового» золота [Никифорова и др., 2007]. Пленки и пористые землистые агрегаты гидроксидов железа в чашеобразном углублении частицы; б – (т.н. 573) и в (т.н. 1351-3) р. Чёрная. Фрагментарные пленки гидроксидов железа на поверхности частиц золота

Fig. 3. Placer gold particles with ferric hydroxide films

а – OP 573, Chernaya River. Rounded particle with an outline roll along the perimeter, characteristic of "aeolian" gold (Nikiforova et al., 2007). Films and porous earthy aggregates of ferric hydroxides in the bowl-shaped depression of the particle; б – (OP 573) and в (OP 1351-3), Chernaya River. Fragmentary films of ferric hydroxides on the surface of gold particles

Таблица 1

Химический состав золота в аутигенной кайме и ядре, мас. % (р. Кундусуг)

Table 1

Chemical composition of gold in the authigenic fringe and core, wt % (Kundusug River)

Номер частицы	Участок в частице	Содержание, %			Пробность, ‰
		Ag	Au	Σ	
411-1	Аутигенная кайма	—	100	100	1000
	Ядро	6,0	94,0	100	940
411-2	Аутигенная кайма	4,3	95,7	100	957
	Ядро	6,2	93,8	100	938
415-1	Аутигенная кайма	—	100	100	1000
	Ядро	6,64	93,36	100	937

Каймы техногенной амальгамы золота. В частях золота средней и высокой пробности техногенных отвалов прошлых лет отработки россыпей с использованием ртути при извлечении мелкого и тонкого золота в реках Мал. и Бол. Алгияк, Мал. и Бол. Билелиг и Чёрная отмечались каймы техногенной амальгамы, облекающие раннюю природную аутигенную кайму. Они имеют изменчивую толщину – от десятых долей до 40 мкм, большая часть периферии частиц (80–85 % периметра) имеет толщину 20–30 мкм; хрупкое, рыхлое, микропористое строение (см. рис. 2, b, c). Амальгама золота трещиноватая и имеет хрупкую консистенцию, так как морфология трещин зубчатая с резкими, каленообразными перегибами. Обломочные фрагменты остроереберные. Их ориентировка субпараллельная и поперечная границам кайм.

Внешняя граница – прямолинейно-овальная или слабо пологоволнистая. Морфология контакта пленки

техногенной амальгамы с обломочной частицей более причудливая (унаследующая реликтовый узор поверхности пленки аутигенного золота), чем внешняя поверхность. Следует отметить, что исходная ртуть при смачивании поверхности природной каемки аутигенного золота растворяла волосовидные и чешуйчатые наросты нового золота, сглаживая ее поверхность. При микронной толщине амальгамы шиповидная биогенно-аутигенная морфология поверхности сохраняется, видимо, количество растворяемого золота в ртути ограничено. Внутреннее строение каемок амальгамы золота микрозернистое, судя по её фельзитоподобному строению обособлений разной интенсивности окраски BSE изображений, с размером зерен десятые и сотые доли микрона. По составу кайма амальгамы неоднородная, определяются фазы с различным содержанием Hg, при отсутствии других элементов-примесей. Проба амальгамы золота – 875–949 ‰ (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав золота в зонах амальгамы высокопробной каймы и ядра, мас. % (р. Черная)

Table 2

Chemical composition of gold in amalgam, high-grade fringe and core zones, wt % (Chernaya River)

Номер частицы	Участок частицы	Содержание, %				Пробность, ‰
		Hg	Ag	Au	Σ	
573-1	Кайма амальгамы	4,81	0,04	95,15	100	951
	—«—	5,04	—	93,66	98,69	949
	Высокопробная кайма	—	—	100	100	1000
	Ядро	—	16,73	84,65	101,39	834
	—«—	—	16,52	84,3	100,82	836
573-2	Кайма амальгамы	10,19	—	90,42	100,61	898
	Высокопробная кайма	—	1,22	98,78	100	987
	Ядро	—	16,2	84,76	100,96	839
573-3	Кайма амальгамы	4,75	—	95,25	100	952
	Высокопробная кайма	—	—	100	100	1000
	Ядро	—	13,97	86,03	100	860
573-4	Кайма амальгамы	4,87	—	95,13	100	951
	Высокопробная кайма	—	—	100	100	1000
	Ядро	—	4,47	95,53	100	955
573-5	Кайма амальгамы	6,51	—	93,49	100	934
	—«—	5,31	—	94,69	100	947
	Высокопробная кайма	—	—	99,46	99,46	1000
	Ядро	—	10,87	89,6	100,77	891
573-6	Кайма амальгамы	9,5	—	90,5	100	905
	Высокопробная кайма	—	1,14	98,86	100	989
	Ядро	—	6,79	91,94	98,74	931

Граница между фазами размытая, ввиду мелких их размеров. Сегрегационные прожилки, гнезда внутри амальгамы и сегрегационные пленки самой внешней части каймы амальгамы золота (см. рис. 2, с) характеризуются повышенными концентрациями (20–25 %) Hg. В фельзитоподобной массе амальгамы золота иногда отмечаются «взвешенные» обрывки фрагментов биогенных наростов аутигенного золота.

Техногенно-биогенное ртутистое золото. Техногенно-биогенное ртутистое золото встречено в россыпи р. Чёрной. Распространенность этих агрегатов приурочена к участкам отвальных россыпей, которые сформировались после ранних периодов отработки с применением ртути при извлечении мелких фракций золота.

