

УДК 553.2

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЕЙ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕСЕЛЕМДЖИНСКОГО ЗОЛОТОНОСНОГО УЗЛА (ПРИАМУРЬЕ)

Сафронов Петр Петрович¹,
psafronov@mail.ru

Кузнецова Инна Владимировна²,
kuzia67@mail.ru

¹ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток-22, пр. 100-летия Владивостока, 159.

² Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
Россия, 675000, г. Благовещенск, пер. Релочный, 1.

Изучение самородного золота в отработанных россыпях является актуальной задачей, поскольку скопившиеся отвалы являются, в силу значительных потерь тонкого золота при добыче, потенциальными источниками этого благородного металла.

Цель работы: выяснение вещественно-минерального состояния отработанных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья с приоритетным изучением фазового состава содержащегося в них самородного золота; выявление причин, обуславливающих гетерогенность состава золота.

Методы исследования: энергодисперсионный рентгеноспектральный анализ, проведенный на аналитическом растровом электронном микроскопе EVO 40XVP; на основе полученных данных о составах золота для их интерпретации были построены двойные и тройные диаграммы, а также гистограмма частоты встречаемости золотоносных фаз разной пробыности.

Результаты. Установлена значительная неоднородность по составу большей части образцов золота. Они состоят из фаз золота разной пробы (вплоть до наивысшей – 1000 ‰), а также амальгам, представляющих собой двух-, трех- и четырехкомпонентные твердые растворы золота с ртутью, свинцом и серебром (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). Среди амальгам выделен целый ряд интерметаллических соединений указанных элементов. Многофазовый состав самородного золота объясняется суммирующим воздействием на него нескольких независимых процессов: 1 – химического взаимодействия золота с ртутью при извлечении этого металла во время добычи; 2 – подобного взаимодействия золота с ртутью, но меньшей интенсивности, происходящего впоследствии непосредственно в отвалах; 3 – изменений состава золота в отвалах, связанных с воздействием на него приповерхностных водных растворов. Установлено, что в техногенных россыпях Нижнеселемджинского узла преобладают золотоносные фазы высокой пробы 900–1000 ‰, что свидетельствует о перспективности данных объектов в плане их повторной отработки на золото.

Ключевые слова:

Техногенные россыпи, самородное золото, амальгамы золота, интерметаллические соединения, диаграммы составов.

Введение

В последнее время изучению самородного золота из техногенных россыпей придается большое значение по нескольким причинам. Во-первых, хорошо известно, что после отработки россыпных месторождений в них еще остается значительная часть тонкого и мелкого золота. По некоторым данным, количество золота в техногенных отвалах страны составляет не менее 18 % от запасов россыпного золота [1]. Поэтому при дальнейшем совершенствовании технологий обогащения и извлечения благородного металла золотодобытчики могут вернуться к повторной разработке россыпных месторождений. Во-вторых, для отработки соответствующих технологий специалистам необходимо иметь общее представление о химическом составе золота, содержащегося в отвалах. Известно, что для извлечения благородного металла до 1988 г. широко использовалась ртуть, а это не могло не сказаться на составе попавшего в отвалы золота. Кроме того, такое золото за время его нахождения в отвалах, которое исчисляется годами или даже десятилетиями, могло претерпеть изменения, связанные с процессами, протекающими в зоне гипергенеза, включая дополнительную химическую

амальгамацию за счет остаточной ртути. Все это также могло существенно повлиять на химический состав золота. В-третьих, золото, которое в отвалах сохранилось по тем или иным причинам неизменным, несет совместно с ассоциирующими с ним рудными и породообразующими минералами генетическую информацию о коренном источнике, из которого оно попало в россыпь. Наконец, подобные исследования важны с точки зрения экологии окружающей среды, поскольку здесь мы имеем дело с ртутью – весьма токсичным химическим элементом периодической системы.

Краткая геологическая характеристика

Нижнеселемджинский золотоносный узел расположен в пределах Чагоян-Быссинской металлогенической зоны Приамурской золоторудной провинции [2] на правом берегу нижнего течения р. Селемджи (рис. 1). Для него, как и для других золотоносных узлов этой металлогенической зоны, характерно золотое оруденение преимущественно золото-кварцевого, золото-полиметаллического и золото-серебряного типов, а также россыпи с мелким и тонким золотом.

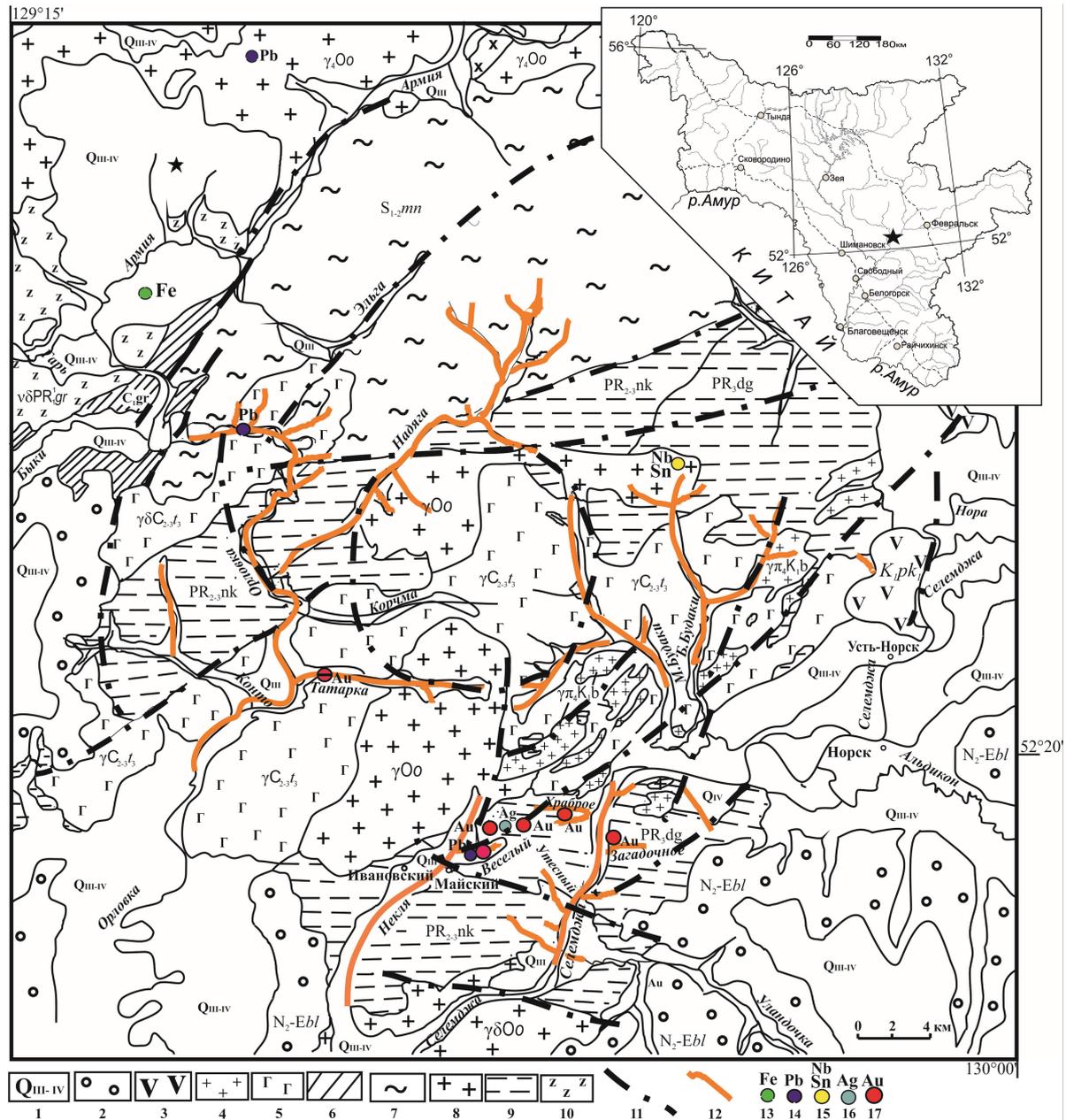


Рис. 1. Схематическая карта: географическое положение (отмечено на врезке), геологическое строение и рудоносность Нижнеселемджинского золотоносного узла (с использованием фондовых материалов В.Ф. Зубкова, 1980 и Д.Л. Выюнова, 2005). Условные обозначения: 1 – четвертичные образования (валуны, галька, гравий); 2 – неоген-четвертичные образования (глины, песок, галька, алевролиты); 3 – раннемеловые андезиты; 4 – раннемеловые гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры и диоритовые порфиры; 5 – граниты и гранодиориты среднего-позднего карбона; 6 – нижнекарбонные отложения (песчаники, известняки, алевролиты); 7 – силурийские отложения (песчаники, алевролиты, конгломераты, туфы); 8 – ордовикские граниты; 9 – верхнепротерозойские терригенно-карбонатные отложения (сланцы, известняки, песчаники); 10 – раннепротерозойские габбродиориты; 11 – разломы; 12 – россыпи золота; 13–17 – рудопроявления: 13 – железа, 14 – свинца, 15 – олова и ниобия, 16 – серебра, 17 – золота