Подобные агрегаты, но только значительно меньшего диаметра проволочек золота наблюдались нами в пористых гидроксидах железа, примыкающих к каймам

техногенной амальгамы. Индивидуализированные образования представляют спутанно-проволочковидный пленочный агрегат золота по биомассе нитевидных бактерий, сцементирован охристо-землистой смесью гидроксидов железа, серпентино-хлорита, гидрослюдистых глинистых минералов и кварца. Отсутствие ориентировки проволочек золота дает в срезе агрегат сросшихся округлых, эллипсоидных и червеобразных форм зерен (рис. 2, d). Диаметр «проволочек» – 1–2 мкм. Приблизительная оценка объема металлической фазы в нерудной матрице составила около 30 %. Электронно-микроскопические снимки фиксируют фельзитоподобную структуру ветвистых телец Au-Ag-Hg состава. Аналитические измерения показывают следующие вариации концентраций главных элементов, %: 71,06–81,55 Au; 2,75–5,9 Ag; 15,1–23,4 Hg (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав техногенно-биогенного золота, мас. %

Table 3

Chemical composition of technogenic-biogenic gold, wt %

Спектр	Ag	Au	Hg	Сумма
91	3,53	75,75	20,72	100
92	3,47	78,48	18,05	100
93	4,29	78,92	16,79	100
94	4,36	79,14	16,51	100
95	3,69	81,14	15,17	100
96	5,91	71,35	22,74	100
97	5,52	71,06	23,42	100
98	4,84	76,02	19,15	100
99	4,56	78,43	17,01	100
100	4,66	77,37	17,97	100
101	2,75	81,55	15,70	100
102	4,33	78,82	16,85	100
103	5,54	78,18	16,27	100
104	4,56	77,94	17,50	100
105	5,12	78,37	16,51	100
106	4,14	78,48	17,37	100
107	4,19	79,01	16,80	100
108	4,38	79,31	16,31	100
109	3,10	76,55	20,35	100
110	4,02	78,4	17,58	100

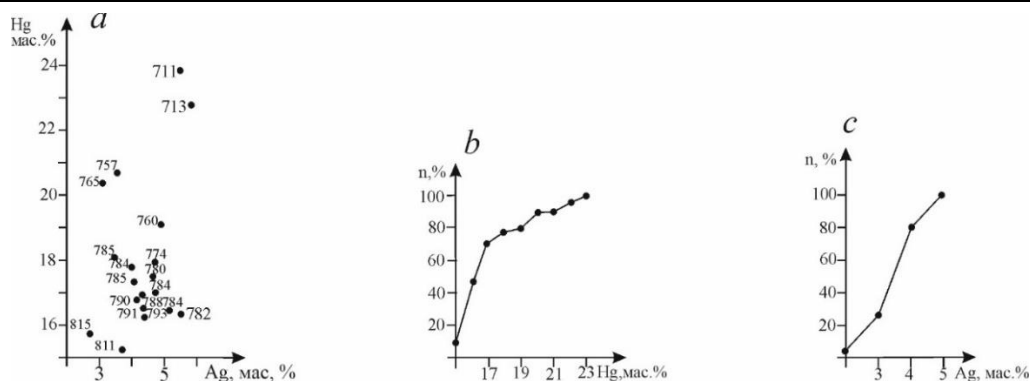


Рис. 4. Распределение примесей ртути и серебра в «волосовидных» частицах техногенно-биогенного золота
 а – соотношение концентраций Ag, Hg и пробыности; б, с – морфология куммулятивных кривых концентраций примесей Hg и Ag

Fig. 4. Distribution of mercury and silver impurities in hairlike particles of technogenic-biogenic gold
 а – Ag, Hg concentrations and fineness ratio; б, с – morphology of cumulative curves of Hg and Ag impurity concentrations

Между Hg и Ag в техногенном интерметаллиде Hg-Ag-Au состава отсутствует корреляция между концентрациями Hg и Ag и характерна возрастающая дискретность стехиометрических составов (см. рис. 4, а). И.Я. Некрасов [1991] отмечает, что сплавы с содержанием выше 5 % Hg, вероятно, полифазные. По данным эксперимента, растворимость ртути в золоте при 25 °C ниже 15 %.

Кумулятивная кривая распределения Hg в этой разновидности золота характеризуется двумя перегибами – в точках нарастающего процента 70 % – (Hg 17,9 %) и 90 % – (Hg 20,9 %) (рис. 4, б). Средний шаг прироста концентраций Hg в интервале содержания 15,1–17,9 % составил 0,04 %; в интервале 18–20,9 % – 0,15 % и %; в интервале 21–23,9 % – 0,3 %, что, вероятно, свидетельствует о прерывистом характере вхождения концентраций ртути в состав амальгамы.

В кумулятивной кривой распределения Ag в техногенно-биогенной амальгаме Hg-Ag-Au состава зафиксированы перегибы кумулятивной кривой в интервалах 18–19 и 20–21 % Hg (рис. 4, в). Средний шаг прироста концентрации серебра в минерале с содержанием Ag 2–3,9 % составил – 0,08 %, а в интервале 4–5,9 % – 0,03 %.

Обсуждение результатов

Присутствие аутигенного золота в россыпях является обычным, а не уникальным явлением. Аутигенное золото фиксируется в аллювиальных современных и древних россыпях, но не известно в элювиальных отложениях [Петровская, 1973]. Это золото образует самостоятельные гипергенные новообразования, нарастает на обломочные частицы золота, минералы с высокой удельной поверхностью и сорбционной способностью. Наросты аутигенного золота предпочтительно образуются на гипергенных метасоматических ВКО частиц россыпного золота и нередко сростания с техногенными рукотворными металлическими образованиями (гвозди, проволока, рыболовные крючки и др.) [Никифорова и др., 2020].

Морфология агрегатов новообразований гипергенного золота представляет бугорки, корочки, пленки, губчатые агрегаты на поверхности окатанных золотинок, мелкие кристаллики и их сростки в трещинах дегидратации, порах, кавернах бурых железняков и глинистых агрегатах осадочного материала россыпей. Каемки нового золота обычно не толще 1 мм. Нередко аутигенное золото вызывает склеивание и увеличение размера частиц. Характерная микроструктура для новообразованного золота – зернистая, спутанно-волосовидная, пористая, глобулярная, иногда кристаллическая; пробность – 1000 ‰ и ниже

[Петровская, 1941; Яблокова, 1965]. В россыпях рек Некля и Татарка И.В. Кузнецовой и П.П. Сафроновым [2021] охарактеризовано аутигенное микро- и нанозолото в сростаниях с глинистыми минералами, гидроксидами Fe, Mn и частицами углерода, а также нарастающие на гипогенное обломочное золото. Авторы статьи отмечают, что в россыпи происходит укрупнение золота за счет сростания частиц обломочного и аутигенного золота. На поверхности таких агрегатов отмечаются дендриты, сфероидальные, червеобразные и пластинчатые наноформы. Состав частиц благородного металла в сростках изменяется от собственно серебра, электрума, самородного золота различной пробы, содержащих примеси Cu, Zn, Hg.

Количество, аутигенного золота, по мнению Л.В. Фирсова [1985] и В.А. Наумова [2021], может составлять 15–40 %, а по отдельным золотинам 50–70 % от общей массы россыпного золота. Н.В. Петровская [1973], по своим наблюдениям и обобщенным сведениям в опубликованных работах, отмечает, что количество нового золота в россыпях доли процентов. При изучении шлихов мы часто фиксируем первые десятки процентов нового золота, но оно пористое и весовое его количество ничтожно. Р.А. Амосов с соавторами [2004] придерживаются взглядов Н.В. Петровской, что в россыпях находится ничтожное количество аутигенного золота. По нашим наблюдениям, количество аутигенного золота в россыпях района не превышает десятых долей процентов.

Рассматривая поведение золота в динамичном процессе литогенеза (выветривания, седиментогенеза, сингенеза, диагенеза и катагенеза), мы отмечаем, что происходит последовательное высвобождение частиц из первичных агрегатов, механическая обработка, растворение, отложение частиц гипогенного золота, метасоматическое и динамическое преобразование кластогенного материала, в том числе и золота В заключительную стадию сингенеза, при формировании золотоносного пласта, отлагается новое золото.

Глубокие преобразования эндогенного золота происходят уже на первой стадии литогенеза – при выветривании и окислении коренных руд. Например, в золотоносных корах выветривания Олимпиадинского месторождения Енисейского кряжа нами установлено золото в воднорастворимой, сорбированной, ферри-, сульфидной и самородной формах [Сазонов и др., 2019]. Крупные частицы реликтового золота, подвергаются растворению, выщелачиванию ассоциирующих минералов, образованию дисперсных ограниченных, шаровидных и дисковидных крипточастиц (рис. 5).

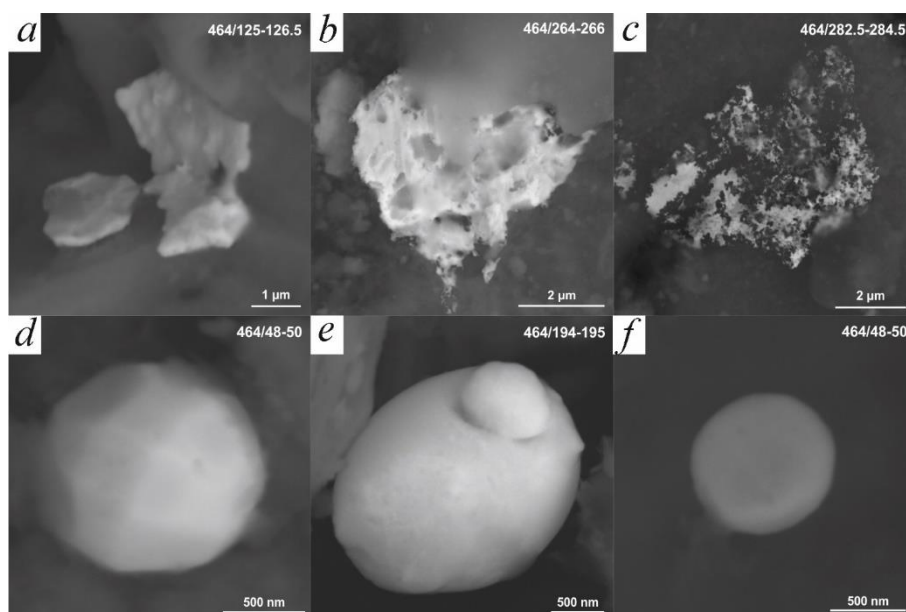


Рис. 5. Морфология самородного золота окисленных руд Олимпиадинского месторождения

a – реликтовое золото; b, c – губчатое золото; d – кристалл золота; e – глобулярное золото; f – дисковидное золото

Fig. 5. Morphology of native gold of oxidized ores from the Olimpiada deposit

a – relic gold; b, c – sponge gold; d – gold crystal; e – globular gold; f – disc-shaped gold

Перенос материала из области питания осуществляется в твердой, коллоидной, сорбированной и катионно-анионных комплексных формах. В стадию седиментогенеза в окислительной среде текущих вод растворенные в воде гидраты ($\text{Au}(\text{OH})_4$, AuOOH), галогениды, нитраты, нитриды, тиосульфаты золота обладают повышенной подвижностью [Антропова и др., 1980; Черепнин, Бернатонис, 1981; Иванов, 1997; Колпаков и др., 2010; Сазонов и др., 2019; Кузнецова, Сафонов, 2021]. Хемогенное золото, выщелоченное из сульфидов, и микронные глобулы и кристаллы, образовавшиеся при диспергации частиц в корах выветривания переносятся водными потоками. В.В. Колпаков с соавторами [2010] со ссылкой на Б.А. Воронникова свидетельствуют, что перенос золота в водах осуществляется в анионах – AuClOH^- и $\text{AuCl}(\text{OH})_2^-$; AuCl_2^- ; $(\text{Au}, \text{Ag})(\text{S}_2\text{O}_3)^{3-}$. По материалам О.И. Кальной с соавторами [2019], воды золотоносных рек Амыло-Систигхемского рудно-россыпного района близ нейтральные или слабо щелочные. Химический состав вод р. Билелиг – гидрокарбонатный магниевонатриевый, р. Алгияк – сульфатно-гидрокарбонатный натриевый; р. Чёрная – сульфатно-гидрокарбонатный натриевый. В незначительных количествах присутствуют хлориды, нитраты и нитриды, нефтепродукты и фенолы. Из катионов отмечается повышенное содержание железа. Общая минерализация вод незначительная – 0,110–0,166 мг/л. Согласно исследова-