Fig. 1. Schematic map: geographic position (marked off on the inset), geological structure and ore content of the Nizhneselemdzhinsk gold-bearing node (the materials of V.F. Zubkov, 1980 and D.L. Vyunov, 2005 were used). Conventional signs: 1 – Quaternary formations (boulders, pebble, gravel); 2 – Neogene-Quaternary formations (clays, sand, pebble, siltstones); 3 – Early Cretaceous granite-porphyrries, granodiorite-porphyrries and diorite porphyrites; 4 – granites and granodiorites of the Middle-Late Carboniferous age; 5 – Lower Carboniferous deposits (sandstones, limestones, siltstones); 6 – Lower Carboniferous deposits (sandstones, limestones, siltstones); 7 – Silurian deposits (sandstones, siltstones, conglomerates, tuffs); 8 – Ordovician granites; 9 – Upper Proterozoic terrigenous-carbonaceous deposits (shales, limestones, sandstones); 10 – Early Proterozoic gabbrodiiorites; 11 – faults; 12 – gold placers; 13–17 – ore occurrences: 13 – iron, 14 – lead, 15 – tin and niobium, 16 – silver, 17 – gold

В пределах Нижнеселемджинского золотоносного узла широко развиты россыпи золота, в основном аллювиальные, из которых с конца XIX в. добыто более 20 т благородного металла. На сегодняшний день практически все россыпи отработаны и переведены в разряд техногенных. Но работы по добыче благородного металла продолжают до настоящего времени. Основным источником золота для россыпей, скорее всего, являются не крупные золото-кварцевые жилы, а широко рассеянные по площади маломощные золотоносные кварцевые прожилки в осадочных породах, метаморфизованных в фации зеленых сланцев. Еще не выяснено, насколько широко распространена золотоносность кор выветривания в регионе, но, безусловно, такие коры являются одним из источников золота многих россыпей, а на некоторых объектах (например, ручей Веселый) служили непосредственным материалом для отработки.

Методика исследования

В данной работе представлены результаты детального исследования особенностей химического состава самородного золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья. Всего было отобрано 7 объемных проб (30–80 кг) по следующим объектам: р. Некля, руч. Веселый, р. Татарка, р. Надяга (руч. Безназванный, руч. Корейский, Косматый), р. Орловка (рис. 1). Самородное золото в виде отдельных зерен и сростков выделялось по заранее отработанной методике [3]. Его размеры колеблются от 200 мкм до 3 мм, но преобладают частицы размером 600–1000 мкм. Подготовленные образцы закреплялись на специальных столиках и изучались методом аналитической растровой электронной микроскопии (АРЭМ). Измерения составов проводились на микроскопе EVO 40XVP, оснащенный энергодисперсионным рентгеновским (ЭДР) спектрометром INCA Energy с беззотным полупроводниковым детектором. Методика измерений подробно изложена в работе [4], но в нашем случае ток электронного пучка подбирался несколько большим для лучшего статистического набора импульсов рентгеновского сигнала от образцов. В работе изучались не полированные образцы, как это принято в обычном электронно-зондовом микроанализе, а зерна в натуральном виде, что позволяло увидеть их морфологические особенности и проследить взаимоотношения золотоносной матрицы с другими минералами. При этом золотины не напылялись углеродом, поскольку они в большинстве своем являются токопроводящим материалом; кроме того, это позволило выявить природный углерод, который нередко присутствует в виде пленок на самих золотилах и зачастую содержится в минеральных образованиях, находящихся в сростках с благородным металлом. Нужно отметить, что выигрышным в методе АРЭМ является его высокая локальность, в особенности при использовании в качестве источника электронов ката из гексаборида лантана.

Результаты исследования

Так как в образцах отобранного для изучения золота присутствует порода в виде сростаний, а также дисперсных, мелких и крупных включений (рис. 2), то анализировались все составляющие зерен и сростков. Всего проанализировано 96 образцов, выполнено несколько сотен ЭДР анализов. В данной работе в основном представлены результаты, полученные по элементному составу непосредственно самого золота. Часть предварительных результатов была показана в [5].

В большей части образцов в золоте установлены ртутьсодержащие фазы, представляющие собой амальгамы двухкомпонентного (Au-Hg), трехкомпонентного (Au-Ag-Hg), (Au-Hg-Pb) и четырехкомпонентного (Au-Ag-Hg-Pb) составов. В 1/3 образцов ртуть не обнаружена, вероятно, такое золото, по каким-то причинам, не соприкасалось с этим реагентом ни при добыче, ни в отвалах. Матрицы золотины, как содержащие амальгамные фазы, так и не содержащие их, представляют собой либо твердые растворы золота с серебром (Au-Ag), либо золото высшей пробы (1000 ‰), либо сочетания того и другого. Но вместе с тем установлены образцы, состоящие только из амальгамных фаз. Это наиболее прореагировавшее золото с ртутью в условиях техногенеза.

Следует отметить, что в одной пробе обнаружена свободная ртуть с примесями Pb 2,40 и As 0,25 масс. %. Ртуть локализована в участке породы, сроставшейся с золотом, который состоит из смеси рудных и породообразующих минералов, содержащих Pb в форме сульфидов, сульфатов, карбонатов и алюмосиликатов. Установление ртути в свободном состоянии указывает на присутствие ее остаточных количеств в отвалах отработанных россыпей.

Что касается пород, ассоциирующих с изученным самородным золотом, то они, как правило, представляют собой тонкодисперсную смесь гидроалюмосиликатов, оксидов и гидроксидов Fe и Mn, углеродистого вещества (а иногда графита). Часто их состав каолинит-гидрослюдистый, хлорит-гидрослюдистый, лимонит-каолинитовый. В этих фрагментах пород установлены следующие минералы: каолинит, гетит, лимонит, кварц, адуляр, пирит, гидрогетит, романешит, галенит, оксид (или гидроксид) свинца, хлористый гидроксид Pb (мендипит?), медно-сурьмяно-хлористый гидроксид свинца (?), церуссит, англезит, пироморфит, U-Pb-карбонат-фосфатное соединение сложного состава и ряд др.

Следует отметить, что в результате гипергенных процессов произошло изменение структуры и состава ряда минералов. Так, например, галенит частично корродирован с образованием на нем микрорельефных участков из оксидов и гидроксидов свинца. Продукты преобразования галенита в виде корочек медно-сурьмяно-хлоридно-свинцового гидроксида встречаются на поверхности золотины. Нередко на золоте наблюдаются пятнистые

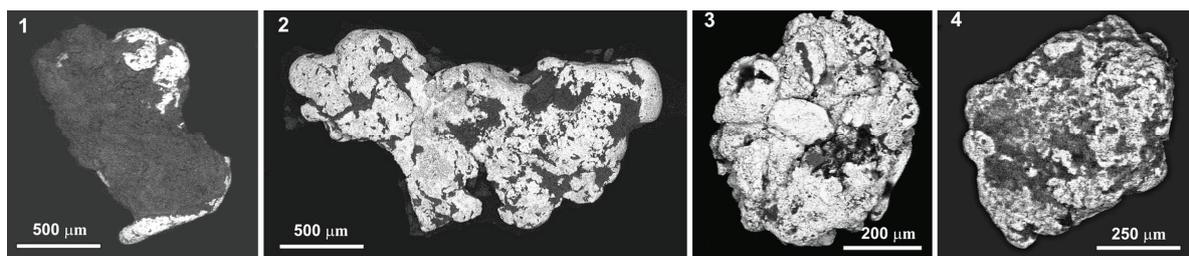


Рис. 2. Микроснимки типичных образцов самородного золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья. Светлое – золото, темное – порода. Снято в обратно-рассеянных электронах

Fig. 2. Micrography of native gold from technogenic placers of Nizhneselemdzhinsky ore cluster (Primurye). Gold is pale and rock is dark. The images were recorded with back-scattered electrons