нию С.М. Радомского и В.И. Радомской [2008], с поверхностными водами связана значительная миграция благородных металлов из районов добычи. По их наблюдениям, годовой вынос золота с территории Верхнего Приамурья составляет около 20 т. На долю коллоидного золота приходится менее 1 %, а на тонкое золото ($<0,1$ мм) – около 10 %. Главная масса золота в виде частиц крупнее 0,1 мм переносится в придонном материале, насыщенном обломочными частицами. Вода является вмещающей и транспортирующей средой, особенно в районах разработки полезных ископаемых. При добыче извлекаются золотины крупнее 0,1 мм, а более мелкие рассеиваются в окружающей среде. Процесс поступления золота в окружающую среду происходит естественным (природным) и техногенным путями. Питание рек осуществляется за счет разгрузки водоносных горизонтов (5–8 %) и за счет стока талых (15–20 %) и дождевых (75–80 %) вод (в климатической зоне Верхнего Приамурья). Сток поверхностных вод низкой минерализации осуществляется быстро. Основной загрязнитель – взвешенные вещества. Минерализация поровых вод в отложениях золотоносного пласта имеет более высокую концентрацию растворенных соединений, меньший окислительный потенциал, чем в водотоке, но видовой состав растворенных веществ, вероятно, прежний. В этой среде осуществляются электрохимические реакции, коагуляция коллоидов, сорбционное отложение взвесей.

В результате на обломочных частицах золота отмечаются криптозернистые, колломорфные и биогенные наросты аутигенного золота. Глинистые и углеродистые агрегаты, аутигенные «сухари» оксидов Fe и Mn, распространенные в золотоносных песках, содержат мельчайшие частицы аутигенного золота. В опубликованной литературе по геохимии золота отмечается, что активными осадителями золота в геологических средах являются гидроксиды железа и марганца, глинистые частицы, клеточные стенки золототфильных микроорганизмов, органические соединения (Me-метилные и Ph-фенольные группы) [Черепнин, Бернатонис, 1981; Иванов, 1997; Кузнецова, Сафонов, 2021].

По нашему мнению, в формировании пленок аутигенного золота и гидроксидов железа на обломочных частицах металла принимают участие и имеют определяющее значение электрохимические (гальванические) процессы соосаждения золота с гидратами железа. Коллоидные, а также криптозернистые частицы характеризуются определенным электрическим зарядом: положительно заряженные коллоиды – гидраты Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , $CaCO_3$, $MgCO_3$, а отрицательный заряд имеют коллоиды SiO_2 , глинистых, гумусовых, сульфидов полиметаллов, золота, серебра, платины. При этом зоны метасоматических высокопробных ободков частиц, формирующихся в гипергенных условиях, в связи выщелачиванием Ag и других подвижных элементов из поверхностных участков частиц, приобретают отрицательный заряд и свойства катода [Хертек, Сазонов, 2023]. Это стимулирует восстановление Au и Fe с образованием специфических «рубашек» на поверхности высокопробных каемок детритовых частиц. Таким образом, образование метасоматических ВКО и аутигенных наростов золота на частицах является взаимосвязанным процессом.

В обобщающей работе Н.В. Петровской [1973] по геологии, минералогии и генезису эндогенного и россыпного золота утверждается, что образование аутигенного золота происходило при участии бактерий, поэтому в литературе оно часто называется биохимическим. В научной и методической литературе по седиментологии отмечается, что в зонах окисления, коррах выветривания и бассейнах осадконакопления в процессе трансформации золота играют биогенные процессы [Справочное..., 1958; Наумов, 2021]. Количество бактерий особенно велико в самом верхнем слое осадка и резко уменьшается по мере углубления. Биогенное золото имеет нитчатые, спиральные и кокцидные формы, сходные с метафицированными цианобактериями [Куимова, 2004]. Известны находки псевдоморфоз золота по микробактериям и водорослям (микрофоссилии). Новообразования обволакивают органические остатки, но не замещают их.

G. Kerr с соавторами [2017] на россыпном месторождении золота Отаго на юге Новой Зеландии отмечали периферийные ободки перекристаллизации и наросты золота на поверхности частиц. Авторы исследования вслед за [Falconer, Craw, 2009; Reith et al., 2012; Rea et al., 2016; Stewart et al., 2017] связывают образование наростов с аутигенным бактериально-химическим осаждением металла из грунтовых вод после отложения обломочного материала и формирования осадка. Причем, G. Kerr отмечала несколько генераций аутигенных наростов. Наросты имеют микро- и нанометровый размер и представляют смесь комковатых, кристаллографических форм, червеобразных и пластинчатых агрегатов. Они часто отлагаются на глине в углублении и на поверхности частиц. Аутигенное золото мобилизуется из биопленок и серных комплексов на поверхности обломочных частиц золота в около нейтральной среде грунтовых вод. Выводы авторов не противоречат нашим наблюдениям.

Каймы техногенной амальгамы на частицах золота и спутанно-волосовидные агрегаты техногенно-биогенного золота образовались в отвальных россыпях в результате эксплуатационных работ, которые стимулировали вовлечение тонкообломочного, коллоидного, биогенного материала в техногенный седиментогенез (взвешивание частиц золотоносного пласта, перенос, поглощение ртутью, сорбцию золототфильными бактериями, отложение и преобразование в промышленных водах и техногенном осадке). Образование хемогенно-биогенных агрегатов золото-ртутных соединений являются свидетельством быстротечности процесса отложения аутигенного золота, измеряемого годами или десятилетиями. В нашем случае золотосодержащая ртутная оболочка приобрела твердую и хрупкую консистенцию и при усыхании-отвердении стала трещиноватой. Мелкие частицы золота и внешняя область обломочных частиц золота растворились в ртути с образованием полифазного агрегата техногенной амальгамы золота. Избыток растворенного золота против стехиометричного в составе амальгамы выделился в виде «роя» пылеватых частиц золота, а в результате их сегрегации преобразован в жилковидные и пленочные агрегаты в трещинах и на поверхности амальгамы.

Техногенно-биогенное золото в виде нитчатых ветвистых агрегатов, встреченных нами в техногенной россыпи р. Чёрной, является ярким примером участия биогенных процессов в формировании аутигенного золота. Р.А. Амосов [1995] подобные образования (спириллы) из россыпей Хабаровского края отнес к «мумифицированным» цианобактериям. При этом высокая степень сохранности этих «ажурных» образований, по свидетельству Р.А. Амосова, предполагает их прижизненное замещение золотом.

Он отмечает, что избыточная концентрация ртути вызывает появление «золотолюбивых» штаммов цианобактерий, которые, покрываясь золотым чехлом, защищаются от проникновения ртути в клетку.

Заключение

В россыпях золота Амыло-Систигхемского рудно-россыпного района Хемчикско-Куртушубинской металлогенической зоны Западного Саяна выявлены агрегаты аутигенного золота, представленные каймами, чешуйчатыми, криптоконическими и волосовидными наростами хемогенно-биогенного серебристого золота (937–1 000 ‰), каймами техногенной золото-серебряной амальгамы и спутанно-волоконистыми агрегатами техногенно-биогенного ртутистого золота. Каймы и чешуйчатые отростки аутигенного золота толщиной от долей до нескольких микрометров отлагаются на метасоматических ВКО. Внутренняя часть аутигенной каймы, примыкающая к ВКО, представляет собой криптозернистый агрегат хемогенного отложения, а внешняя – ажурными агрегатами «мумифицированных» золотом цианобактерий. Ртутистые техногенные аутигенные образования состоят из трех фаз, содержащих Hg в интервалах 4,75–6,51; 9,5–10,19 и 20–25 %; Ag – до 4,3 % в амальгаме и отсутствуют в спутанно-волосовидных агрегатах техногенно-биогенного золота.

Образование аутигенного золота происходит на стадии сингенеза, при формировании природного золотоносного пласта и образовании золотоносных обособлений в техногенных отвалах, разорванных значительным временным интервалом. Таким образом, аутигенных образований золота может быть несколько генераций, соответствующих периодам образования природной россыпи и техногенного переотложения не извлеченного россыпного металла при добычных работах. Массовое количество аутигенного золота в россыпях Амыло-Систигхемского рудно-россыпного района менее десятых долей процента.

Отложение аутигенного золота происходит из поровых вод, насыщающих осадок терригенного материала, в большей мере в верхней зоне золотоносного пласта.

Золото в поровых водах находится в виде ионов Au, коллоидов и комплексных соединений AuClOH_2^- и $\text{AuCl}(\text{OH})_2^-$; AuCl_2^- ; $(\text{Au}, \text{Ag})(\text{S}_2\text{O}_3)^{3-}$ и др. Отложение золота осуществлялось хемогенным способом, в значительной мере формированию агрегатов аутигенного золота способствовали золотофильные бактерии. Поэтому правомерно заключение Н.В. Петровской, что аутигенное золото россыпей является хемогенно-биогенным.

При коагуляции золотосодержащих коллоидов и восстановлении золота из слабо насыщенных истинных растворов существенную роль играли гальванические процессы.

По нашему мнению, в формировании положительного заряда на поверхности кластогенных частиц золота играло образование метасоматических ВКО в связи с метасоматическим очищением металла от примесей Ag и Cu. В результате гальванического процесса из поровых вод на положительно заряженной поверхности осаждались пленки гидроксидов железа и аутигенного золота.

Каймы техногенной амальгамы на частицах золота образовались в отвальных россыпях в результате эксплуатационных работ с применением ртути. Ртуть поглощала и аккумулировала мелкие взвешенные частицы золота в поровых водах, обволакивала кластогенный металл. Ртуть растворяла мелкие частицы и волосовидные тельца биогенного золота с образованием техногенных амальгам. В каймах нами установлены стехиометрические фазы амальгамы золота (I и II): I (Au 93,49–95,2 %, Hg (4,75–6,51 %)); II (Au 90,42–90,5 %, Hg (9,5–10,19 %) и III (Au 69,5–76,5 %, Ag (3,5–5,5 %), Hg (20–25 %)). Последняя (III) фаза представлена золото-серебряной амальгамой, образующей сегрегационные нитевидные прожилки и точечные выделения в первых двух фазах. Амальгама имеет хрупкую консистенцию и трещиноватую текстуру.

Техногенно-биогенные пористые спутанно-волоконистые агрегаты полифазного ртутистого золота, сцементированные охристой смесью гидроксидов железа, серпентино-хлорита, гидрослюдистых глинистых минералов и кварца, являются «мумифицированными» золотофильными бактериями.

Список источников

- Амосов Р.А. Онтогенез самородного золота России. М.: ЦНИГРИ, 1995. 151 с.
- Амосов Р.А., Долбня О.В., Лапина М.И. Поведение золота в зоне гипергенеза (минералогический аспект) // Золото Сибири и Дальнего Востока. Геология, геохимия, технология, экономика, экология. Тезисы Третьего Всероссийского симпозиума с международным участием г. Улан-Удэ 21–25 сентября 2004 г. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2004. С. 263–265.
- Антропова Л.В., Шуралева А.З., Фарфель Л.Ф., Айзенберг Ф.М., Приемов Г.А. Формы нахождения золота в горных породах // Методика и техника разведки: сб. тр. 1980. № 136. С. 5–21.
- Берзон Р.О. Составление карты прогноза на золото южного обрамления Сибирской платформы в м-бе 1 : 500 000. Часть II. Прогнозная карта территории Тув. АССР: отчет о науч.-иссл. работе. М.: ЦНИГРИ, 1983. 180 с.
- Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1 : 1 000 000 (новая серия). Лист N-46, (47)-Абакан. Объяснительная записка. Бармина С.А., Беззубцев В.В., Берзон Е.И. и др. СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 2000. 295 с.