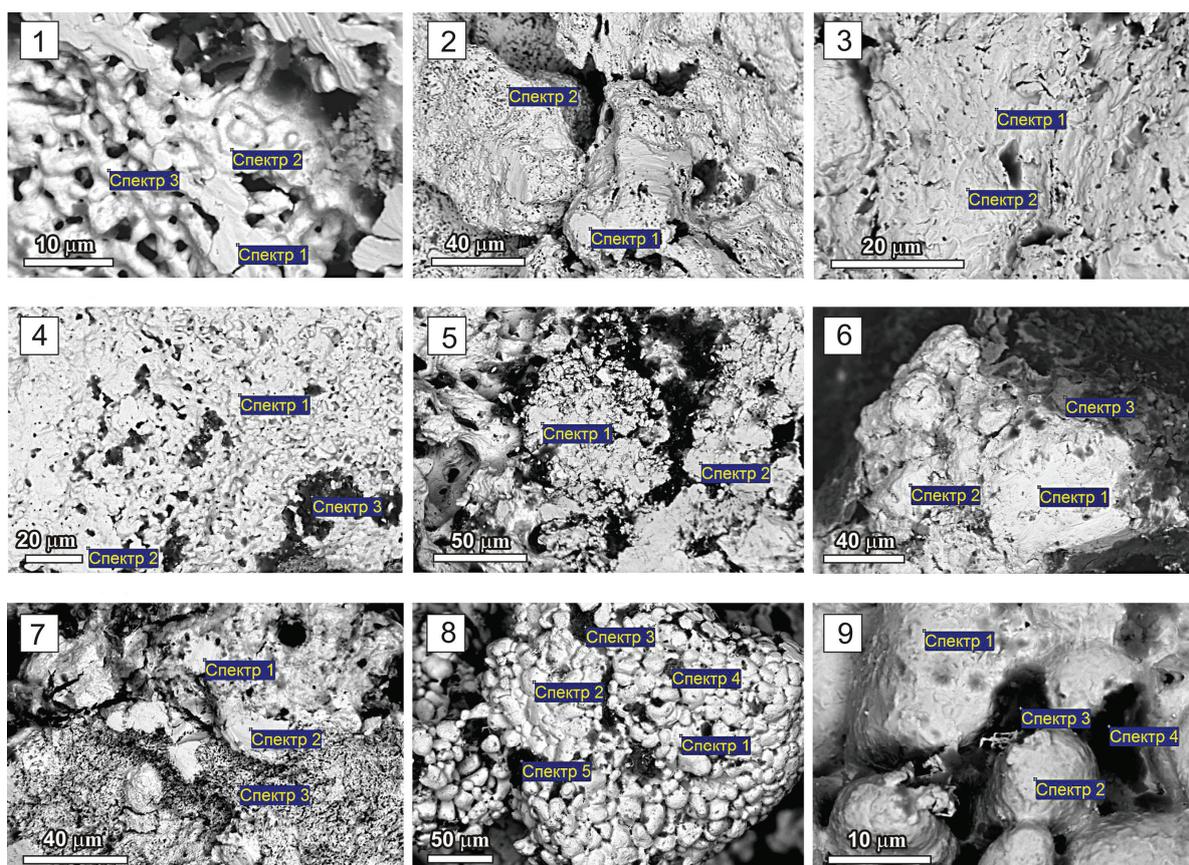


Рис. 3. Микроснимки девяти участков различных образцов самородного золота с точками (спектрами) проведенных ЭДР анализов: уч. 1 – образец R5-05; уч. 2 – обр. R6-04; уч. 3 – обр. R6-12; уч. 4 – обр. R6-01; уч. 5 – обр. R2-07; уч. 6 – обр. R3-01; уч. 7 – обр. R2-09; уч. 8 – обр. R4-05; уч. 9 – тот же обр. R4-05, но при большем увеличении. Снято в обратно-рассеянных электронах

Fig. 3. Microphotographs of nine areas of different samples of native gold with the points (spectra) of the performed EDX analyses: plot 1 – sample R5-05; plot 2 – sample R6-04; plot 3 – sample R6-12; plot 4 – sample R6-01; plot 5 – sample R2-07; plot 6 – sample R3-01; plot 7 – sample R2-09; plot 8 – sample R4-05; plot 9 – the same sample R4-05, but with greater magnification. The photographs were taken in the backward scattered electrons

выделения англезита ($PbSO_4$). Пирит, ассоциирующий с золотом, тоже часто преобразован в гидрогетит или лимонит.

Особо следует подчеркнуть, что в породе часто фиксируются примеси Au, Hg и Pb, причем в наибольших количествах Pb, который, скорее всего, находится в ней в виде соединений. Все это указывает на то, что в отвалах имели место химические реакции, связанные с различными процессами.

На небольшом примере, приведенном на рис. 3 и в таблице, показано, что золото в техногенных россыпях Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья по составу весьма разнообразно. Часть образцов (R6-04 и R5-05) отличаются высокой (~972 ‰) и наивысшей (1000 ‰) пробой, они имеют относительно однородный состав.

В этих образцах отсутствуют амальгамные фазы. В другом случае (обр. R6-12), при отсут-

Таблица. Состав образцов техногенного золота, показанных на рис. 3, масс. %

Table. Composition of the technogene gold samples shown in Fig. 3, wt. %

Образец/Sample	R5-05		R6-04		R6-12		R6-01		R2-07
№ участка на рис. 3/Plot in Fig. 3	1		2		3		4		5
Спектр/Spectrum	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 2
Элемент/Element	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 2
Au	100,00	100,00	97,45	97,03	88,78	95,55	84,91	100,00	64,30
Ag	–	–	2,55	2,97	11,22	4,45	2,93	–	1,90
Hg	–	–	–	–	–	–	4,18	–	9,81
Pb	–	–	–	–	–	–	7,98	–	23,99
Образец/Sample	R3-01		R2-09			R4-05			
№ участка на рис. 3/Plot in Fig. 3	6		7			8		9	
Спектр/Spectrum	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 3	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2
Элемент/Element	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 3	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2
Au	88,78	82,11	85,81	86,49	84,41	88,62	84,35	93,39	94,22
Ag	4,04	2,60	3,85	4,26	2,03	–	–	–	–
Hg	7,18	9,62	10,34	9,25	13,50	9,00	12,21	6,61	5,78
Pb	–	5,67	–	–	–	2,38	3,44	–	–

Примечание. В таблице не приводятся анализы (спектры) ассоциирующих с золотом пород.

Note. The analyses (spectra) of the rocks associated with gold are not given in the Table.

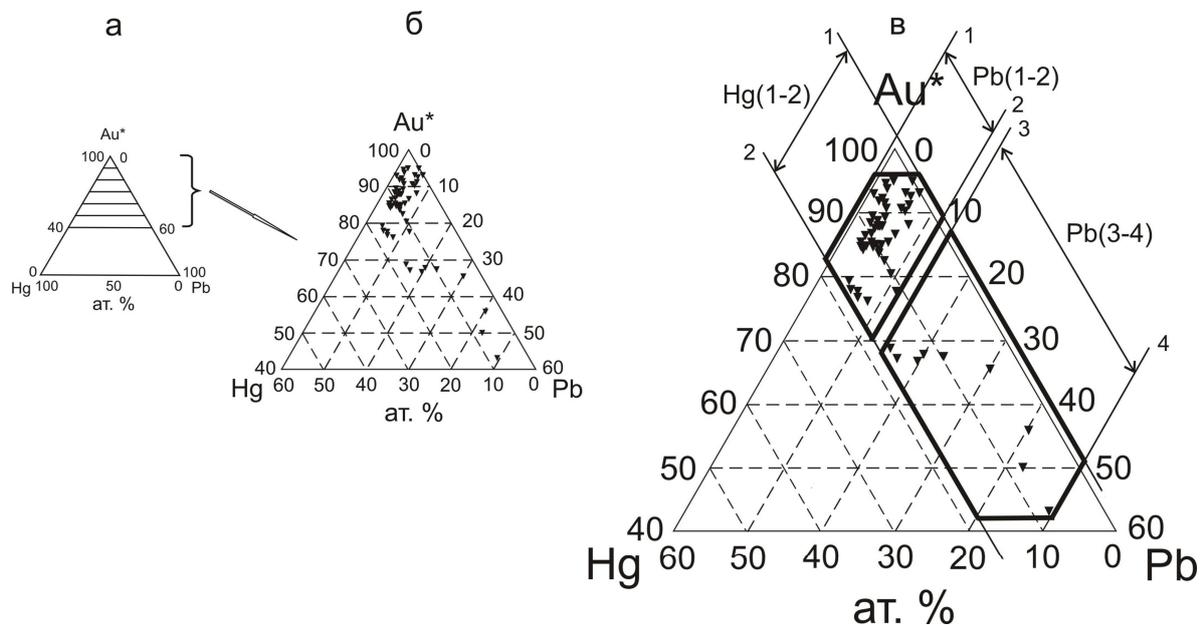


Рис. 4. Диаграмма составов амальгам трехкомпонентной системы Au*-Hg-Pb для техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья: а) схематическая тройная диаграмма Au-Hg-Pb; б) усеченная диаграмма с нанесенными составами амальгам; в) диаграмма с выделенными полями встречаемости составов: Hg (1-2) 0–17 ат. %; Pb (1-2) 0,5–11 %; Pb (3-4) 15–49 % (цифры округлены). Au*=Au+Ag+Cu+Zn+Sb, где Cu, Zn и Sb – примесные элементы, установленные в ряде анализов; содержание Ag, там где оно есть, колеблется в диапазоне 0,8–7,5 ат. %; в одном случае Ag=11,75 %

Fig. 4. Diagram of amalgam compositions of the Au*-Hg-Pb three-component system for the technogene gold of the Nizhne-selemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye: а) schematic triple Au-Hg-Pb diagram; б) truncated diagram with the plotted compositions of amalgams; в) diagram with the marked out fields of the composition occurrence: Hg (1-2) 0–17 at. %; Pb (1-2) 0,5–11 %; Pb (3-4) 15–49 % (numbers are round). Au*=Au+Ag+Cu+Zn+Sb, where Cu, Zn, and Sb are the impurity elements determined in some analyses; Ag content, where it was found, ranges within 0,8–7,5 at. %; in one case Ag=11,75 %

ствии амальгамных фаз, золото отличается гетерогенным составом – концентрации Au и Ag в соседних зонах существенно разнятся. Установлены образцы (R6-01 и др.), в которых, несмотря на то, что ряд участков в них состоят из амальгам, матрица Au имеет состав с пробой 1000 ‰. В золоте, которое прореагировало с ртутью

(обр. R2-07, R3-01, R2-09, R4-05 и R6-01), амальгамы обладают непостоянным составом. В этих фазах содержания ртути и свинца колеблются: Hg от 4 до 13, Pb от 0 до 24 масс. %. Таким образом, характерной особенностью золота техногенных россыпей является гетерогенность его химического состава.

Среди изученных амальгам количественно преобладают Pb-содержащие трехкомпонентные Au-Hg-Pb и четырехкомпонентные Au-Ag-Hg-Pb фазы. Наиболее представительные составы этих фаз нанесены на тройную диаграмму Au*-Hg-Pb (рис. 4). При этом Au объединено с Ag, поскольку концентрации последнего чаще всего составляют

несколько процентов. Из диаграммы видно, что концентрация золота в Pb-содержащих амальгамах варьирует от 43 до 95 ат. %, хотя преобладают фазы, содержащие Au от 77 до 95 ат. %. Содержания ртути не превышают 17 ат. % (поле Hg (1-2) на рис. 4, в). Концентрации свинца в амальгамах изменяются в более широком диапазоне – от

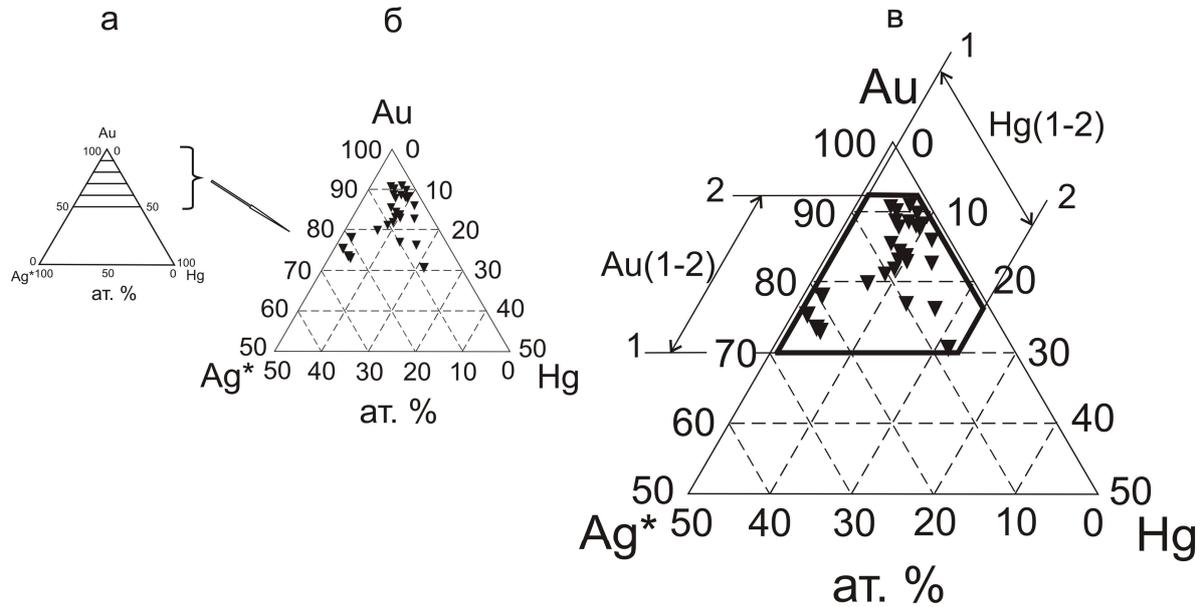


Рис. 5. Диаграмма составов амальгам трехкомпонентной системы Au-Ag*-Hg для техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья: а) схематическая тройная диаграмма Au-Ag-Hg; б) усеченная диаграмма с нанесенными составами амальгам; в) диаграмма с выделенным полем составов для Au (1-2) 71-91 ат. % и для Hg (1-2) 1,5-21 % (цифры округлены). $Ag^* = Ag + Cu + Sb$, где Cu и Sb – примесные элементы, установленные в ряде анализов

Fig. 5. Diagram of amalgam compositions of the Au-Ag*-Hg three-component system for the technogene gold of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye: а) schematic triple Au-Ag-Hg diagram; б) truncated diagram with the plotted compositions of amalgams; в) diagram with the marked out fields of compositions for Au (1-2) 71-91 at. % and for Hg (1-2) 1,5-21 % (numbers are round). $Ag^* = Ag + Cu + Sb$, where Cu and Sb are the impurity elements determined in some analyses

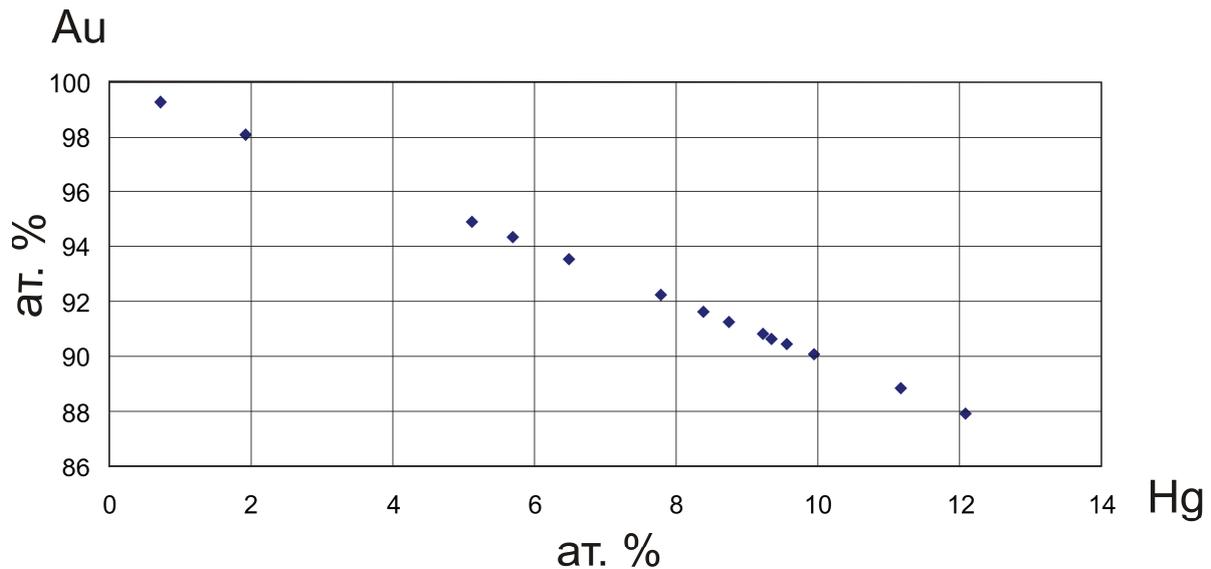


Рис. 6. Диаграмма составов амальгам двухкомпонентной системы Au-Hg для техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья

Fig. 6. Diagram of amalgam compositions of the Au-Ag two-component system for the technogene gold of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye

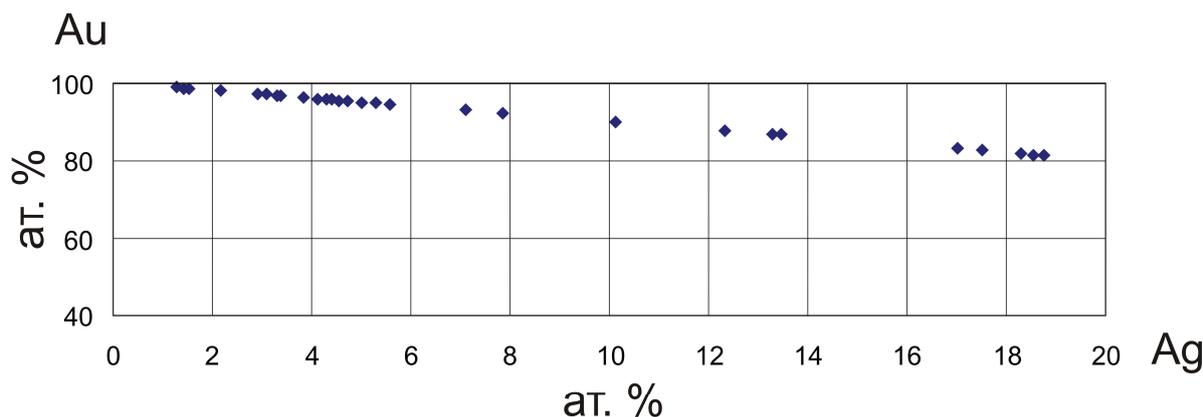


Рис. 7. Диаграмма составов твердых растворов золота с серебром для техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья (здесь не отражено золото пробы 1000 ‰)

Fig. 7. Diagram of compositions of solid solutions of gold with silver for the technogene placers of the Nizhneselemdzhnsky gold-bearing node of Priamurye (gold of the 1000 ‰ fineness is not shown here)

0,5 до 49 ат. %. При этом на диаграмме для этого элемента выделены два поля составов: поле Pb (1–2) – часто встречающиеся составы с концентрацией Pb от 0,5 до 11,2 ат. %; поле Pb (3–4) – реже встречающиеся фазы с концентрацией Pb от 14,8 до 49,2 ат. %.