- Иванов В.В.** Экологическая геохимия элементов: Справочник : в 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. М. : Экология, 1997. Кн. 5: Редкие d-элементы. 576 с.
- Кальная О.И., Аюнова О.Д., Прудников С.Г., Хертек Ч.М.** Геологические условия и оценка эколого-гидрохимического состояния водотоков в районе Алгякского золотоносного узла // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура : материалы III-й Междунар. науч.-практ. конф., посв. 25-летию ТувИКОПР СО РАН и 45-летию академической науки в Туве / под общ. ред. Г.Ф. Балакиной; отв. ред. В.О. Ооржак. Кызыл : ТувИКОПР СО РАН, 2019. С. 302–308.
- Колпаков В.В., Нестеренко Г.В., Жмодик С.М., Осинцев С.Р.** Новое золото в аллювиальных россыпях // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований : материалы Всерос. конф., посв. 100-летию Н. В. Петровской (1910–1991). М. : ИГЕМ РАН, 2010. Т. I. С. 261–263.
- Кузнецов В.Г.** Литология. Осадочные горные породы и их изучение : учеб. пособие для вузов. М. : Недра-Бизнесцентр, 2007. 511 с.
- Кузнецов В.Г.** Литология. Основы общей (теоретической) литологии : учеб. пособие для вузов. М. : Научный мир, 2011. 260 с.
- Кузнецова И.В.** Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселенгинского узла (Приамурье) : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Красноярск : СФУ, 2011. 21 с.
- Кузнецова И.В., Сафронов П.П.** Самородное золото кор выветривания Нижнеселенгинского золотоносного узла (Приамурье) // Литосфера. 2021. Т. 21, № 2. С. 239–255.
- Куимова Н.Г.** Биогенная минерализация золота в природе и эксперименте // Золото Сибири и Дальнего Востока. Геология, геохимия, технология, экономика, экология : тезисы Третьего Всероссийского симпозиума с международным участием г. Улан-Удэ 21–25 сентября 2004 г. Улан-Удэ : Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2004. С. 124–126.
- Наумов В.А.** Минерация, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Пермь, 2010. 39 с.
- Наумов В.А.** Оптическое определение компонентов осадочных пород. Руководство к лабораторным занятиям по изучению осадочных пород. 6-е изд., доп. Иркутск, 2021. 592 с.
- Некрасов И.Я.** Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М. : Наука, 1991. 312 с.
- Никифорова З.С., Прудников С.Г., Лебедев В.И., Ойдул Ч.К., Тулаева Е.Г.** О возможности выявления оловых россыпей золота на территории Тувы // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 1. С. 1–8.
- 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.
- Петровская Н.В.** Морфология и структура «нового» золота // Доклады АН СССР. 1941. № 32 (6). С. 424–426.
- Петровская Н.В.** Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). Новосибирск : Наука, 1973. 347 с.
- Прудников С.Г.** Формационно-геоморфологическая модель россыпеобразования в Туве и Западном Саяне // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества (научные труды ТувИКОПР СО РАН). Кызыл : Тув. ИКОПР СО РАН, 2005. С. 9–25.
- Радомский С.М., Радомская В.И.** Неравновесное распределение золота в поверхностных водах верхнего и среднего Приамурья // Наногеохимия золота : труды симпозиума, Владивосток, 17–18 апреля 2008 г. Владивосток : Дальнаука, 2008. С. 157–162.
- Сазонов А.М., Звягина Е.А., Сильянов С.А., Бабенков Д.Е.** Изучение форм нахождения золота в рудах и хвостах ЗИФ Олимпиадинского ГОКа // Горный журнал. 2019. № 4. С. 54–59.
- Справочное руководство по петрографии осадочных пород.** Л. : Госгеолтехиздат, 1958. Т. 1. 486 с.
- Фирсов Л.В.** Золотокварцевая формация Яно-Колымского пояса. Новосибирск : Наука, 1985. 217 с.
- Хертек Ч.М., Сазонов А.М.** Деформационные и метасоматические преобразования детритового золота при россыпеобразовании // Руды и металлы. 2023. № 4. С. 37–60.
- Черепнин В.К., Бернатонис В.К.** Вторичные процессы в сульфидных и золоторудных месторождениях. Томск : ТПИ, 1981. 90 с.
- Яблокова С.В.** Образование «нового» золота в некоторых россыпях Южной Якутии. Геология россыпей. М. : Наука, 1965. С. 152–155.
- Япаскурт О.В.** Литология. М. : Академия, 2008. 336 с.
- Falconer D.M., Craw D.** Supergene gold mobility: a textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand // Supergene Environments, Processes and Products. Economic Geology Special Publication. 2009. V. 14. P. 77–93.
- Kerr G., Falconer D., Reith F., Craw D.** Transport-related mylonitic ductile deformation and shape change of alluvial gold, southern New Zealand // Sediment. Geology. 2017. № 361. P. 52–63.
- Reith F., Stewart L., Wakelin S.A.** Supergene gold transformation: secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand // Chemical Geology. 2012. № 320. P. 32–46.
- Rea M.A., Zammit C.M., Reith F.** Bacterial biofilm on gold grains-implications for geomicrobial transformations of gold // FEMS Microbiol. Ecology. 2016. № 92 (6). P. 1–12.
- Silyanov S.A., Sazonov A.M., Zvyagina Y.A., Savichev A.A., Lobastov B.M.** Gold in the Oxidized Ores of the Olympiada Deposit (Eastern Siberia, Russia) // Minerals. 2021. V. 11, № 2. P. 1–21.
- Stewart J., Kerr G., Prior D., Halfpenny A., Pearce M., Hough R., Craw D.** Low temperature recrystallisation of alluvial gold in paleoplacer deposits // Ore Geology Reviews. 2017. № 88. P. 43–56.