Наиболее показательные составы амальгам другой трехкомпонентной системы Au-Ag-Hg отображены на тройной диаграмме (рис. 5). Они сосредоточены в основном в верхней части диаграммы (рис. 5, в). Диапазон концентраций Au (1–2) в данных фазах составляет 70,9–91,3 ат. %, а Hg (1–2) 1,5–21,2 %.

Составы амальгам двухкомпонентной системы Au-Hg, не содержащих серебра, представлены на рис. 6. Концентрация золота в таких амальгамах изменяется в диапазоне 87,9–99,3 ат. %, ртути – от 0,7 до 12,1 ат. %. Данные составы относятся, согласно диаграмме состояния системы золото–ртуть, приведенной в [6], к α -твердым растворам (α -тв. р.) Au-Hg на основе золота.

Золото, не подвергнутое воздействию ртути, зачастую является практически чистым, его проба 1000 ‰. Остальные фазы самородного золота представляют собой твердые растворы Au с Ag. Составы этих фаз отражены на диаграмме Au-Ag (рис. 7), из которой видно, что содержание Ag меняется от 1,5 до 19 ат. % (~0,7–11 масс. %), при этом значительная часть составов попадает в область концентраций Ag от 1,5 до 6 ат. %.

Обсуждение результатов

Основная часть данных ЭДР анализов представлена на диаграммах (рис. 4–7). Что касается двойных диаграмм (рис. 6 и 7), то они отражают составы твердых растворов Au с Hg и Au с Ag. Причем в первом случае ртутьсодержащие фазы, как уже было отмечено, являются α -твердыми растворами двухкомпонентной системы Au-Hg.

Сложнее обстоит дело с тройными диаграммами. Если на них выделить поля встречаемости нес-

колько по-иному (рис. 8, а, б), чем это сделано на рис. 4 и 5, то вырисовывается следующая картина.

На диаграмме Au*-Hg-Pb (рис. 8, а) выделяется несколько полей – 1, 2, 3, и точки 4, 5, 6. В поле 1 попадает наибольшее количество составов, которые варьируют около некоторого среднего состава, описываемого кристаллохимической формулой $(Au,Ag)_6(Hg,Pb)_1$. В связи с этим можно с большой долей вероятности утверждать, что данное поле отвечает условиям существования твердых растворов на основе интерметаллического соединения $(Au,Ag)_9(Hg,Pb)_1$. Составы фаз в поле 2 описываются кристаллохимической формулой $(Au,Ag)_4(Hg,Pb)_1$. Данное соединение схоже с интерметаллическим соединением $(Au,Ag)_4Hg_1$, обнаруженным в системе Au-Ag-Hg, только здесь, т. е. в системе Au*-Hg-Pb, в интерметаллиде присутствует Pb от 3 до 11 ат. %. В поле 3 составы соответствуют стехиометрическому соединению $(Au,Ag)_2(Hg,Pb)_1$. Состав 4 отвечает соединению $Au_4(Hg,Pb)_3$. Состав фазы 5 отвечает формуле $Au_1(Hg,Pb)_1$, а фаза 6 соответствует стехиометрии $Au_3(Hg,Pb)_4$. Природные соединения подобны фазам 5 и 6 установлены в работе [4].

В системе Au-Ag*-Hg (рис. 8, б) на диаграмме выделяются три поля составов, хотя в поле 2 – всего только две точки, а в поле 3 – четыре точки. Наибольшее количество обнаруженных фаз попадает в поле 1. Содержание ртути в этих фазах варьирует в относительно узком диапазоне концентраций, примерно от 5 до 13 ат. %, при среднем значении ~9 %. Это дает право предположить, что установленные фазы представляют собой твердые растворы на основе соединения $(Au,Ag)_6Hg_1$, о котором, так же как и о соединении $(Au,Ag)_9(Hg,Pb)_1$, практически нет сведений в литературе. По предположению авторов [7] из соединения Au_9Hg_1 могли состоять первичные амальгамные каймы, впоследствии разложившиеся. Кстати, формулы интерметаллических соединений для 1-го поля в системах Au*-Hg-Pb и Au-Ag*-Hg схожи, они рассчитываются на 10 атомов. Только в первом случае в состав

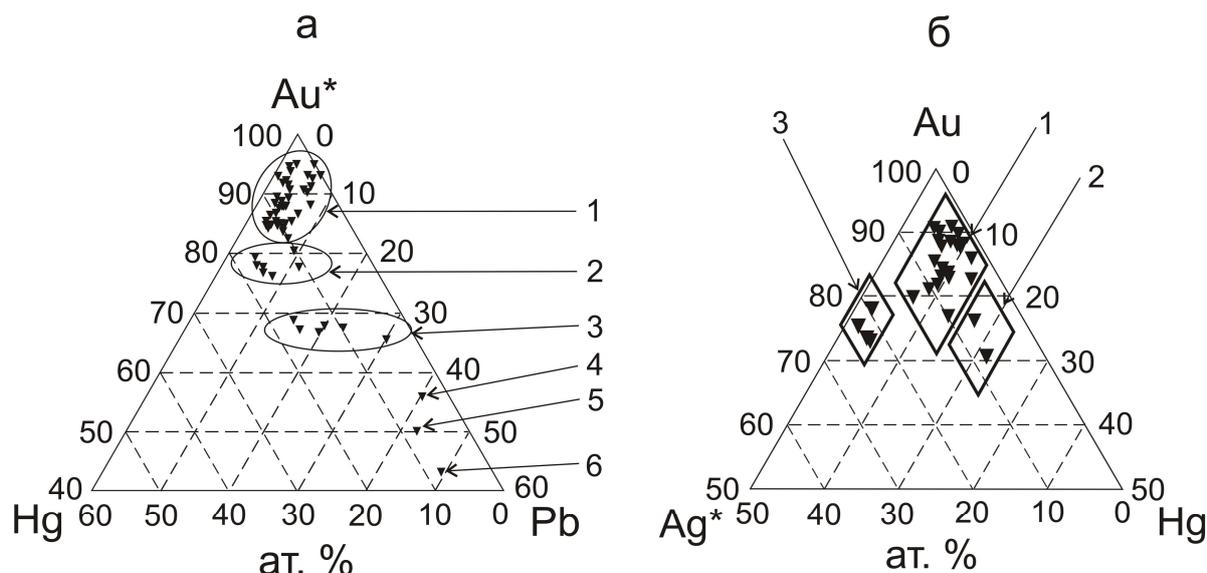


Рис. 8. Тройные диаграммы составов амальгам золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья: а – система Au*-Hg-Pb: 1 – поле существования твердых растворов на основе соединения $(Au, Ag)_5(Hg, Pb)_1$; 2 – поле составов с формулой $(Au, Ag)_4(Hg, Pb)_1$; 3 – поле составов с формулой $(Au, Ag)_2(Hg, Pb)_1$; 4 – фаза с составом $Au_4(Hg, Pb)_3$; 5 – фаза с составом $Au_1(Hg, Pb)_1$; 6 – фаза с составом $Au_3(Hg, Pb)_4$. $Au^* = Au + Ag + Cu + Zn + Sb$ для тех составов где присутствуют Ag и примеси Cu, Zn, Sb. Но в целом ряде составов примеси указанных элементов отсутствуют; б – система Au-Ag*-Hg: 1 – поле существования твердых растворов на основе соединения $(Au, Ag)_5Hg$; 2 – два состава близкие к стехиометрическому соединению $(Au, Ag)_4Hg$; 3 – поле твердых растворов Au-Ag*-Hg с низким содержанием ртути. $Ag^* = Ag + Cu + Sb$ для тех составов, где присутствуют примеси Cu, Sb. Но в целом ряде составов примеси указанных элементов отсутствуют

Fig. 8. Triple diagrams of gold amalgam compositions from the technogene placers of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye: а – Au*-Hg-Pb system: 1 – field of existence of solid solutions on the base of the $(Au, Ag)_5(Hg, Pb)_1$ compound; 2 – field of compositions with the $(Au, Ag)_4(Hg, Pb)_1$ formula; 3 – field of compositions with the $(Au, Ag)_2(Hg, Pb)_1$ formula; 4 – phase with the $Au_4(Hg, Pb)_3$ composition; 5 – phase with the $Au_1(Hg, Pb)_1$ composition; 6 – phase with the $Au_3(Hg, Pb)_4$ composition; $Au^* = Au + Ag + Cu + Zn + Sb$ for the compositions where Ag and the admixtures of Cu, Zn, and Sb are present. But in a large variety of compositions the admixtures of these elements are absent; б – Au-Ag*-Hg system: 1 – field of existence of solid solutions on the base of $(Au, Ag)_5Hg$ compound; 2 – two compositions close to the stoichiometric $(Au, Ag)_4Hg$ compound; 3 – field of the Au-Ag*-Hg solid solutions with low content of mercury. $Ag^* = Ag + Cu + Sb$ for the compositions where the Cu and Sb admixtures are present. But in a large variety of compositions the admixtures of these elements are absent

еще изоморфно входит Pb. Составы 2-го поля описываются кристаллохимической формулой $(Au, Ag)_4Hg_1$. Это техногенное соединение – аналог природной фазы, обнаруженной в образцах другого региона (в Приморье) [4]. К 3-му полю с наименьшими содержаниями ртути относятся амальгамы, находящиеся, скорее всего, в виде тонких пленок на поверхности золотин и являющиеся твердыми растворами Au-Ag-Hg.

Таким образом, в техногенном золоте установлены, наряду с практически чистым золотом и сплавами Au-Ag, многочисленные амальгамные фазы, представляющие собой двух-, трех- и четырехкомпонентные твердые растворы Au с Hg, Pb и Ag, а именно Au-Hg (α -тв. р.), Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb. Среди трех- и четырехкомпонентных составов выделены интерметаллические соединения со следующими кристаллохимическими формулами: $Au_1(Hg, Pb)_1$, $(Au, Ag)_2(Hg, Pb)_1$, $(Au, Ag)_4Hg_1$, $(Au, Ag)_4(Hg, Pb)_1$, $Au_3(Hg, Pb)_4$, $Au_4(Hg, Pb)_3$, $(Au, Ag)_9Hg_1$ и $(Au, Ag)_9(Hg, Pb)_1$. Кроме того, в отвалах обнаружена почти чистая ртуть (Hg).

Нужно подчеркнуть, что в ряде золотоносных месторождений (гипогенных и гипергенных), при-

сутствует эндогенное ртутистое золото. Кратко такая информация дается в [8]. Важные сведения о природных твердых растворах и интерметаллических соединениях в системах Au-Hg и Au-Ag-Hg приведены в [9, 10]. А в работе [11] при изучении «нового» экзогенного золота непосредственно установлены фазы Au_5Hg и Au_3Hg . Следует также добавить, что примеси природной ртути (от десятых долей процента до нескольких %) выявлены в золоте многих эндогенных месторождений Дальнего Востока [12]. Кроме того, в других регионах существуют золото-ртутистые эндогенные месторождения разных формационных типов [13]. Опираясь на обширные данные по изученности золота в различных золотоносных месторождениях, в которых нередко участвует ртуть, можно заключить, что в отвалах какая-то доля обнаруженных золото-ртутистых интерметаллидов может быть эндогенного происхождения.

Важными характеристиками самородного золота (рудного, россыпного и техногенного) являются его проба и частота встречаемости различной пробы. Проведенные расчеты пробы по формуле $Au/(Au+Ag^*) \times 1000$ (где $Ag^* =$ либо Ag, либо

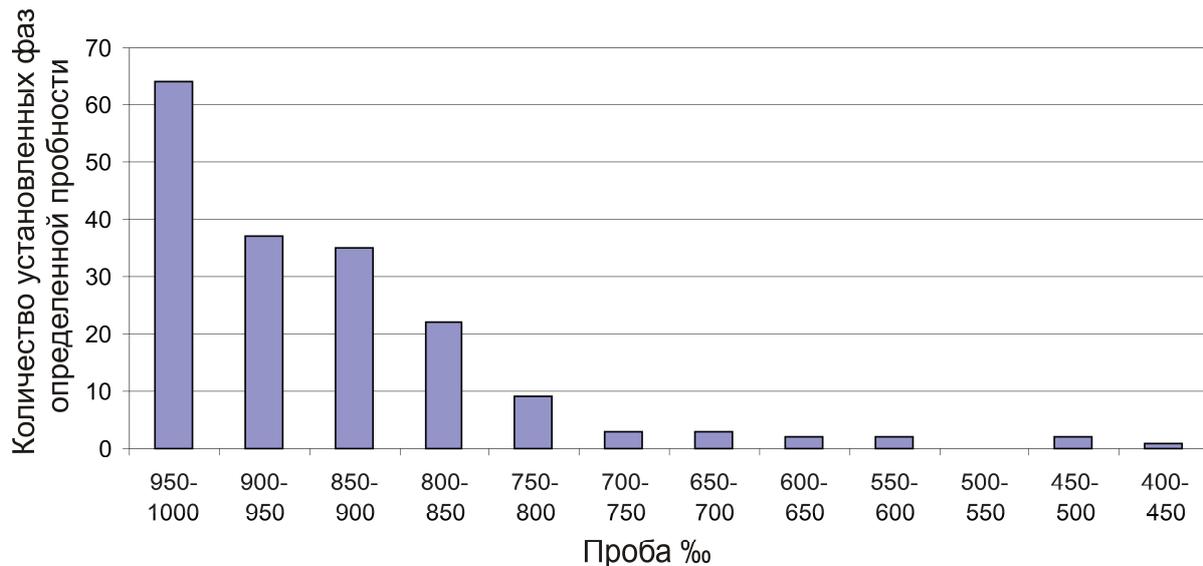


Рис. 9. Гистограмма частоты встречаемости (ось ординат) разной пробы золотоносных фаз (ось абсцисс) в самородном золоте техногенных россыпей Нижнеселемджинского узла (Приамурье)

Fig. 9. Histogram of frequency of occurrence (axis of ordinates) of gold-bearing phases of different fineness (axis of abscissas) in native gold of technogene placers of the Nizhneselemdzhinsky node (Priamurye)

Ag+Hg, либо Ag+Hg+Pb) для всех фаз техногенного золота как ртуть- и свинецсодержащих, так и свободных от этих элементов, и построенная гистограмма частоты встречаемости этих фаз разной пробыности (рис. 9) показывают, что в исследуемом золоте преобладают высокопробные фазы (950–1000 ‰). Сопоставимы между собой по встречаемости фазы с пробой двух других высокопробных интервалов: 900–950 и 850–900 ‰. А в сумме все эти фазы составляют ~ 75 % от общего количества техногенного золота. И только 25 % приходится на низкопробные (≤ 850 ‰) фазы.

По данным предшественников для первичных россыпей рассматриваемого района характерно высокопробное золото (891–950 ‰), оно составляет почти 98 %. И только не более 5 % приходится на низкопробное золото [8, 14]. То есть при формировании техногенных россыпей произошло не только увеличение в общей массе золота высокопробного (от 900 до 1000 ‰), но также увеличилось количество золота низкой пробы (≤ 850 ‰). По-видимому, в отвалах содержится золото различного генезиса, в том числе остаточное – плутоногенное и вулканогенное. Сростки золота с кварцем и высокая проба значительной части золота указывают на распространение на территории Нижнеселемджинского узла коренных источников малосульфидного золото-кварцевого формационного типа. Наличие в Au включений адуляра, наряду с золотомосностью халцедоновидного кварца, свидетельствуют о том, что часть золота поступала в россыпи за счет разрушения месторождений вулканогенного золото-серебряного типа [15]. Повышенная золотоносность галенита и сростки золота с галенитом и англезитом позволяют предположить присутствие в этом золотоносном узле про-

явлений золото-сульфидно-кварцевого или золото-полиметаллического минерального типа [2, 16]. А частая встречаемость весьма высокопробного золота в сростании с метасоматитами каолинит-гидрослюдистого, хлорит-гидрослюдистого, лимонит-каолинитового и др. составов указывает на то, что часть золота формировалась в низкотемпературных близповерхностных условиях на завершающей стадии гидротермально-метасоматического процесса или при химическом выветривании [17–20]. Наблюдаемые на золотилах каймы из пористого ажурного высокопробного (1000 ‰) благородного металла свидетельствуют о формировании в россыпях «нового» золота [2, 11].

Следует отметить, что особенностью техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья является наличие в его составе значительного количества Pb-содержащих амальгам. Это может быть следствием того, что различные минералы свинца, присутствующие в рудах и вмещающей породе, а также нередко сопровождающие золото в россыпях, частично или полностью разлагались в условиях гипергенеза с образованием подвижных комплексных соединений Pb, и, вероятно, свободных атомарных его форм. Последние, соединяясь с Hg и Au, образовывали Pb- и Hg-содержащие золотоносные фазы различного состава.