References

- Amosov R.A. *Ontogenesis samorodnogo zolota Rossii* [Ontogenesis of native gold in Russia]. Moscow: TSNIIGRI, 1995. 151 p. In Russian
- Amosov R.A., Dolbnya O.V., Lapina M.I. *Povedenie zolota v zone gipergeneza (mineralogicheskii aspekt)* [Behavior of gold in the hypergenesis zone (mineralogical aspect)] // Gold of Siberia and the Far East. Geology, geochemistry, technology, economics, ecology.

- Theses of the Third All-Russian Symposium with international participation. Ulan-Ude. 21–25 September 2004, Ulan-Ude. Publishing House of the Buryatia Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. pp. 263–265. In Russian
- Antropova L.V., Shuraleva A.Z., Farfel L.F., Eisenberg F.M., Priyemov G.A. *Formy nakhozhdeniya zolota v gornykh porodakh* [Forms of gold occurrence in rocks] // Exploration methods and techniques: collected papers. Leningrad, 1980. No. 136. pp. 5–21. In Russian
- Berzon R.O. *Sostavlenie karty prognoza na zoloto yuzhnogo obramleniya Sibirskoy platformy v m-be 1 : 500 000*. [Compilation of the gold forecast map for the southern framing of the Siberian Platform in 1 : 500,000 scale]. Part II. Forecast map for the territory of the Tuva ASSR: Report on scientific and research work. Moscow, TSNIGRI, 1983. 180 p. In Russian
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (new series).]. Barmina S.A., Bezubtsev V.V., Berzon E.I. Scale 1 : 1,000,000 (new series). Sheet N-46, (47)-Abakan. Explanatory note. et al. St. Petersburg.: VSEGEI Map Reproduction Plant, 2000. 295 p. In Russian
- Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov* [Ecological geochemistry of elements: Handbook: in 6 books.]: Reference book: in 6 books / Edited by E.K. Burenkov. Moscow: Ecology, 1997. Book 5: Rare d-elements. 576 p. In Russian
- Kalnaya O.I., Ayunova O.D., Prudnikov S.G., Khertek Ch.M. *Geologicheskie usloviya i otsenka ekologo-gidrokhimicheskogo sostoyaniya vodotokov v rayone Algiyaskogo zolotonosnogo uzla* [Geological conditions and assessment of the ecological and hydrochemical state of watercourses in the area of the Algiyak gold-bearing cluster] // Regional economy: technology, economics, ecology and infrastructure: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference dedicated to the 25th anniversary of the Tuvanian Institute for Comprehensive Development of Natural Resources SB RAS and the 45th anniversary of academic science in Tuva / Generally edited by G.F. Balakina, edited by V.O. Oorzhak. Kyzyl: Tuvanian Institute for Comprehensive Development of Natural Resources SB RAS, 2019. pp. 302–308. In Russian
- Kolpakov V.V., Nesterenko G.V., Zhmodik S.M., Osintsev S.R. *Novoe zoloto v allyuvial'nykh rossypakh* [New gold in alluvial placers] // Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions of deposits formation, problems of applied research: Proceedings of the All-Russian Conference dedicated to the 100th Anniversary of N.V. Petrovskaya (1910–1991). Moscow: Institute of Geology and Earth Mechanics of RAS, 2010. Vol. 1. pp. 261–263. In Russian
- Kuznetsov V.G. *Litologiya. Osadochnye gornye porody i ikh izuchenie*: [Lithology. Sedimentary rocks and their study: Textbook for universities.]. Moscow: Nedra-Business Center, 2007. 511 p. In Russian
- Kuznetsov V.G. *Litologiya. Osnovy obshchey (teoreticheskoy) litologii*. [Lithology. Fundamentals of General (Theoretical) Lithology. Textbook. Manual for Universities.]. Moscow: Nauchny mir, 2011. 260 p. In Russian
- Kuznetsova I.V. *Geologiya, tonkodispersnoe i nanorazmernoe zoloto v mineralakh rossypey Nizhneselemdzhinskogo uzla (Priamur'e)*. [Geology, finely dispersed and nanosized gold in minerals of placers of the Nizhneselemdzhinsky node (Amur region)] Author's thesis. ...Cand. of Geol. and Miner. Krasnoyarsk: SFU, 2011. 21 p. In Russian
- Kuznetsova I.V., Safronov P.P. *Samorodnoe zoloto kor vyvetrivaniya Nizhneselemdzhinskogo zolotonosnogo uzla (Priamur'e)* [Native gold of weathering crusts of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing cluster (Amur region)] // Lithosphere. 2021. V. 21. No. 2. pp. 239–255. In Russian
- Kuimova N.G. *Biogennaya mineralizatsiya zolota v prirode i eksperimente* [Biogenic gold mineralization in nature and experiment] // Gold of Siberia and the Far East. Geology, geochemistry, technology, economics, ecology. Theses of the Third All-Russian Symposium with international participation. Ulan-Ude. 21–25 September 2004 Ulan-Ude. Publishing House of the Buryatia Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. pp. 124–126. In Russian
- Naumov V.A. *Minerageniya, tekhnogenez i perspektivy kompleksnogo osvoeniya zolotonosnogo allyuviya* [Minerageny, technogenesis and prospects for integrated development of gold-bearing alluvium] Author's thesis. Perm, 2010. 39 p. In Russian
- Naumov V.A. *Opticheskoe opredelenie komponentov osadochnykh porod* [Оптическое определение компонентов осадочных пород] Guide to laboratory classes on the study of sedimentary rocks. 6th edition, suppl. Irkutsk, 2021. 592 p. In Russian
- Nekrasov I.Ya. *Geokhimiya, mineralogiya i genezis zolotorudnykh mestorozhdeniy* [Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits] Moscow. Nauka, 1991. 312 p. In Russian
- Nikiforova Z.S., Prudnikov S.G., Lebedev V.I., Oidup Ch.K., Tulaeva E.G. *O vozmozhnosti vyyavleniya eolovykh rossypey zolota na territorii Tuvy* [On the possibility of identifying eolian gold placers in the territory of Tuva] // *Litologiya i poleznye iskopaemye* [Lithology and mineral resources]. 2007. No. 1. pp. 1–8. In Russian
- Nikiforova Z.S., Kalinin Yu.A., Makarov V.A. *Evolutsiya samorodnogo zolota v ekzogennykh usloviyakh* [Evolution of native gold in exogenous conditions] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2020. V. 61. No. 11. pp. 1514–1534. In Russian
- Petrovskaya N.V. *Morfologiya i struktura "novogo" zolota* [Morphology and structure of the "new" gold] Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, 1941. 32(6). Pp. 424–426. In Russian
- Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto (obshchaya kharakteristika, tipomorfizm, voprosy genezisa)* [Native gold (general characteristics, typomorphism, questions of genesis).]. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1973. 347 p. In Russian
- Prudnikov S.G. *Formatsionno-geomorfologicheskaya model' rossypeobrazovaniya v Tuve i Zapadnom Sayane* [Formational-geomorphological model of placer formation in Tuva and Western Sayan] // State and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Geoecology of natural environment and society (scientific papers of the Tuvanian Institute for Comprehensive Development of Natural Resources SB RAS). Kyzyl: Tuvanian Institute for Comprehensive Development of Natural Resources SB RAS, 2005. pp. 9–25. In Russian
- Radomsky S.M., Radomskaya V.I. *Neravnovesnoe raspredelenie zolota v poverkhnostnykh vodakh verkhnego i srednego Priamur'ya* [Nonequilibrium distribution of gold in surface waters of the upper and middle Amur region] // Gold nanogeochemistry: Proceedings of the symposium, Vladivostok, 17–18 April 2008. Vladivostok: Dalnauka, 2008. pp. 157–162. In Russian
- Sazonov A.M., Zvyagina E.A., Silyanov S.A., Babenkov D.E. *Izuchenie form nakhozhdeniya zolota v rudakh i khvostakh ZIF Olimpiadinskogo GOKa* [Study of gold occurrence forms in ores and tailings of the Olimpiada Mining and Processing Plant] // *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2019. No. 4. pp. 54–59. In Russian
- Spravochnoe rukovodstvo po petrografii osadochnykh porod* [Handbook of Petrography of Sedimentary Rocks]. Leningrad: Gosgeoltekhizdat, 1958. V. 1. 486 p. In Russian