Большая часть самородного золота с амальгамными фазами, которое попало в отвалы, несомненно, является продуктом реакций благородного металла с ртутью, происходивших во время его добычи из россыпей. Меньшая доля подобного многофазного золота образовалась уже непосредственно в отвалах за счет взаимодействия остаточной ртути, находящейся там в контакте с частицами золота.

Кроме того, наличие такой ртути в отвалах могло также вызвать дополнительные изменения фазового состава уже ранее амальгамированного во время добычи золота и теперь присутствующего в отвалах.

Нельзя также сбрасывать со счетов влияние метеорных вод на минералы и обломки пород в золотоносных отвалах. Благодаря атмосферным осадкам (дожди, паводки, талые воды от снегов и пр.) на территории отвалов происходило смешение различных поверхностных вод, в число которых входили воды с сопредельных территорий, обогащенные органикой. Смешанные воды, имея повышенный окислительно-восстановительный потенциал, в течение длительного времени многократно пропитывали толщи отвалов, взаимодействуя с веществом последних, тем самым в отвалах формировались специфические грунтовые воды, а по существу, низкотемпературные дренирующие растворы. Под действием таких растворов в отвалах протекали сложные процессы, в частности растворение, выщелачивание, окисление, гидратация, замещение, гидролиз их компонентов. Свой вклад в эти реакции могли вносить также и бактерии [21–24]. На фоне сложного взаимодействия этих растворов с рудными минералами и обломками пород происходило растворение наиболее мелких и субмелких частиц золота, в том числе его амальгамных фаз, а также облагораживание поверхностных слоев более крупных частиц. При этом в раствор переходили Au, Hg и Pb, которые в дальнейшем, при благоприятных условиях, могли осаждаться на родственные частицы-подложки и за счет самоэпитаксии укрупнять последние, а также частично изменять их фазовый состав. Кроме того, эти элементы из растворов могли абсорбироваться породами и минералами, обладающими рыхлой структурой. В качестве подтверждения этому, в метасоматических породах, находящихся в тесных сростаниях с золотом, обнаружены, как уже ранее отмечалось, примеси указанных элементов.

Выводы

Выполненные исследования самородного золота техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья показывают:

1. Основная его масса имеет гетерогенный состав, обусловленный наличием различных фаз, включая амальгамы варьирующего состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. – 2008. – № 6. – С. 71–74.
2. Кузнецова И.В. Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселемджинского узла (Приамурье): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Красноярск. 2011. – 21 с.
3. Моисеенко В.Г. От атомов золота через кластеры, нано- и микроскопические частицы до самородков благородного металла. – Благовещенск: ДВО РАН. Амурское отделение РМО, 2007. – 187 с.

В индивидах золота, кроме фаз наивысшей пробы 1000 ‰ и твердых растворов золота с серебром, установлены многочисленные вновь образованные фазы амальгам, которые представляют собой двух-, трех- и четырехкомпонентные твердые растворы золота с ртутью, свинцом и серебром (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). Среди амальгам выделен целый ряд интерметаллических соединений указанных элементов – $Au_1(Hg,Pb)_1$, $(Au,Ag)_2(Hg,Pb)_1$, $(Au,Ag)_3Hg_1$, $(Au,Ag)_4(Hg,Pb)_1$, $Au_3(Hg,Pb)_4$, $Au_4(Hg,Pb)_3$, $(Au,Ag)_9Hg_1$ и $(Au,Ag)_9(Hg,Pb)_1$.

2. Выявленная многофазность состава техногенного золота объясняется суммарным результатом действия нескольких независимых процессов: 1) химического взаимодействия золота с ртутью во время его добычи в россыпях; 2) аналогичных взаимодействий, но меньшей интенсивности, в последующее время непосредственно в отвалах; 3) изменений состава части остаточного золота, связанных с воздействием на него в отвалах низкотемпературных растворов гипергенного происхождения.
3. Установлено, что в техногенных россыпях Нижнеселемджинского узла существенно преобладают золотоносные фазы высокой пробы 900–1000 ‰.
4. Составы самородного золота и ассоциирующих с ним пород отражают возможные формационные типы коренных источников для россыпей, присутствующих на этой территории.
5. Обнаружение в пробах, помимо золотоносных амальгам, свободной ртути указывает на высокое загрязнение этим элементом техногенных отвалов, что может способствовать процессам дальнейшей амальгамации находящегося там золота и усложнению его фазового состава. Наличие техногенной ртути в отвалах также негативно отражается на экологии тех районов, где производилась добыча благородного металла с ее применением.
6. При разработке новых технологий для более полного извлечения благородного металла из техногенных россыпей следует учитывать то обстоятельство, что золото в них, в отличие от исходного, как правило, имеет более сложный многофазовый и многокомпонентный состав.

4. Самородные металлы и интерметаллиды в аллювии мокрушинской площади таухинского террейна (юго-восточный Сихотэ-Алинь) / В.Т. Казаченко, С.Н. Лаврик, Е.В. Перевозникова, П.П. Сафронов, Н.В. Сосарева // Записки Российского минералогического общества. – 2014. – Ч. СХЛШ. – № 3. – С. 85–105.
5. Сафронов П.П., Кузнецова И.В. О фазовом составе самородного золота техногенных россыпей Приамурья // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: IV Всеросс. науч. конф. – Благовещенск, ИТиП ДВО РАН, 5–7 октября 2016. – Т. 1. – С. 116–119.
6. Вол А.Е., Каган И.К. Структура и свойства двойных металлических систем. Т. 3. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 815 с.

7. Наумов В.А., Наумова О.Б. Преобразование золота в техногенных россыпях // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 531–532.
8. Неронский Г.И. Типоморфизм золота месторождений Приамурья. – Благовещенск: АмурНЦ ДВО РАН, 1998. – 320 с.
9. Новгородова М.И. Кристаллохимия самородных металлов и природных интерметаллических соединений // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Кристаллохимия. – 1994. – Т. 29. – С. 1–154.
10. Gold Behavior in Supergene Profiles under Changing Redox Conditions: the Example of the Las Cruces Deposit, Iberian Pyrite Belt / L. Yesares, T. Aiglsperger, R. Saez, G.R. Almodovar, J.M. Nieto, J.A. Proenza, C. Gomez, J.M. Escobar // Econ. Geol. – 2015. – V. 110. – P. 2109–2126.
11. «Новое» золото в россыпях Приамурья / Г.И. Неронский, П.П. Сафронов и др. // Глубинное строение Тихого океана и его континентального обрамления. Ч. 3. – Благовещенск: АмурКНИИ ДВО РАН СССР, 1988. – С. 55–56.
12. Савва Н.Е., Шиялева Н.А., Алевская Н.Л. Топоминералогия конституционных особенностей самородного золота Нижне-Амурского россыпного района. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. – 173 с.
13. Наумов В.А., Борисенко А.С., Гущина Л.В. Ртутистое золото: критерий поиска коренных источников разных типов золотого орудинения и условия его образования. URL: <http://www.minsoc.ru/FilesBase/E2-2011-1-0.pdf> (дата обращения: 25.05.2016).
14. Неронский Г.И., Добрая В.Т. Особенности состава золота из россыпей Нижнеселемджинского района // Амурский крайвед. – Благовещенск: Амурское отд. Хабаровского книж. изд-ва, 1975. – С. 86–100.
15. Morphogenesis and composition of native gold in the Chelopech volcanic-hosted Au–Cu epithermal deposit, Srednogorie zone, Bulgaria / I.K. Bonev, T. Kerestedjian, R. Atanassova et al. // Mineralium Deposita. – August 2002. – V. 37. – Iss. 6. – P. 614–629.
16. Insights from Pb Isotopes for Native Gold Formation During Hypogene and Supergene Processes at Rich Hill, Arizona / G.D. Kamenov, E.B. Melchiorre, F.N. Ricker, E. DeWitt // Economic Geology. – November 1, 2013. – V. 108. – P. 1577–1589.
17. Hough R.M., Noble R.R.P., Reich M. Natural gold nanoparticles // Ore Geol. Rev. – 2012. – V. 42. – P. 55–61.
18. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon / A. Vishitia, C.E. Suha, B. Lehmann et al. // Journal of African Earth Sciences. – November 2015. – V. 111. – P. 1–13.
19. Asaad M.B. Moufti. Opaque mineralogy and resource potential of placer gold in the stream sediments between Duba and Al Wajh, Red Sea coast, northwestern Saudi Arabia // Journal of African Earth Sciences. – November 2014. – V. 99. – P. 1. – P. 188–201.
20. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil // Journal of South American Earth Sciences. – 2008. – V. 25. – P. 359–376.
21. Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation // F. Reith et al. // Geology. – September 1, 2010. – V. 38. – P. 843–846.
22. The biogeochemistry of gold / G. Southam, M.F. Lengke, L. Fairbrother, F. Reith // Elements. – October 1, 2009. – V. 5. – P. 303–307.
23. Shuster J., Southam G. The in-vitro «growth» of gold grains // Geology. – January 1, 2015. – V. 43. – P. 79–82.
24. Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. Bacterial biofilms on gold grains-implications for geomicrobial transformations of gold // FEMS Microbiology Ecology. – June 2016. – V. 92. – Iss. 6. – P. 1–12.

Поступила 20.01.2017 г.

Информация об авторах

Сафронов П.П., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Кузнецова И.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории наноминералогии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

UDC 553.2

SPECIAL FEATURES OF COMPOSITION OF NATIVE GOLD FROM TECHNOGENE PLACERS ON THE EXAMPLE OF THE NIZHNESELEMDZHINSKY GOLD-BEARING NODE (PRIAMURYE)

Petr P. Safronov¹,
psafronov@mail.ru

Inna V. Kuznetsova²,
kuzia67@mail.ru

¹ Far East Geological Institute Far East Branch Russian Academy of Sciences,
159, Prospect 100-letya of Vladivostok, Vladivostok-22, 690022, Russia.

² Institute of Geology and Nature Management of Far East Branch Russian Academy of Sciences,
1, Relochny Lane, Blagoveshchensk, 675000, Russia.

The study of native gold in the exhausted placers is an urgent task as the accumulated dumps are the potential sources of gold because of the significant loss of fine gold through the extraction.

The aim of the research is to elucidate the substance-mineral state of the exhausted placers of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node in Priamurye with primary study of phase composition of native gold enclosed in them; reveal the reasons responsible for heterogeneity of gold composition.

Methods of investigations: energy-dispersion X-ray spectral analysis carried out using the analytical raster electron microscope EVO 40XVP; to interpret the obtained data on gold compositions the authors have constructed the binary and triple diagrams for them and the histograms of the occurrence frequency of gold-bearing phases of different purity.

Results. The authors determined the significant composition heterogeneity of most of gold samples. They consist of gold phases of different purity (up to the highest one – 1000 ‰) and amalgams represented by two-, three-, and four-component solid solutions of gold with mercury, lead, and silver (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). The whole set of intermetallic compounds of these elements was recognized among the amalgams. The multiphase composition of native gold is explained by the summary action of several independent processes on it: 1 – chemical interaction of gold with mercury through the extraction of this metal during mining; 2 – similar interaction of gold with mercury but of less intensity that takes place later immediately in the dumps; 3 – changes of gold composition in the dumps due to the action of the near-surface water solutions on it. It was defined that the technogene placers of the Nizhneselemdzhinsky node are dominated by the gold-bearing phases of a high purity – 900–1000 ‰ that indicates the perspective repeated processing of these placers for gold.

Key words:

Technogene placers, native gold, gold amalgam, intermetallic compounds, diagrams of compositions.

REFERENCES

- Chanturia V.A., Vigdergauz V.E. Innovative technologies of processing technogenic mineral raw materials. *Gornyi journal*, 2008, no. 6, pp. 71–74. In Rus.
- Kuznetsova I.V. *Geologiya, tonkodispersnoe i nanorazmernoe zoloto v mineralakh rossyep Nizhneselemdzhinskogo uzla (Priamure)*. Dis. Kand. nauk [Geology, fine and nano-gold in minerals of placers in Nizhnesaldinsky node (the Amur region). Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2011. 21 p.
- Moiseenko V.G. *Ot atomov zolota cherez klasteri, nano- i mikroskopicheskie chastitsy do samorodkov blagorodnogo metalla* [From gold atoms through the clusters, nano- and microscopic particles to nuggets of precious metal]. Blagoveshchensk, Feb RAS, RMS Publ., 2007. 187 p.
- Kazachenko V.T., Lavrik S.N., Perevoznikova E.V., Safronov P.P., Kosareva N. Native metals and intermetallic compounds in alluvium mokrushinskaya area of taukhinsky terrane (South-East Sikhote-Alin). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2014, P. XLIII, no. 3, pp. 85–105. In Rus.
- Safronov P.P., Kuznetsova I.V. O fazovom sostave samorodnogo zolota tekhnogennykh rossyep Priamurya [On phase composition of native gold in technogenic placers of the Amur region]. *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoeniya prirodnykh resursov Vostochnoy Azii. IV Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya* [Issues of Geology and complex development of natural resources of the East Asia. IV All-Russian scientific conference]. Blagoveshchensk, 2016. Vol. 1, pp. 116–119.
- Vol A.E., Kagan I.K. *Stroenie i svoystva dvoynnykh metallicheskih sistem* [Structure and properties of double metallic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1976. Vol. 3, 815 p.
- Naumov V.A., Naumova O.B. Preobrazovanie zolota v tekhnogennykh rossyepakh [Gold transformation in technogenic placers]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 5, pp. 531–532.
- Neronsky G.I. *Tipomorfizm zolota mestorozhdeny Priamurya* [Typomorphism of gold of the Amur region deposits]. Blagoveshchensk, Feb RAS Publ., 1998. 320 p.
- Novgorodova M.I. Kristallokhimiya samorodnykh metallov i prirodnykh intermetallicheskih soedineny [Crystallochemistry of native metals and natural intermetallic compounds]. *Itogi nauki i tekhniki* [The results of science and technology]. *VINITI. Ser. Kristallokhimiya*, 1994, vol. 29, pp. 1–154.
- Yesares L., Aiglsperger T., Saez R., Almodovar G.R., Nieto J.M., Proenza J.A., Gomez C., Escobar J.M. Gold Behavior in Supergene Profiles under Changing Redox Conditions: the Example of the Las Cruces Deposit, Iberian Pyrite Belt. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 2109–2126.
- Neronsky G.I., Safronov P.P. «Novoe» zoloto v rossyepakh Priamurya [«New» gold in placers of the Amur region]. *Glubinnoe stroenie Tikhogo okeana i ego kontinentalnogo obramleniya: Trudy Mezhdunarodnogo Simpoziuma* [Proc. Int. Simp. Deep structure of the Pacific ocean and its continental framing]. Blagoveshchensk, 1988. Vol. 3, pp. 55–56.
- Savva N.E., Shilyaeva, N.A., Alaska N.L. *Topomineralogiya konstitutsionnykh osobennostey samorodnogo zolota Nizhne-Amur*

- skogo rossypnogo rayona* [Topomineralogy of constitutional peculiarities of native gold in lower Amur placer district]. Magadan, SVKNII FEB RAS Publ., 2004. 173 p.
13. Naumov V.A., Borisenko A.S., Gushchina L.V. *Rtutistoe zoloto: kriteriy poiska korennykh istochnikov raznykh tipov zolotogo orudineniya i usloviya ego obrazovaniya* [Lode gold: criteria of searching for indigenous sources of different types of gold mineralization and conditions of its formation]. Available at: <http://www.minsoc.r/E2-2011-1-0/> (accessed 25 May 2016).
 14. Neronsky G.I., Dobraya V.T. *Osobennosti sostava zolota iz rossy-py Nizhneselendzhinskogo rayona* [Features of gold from placers of Nizhneselendzhinsky district]. Blagoveshchensk, Amur Department of the Khabarovsk book Publ., 1975. pp. 86–100.
 15. Bonev I.K., Kerestedian T., Atanassova R. Morphogenesis and composition of native gold in the Chelopech volcanic-hosted Au–Cu epithermal deposit, Srednogorie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, 2002, vol. 37, no. 6, pp. 614–629.
 16. Kamenov G.D., Melchiorre E.B., Ricker F.N., DeWitt E. Insights from Pb Isotopes for Native Gold Formation During Hypogene and Supergene Processes at Rich Hill. *Arizona Economic Geology*, 2013, vol. 108, no. 1, pp. 1577–1589.
 17. Hough R.M., Noble R.R.P., Reich M. Natural gold nanoparticles. *Ore Geol. Rev.*, 2012, vol. 42, pp. 55–61.
 18. Vishitia A., Suha C.E., Lehmann B. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, vol. 111, pp. 1–13.
 19. Asaad M.B. Moutfi. Opaque mineralogy and resource potential of placer gold in the stream sediments between Duba and Al Wajh, Red Sea coast, northwestern Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, vol. 99, no. 1, pp. 188–201.
 20. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2008, vol. 25, pp. 359–376.
 21. Reith F. Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation. *Geology*, 2010, vol. 38, pp. 843–846.
 22. Southam G., Lengke M.F., Fairbrother L., Reith F. The biogeochemistry of gold. *Elements*, 2009, vol. 5, pp. 3–307.
 23. Shuster J., Southam G. The in-vitro «growth» of gold grains. *Geology*, 2015, vol. 43, pp. 79–82.
 24. Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. Bacterial biofilms on gold grains—implications for geomicrobial transformations of gold. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, vol. 92, no. 6, pp. 1–12.

Received: 20 January 2017.

Information about the authors

Petr P. Safronov, Cand. Sc., senior researcher, Far East Geological Institute Far East Branch Russian Academy of Sciences.

Inna V. Kuznetsova, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology and Nature Management of Far East Branch Russian Academy of Sciences.