- Firsov L.V. *Zolotokvartsevaya formatsiya Yano-Kolymского пояса* [Gold-quartz formation of the Yana-Kolyma belt]. Novosibirsk: Nauka, 1985. 217 p. In Russian
- Khertek Ch.M., Sazonov A.M. *Deformatsionnye i metasomaticheskie preobrazovaniya detritovogo zolota pri rossypeobrazovanii* [Deformational and metasomatic transformations of detrital gold during placer formation] // *Rudy i metally* [Ores and Metals]. 2023. No. 4. pp. 37–60. In Russian
- Cherepnin V.K., Bernatonis V.K. *Vtorichnye protsessy v sul'fidnykh i zolotorudnykh mestorozhdeniyakh* [Secondary processes in sulphide and gold ore deposits] Tomsk: TPI, 1981. 90 p. In Russian
- Yablokova S.V. *Obrazovanie "novogo" zolota v nekotorykh rosspyakh Yuzhnoy Yakutii* [Formation of "new" gold in some placers of Southern Yakutia]. *Geology of placers*. Moscow: Nauka, 1965. pp. 152–155. In Russian
- Yapaskurt O.V. *Litologiya* [Lithology]. Moscow: Academy, 2008. 336 p. In Russian
- Falconer D.M., Craw D. Supergene gold mobility: a textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand. In: Tittley, S.R. (Ed.), *Supergene Environments, Processes and Products*. Economic Geology Special Publication. 2009. V. 14. pp. 77–93.
- Kerr G., Falconer D., Reith F., Craw D. Transport-related mylonitic ductile deformation and shape change of alluvial gold, southern New Zealand. *Sediment. Geology*. 2017. No. 361. pp. 52–63.
- Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. Supergene gold transformation: secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand. *Chemical Geology*. 2012. No. 320. pp. 32–46.
- Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. Bacterial biofilms on gold grains-implications for geomicrobial transformations of gold. *FEMS Microbiol. Ecology*. 2016. 92(6). pp. 1–12
- Silyanov S.A., Sazonov A.M., Zvyagina Y.A., Savichev A.A., Lobastov B.M. Gold in the Oxidized Ores of the Olympiada Deposit (Eastern Siberia, Russia). *Minerals*. 2021. V. 11. No. 2. pp. 1–21.
- Stewart J., Kerr G., Prior D., Halfpenny A., Pearce M., Hough R., Craw D. Low temperature recrystallisation of alluvial gold in paleoplacer deposits // *Ore Geology Reviews*. 2017. No. 88. pp. 43–56.

Информация об авторах:

Хертек Ч.М., младший научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия; аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
E-mail: chayana83@mail.ru.

Сазонов А.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геологии, минералогии и петрографии, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
E-mail: Sazonov_am@mail.ru

Вклад авторов:

Хертек Ч.М., Сазонов А.М. – разработка концепции, исследование, написание черновика рукописи.

Сазонов А.М., Хертек Ч.М. – визуализация, редактирование финального варианта рукописи.

Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Khertek Ch.M., Junior Researcher, Tuva Institute of Integrated Development of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, Russia; postgraduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
E-mail: chayana83@mail.ru

Sazonov A.M. D. Sc. (Geol.-Miner.), Professor, Department for Geology, Mineralogy and Petrography, Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
E-mail: Sazonov_am@mail.ru

Authors' contribution:

Khertek Ch.M., Sazonov A.M. – conceptualization, research, writing the draft manuscript.

Sazonov A.M., Khertek Ch.M. – visualization, editing of the final version of the manuscript.

All authors approved the final version of the article before publication.

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 24.04.2024; одобрена после рецензирования 19.12.2024; принята к публикации 03.03.2025

The article was submitted 24.04.2024; approved after reviewing 19.12.2024; accepted for publication 03.03.2025