

Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей – потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия)

И.В. Кузнецова^{1*}, П.П. Сафронов², Н.В. Моисеенко¹

¹Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН, Благовещенск, Россия

²Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

За десятки лет добычи и переработки руд и россыпей золота в мире образовалось огромное количество отходов в виде отвалов и хвостохранилищ, содержание ценных компонентов в которых позволяет рассматривать их как реальный дополнительный ресурс благородных металлов. Цель работы заключалась в том, чтобы установить изменения, произошедшие со временем в отвалах золотодобычи, и определить перспективность техногенных россыпей как потенциального источника благородного металла. Для исследования использовались методы аналитической растровой электронной микроскопии, минералогического и атомно-абсорбционного анализов.

На примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья выполнен сравнительный анализ минерального и гранулометрического состава первичных и отработанных россыпей. Показано, что при техногенезе изменяется минеральный состав месторождений, в том числе происходит разложение минералов свинца и железа с частичным восстановлением до самородного металла.

В техногенных россыпях кроме самородного золота установлены следующие минералы с высоким содержанием благородного металла: рутил, монацит, магнетит, металлический свинец, галенит, ильменит и циркон. Содержание свободного золота в отвалах составляет в среднем 190 мг/м³. Основное его количество (до 83%) относится к мелкому (< 0.5 мм).

Изучен химический состав самородного золота и ассоциирующих с ним пород. Установлено, что золото имеет многофазовый состав. Фазы в большинстве своем являются амальгамами золота и имеют двух-, трех- и четырехкомпонентные составы (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). До 30% золота техногенных россыпей отличается высокой пробой. Почти все самородное золото находится в тесных сростаниях с породообразующей матрицей различного состава: гидроалюмосиликатами, окислами и гидроокислами Fe, Mn и Pb, высокоуглеродистыми и углеродсодержащими образованиями и т.д. Под воздействием физико-химических и биохимических процессов в техногенных россыпях происходят различные преобразования самородного золота: очищение за счет выноса серебра, разрушение минералов-концентраторов золота, осаждение микро- и нанозолота на геохимических барьерах с формированием так называемого «нового» золота (от нанообразований до микро- и макроформ).

При эксплуатации техногенных россыпей следует учитывать, что рудные минералы в них отличаются повышенной концентрацией тяжелых металлов и радиоактивных элементов, золото имеет сложный многофазовый и многокомпонентный состав, и 3/4 его амальгамировано. Полученные данные дают дополнительную информацию для разработки технологий по переработке перспективных золотоносных техногенных россыпей.

Ключевые слова: техногенные россыпи, самородное золото, фазовый состав, амальгамы золота, проба золота

Для цитирования: Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В. (2019). Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей – потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия). *Георесурсы*, 21(1), с. 2-14. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.2-14>

Введение

Мировая история золотодобычи насчитывает не один век. На Дальнем Востоке России благородный металл начали извлекать из россыпей более 150 лет назад, уже в 1865 году был официально разрешён частный золотой промысел в Амурском крае. За десятки лет добычи и переработки руд и россыпей в мире образовалось огромное количество отходов в виде отвалов и хвостохранилищ. По некоторым оценкам (Чантурия, Вигдергауз, 2008) только в России к настоящему времени уже накоплено

12 млрд тонн отходов, содержание ценных компонентов в которых позволяет рассматривать их как реальный дополнительный ресурс благородных металлов. Ресурсный потенциал техногенных золотосодержащих объектов России оценивается во многие сотни тонн Au, что соответствует 55-60% от объемов добытого в стране золота. Так, по некоторым оценкам (Мирзеханова и др., 2016), в Республике Саха (Якутия) техногенного золота не менее 100-150 т, в Амурской области около 270 т. Таким образом, перспективы техногенных россыпных месторождений золота только юга Дальнего Востока России можно оценивать в объеме, сопоставимом с уже изъятими запасами.

При извлечении золота из первичных россыпей происходят его потери. Это может быть связано как с

*Ответственный автор: Инна Владимировна Кузнецова
E-mail: kuzia67@mail.ru

техническим несовершенством применяемого оборудования, что приводит к неполному вскрытию россыпи, так и с присутствием линз многолетнемёрзлых пород, из-за которых пропускаются отдельные блоки россыпей (Шило, 2000). Связанное золото слабо извлекается существующими технологиями, а при высоких содержаниях глинистых минералов происходит вынос тонкого золота вместе с ними в отвалы.

При совершенствовании технологий извлечения золота техногенные россыпи, несомненно, будут снова вовлекаться в отработку. В этой связи изучение минерально-вещественного состояния этих объектов и особенностей состава золота в них является актуальной задачей. Кроме того, подобные исследования важны с точки зрения экологии окружающей среды, поскольку десятилетиями для извлечения благородного металла (вплоть до 1988 года) в России, как и во всем мире, широко применялась ртуть. Она использовалась как на стадии доводки шлиха, так и для получения гравитационного концентрата за счёт полива шлюзов. Ртуть вместе с золотом поступала на доводочные устройства, а после выделения золота попадала в “хвосты” и сбрасывалась в хвостохранилища. Содержания ртути в подобных отвалах приисков и старательских артелей достигает нескольких килограммов на тонну (Ахметов, 2013). Хвостохранилища обычно расположены в понижениях рельефа (в долинах ручьёв и рек), и при изменении русел или с паводковыми водами материал, зараженный ртутью, вовлекается в речные долины и дальше с донными осадками достигает устья рек. Подобная тенденция наблюдается и в других странах, где активно шла золотодобыча (Alpers et al., 2005). В некоторых странах до сих пор продолжается добыча золота с использованием ртути. По данным К. Telmer в результате такой добычи в окружающую среду попадает от 650 до 1350 т ртути в год (Telmer, Veiga, 2008).

Помимо ртути, в зону аэрации выводятся связанные в минералах тяжелые металлы (Pb, Zn, As и т.д.) и радиоактивные элементы (U, Th) (Соболев и др., 1997; Тарасенко и др., 2017; Tarasenko et al., 2017a, 2017b). Сочетание водно-воздушного воздействия приводит к разрушению многих минералов, что сопровождается увеличением концентрации этих элементов в природной среде.

Вещество отработанных россыпей (отвалов) представляет собой механическую смесь различных пород, из которых состояли первичные россыпные месторождения золота. Это аллювиальные, делювиальные, элювиальные и пролювиальные отложения. Следует отметить, что каждое техногенное месторождение, также как и первичная россыпь, имеет свои индивидуальные характеристики, которые должны обязательно учитываться при выборе технологии его отработки. Минеральный состав и минерало-геохимические особенности техногенных россыпей, как правило, наследуются от первичной россыпи, но в процессе техногенеза испытывают определенные изменения (Шило, 2000; Наумов, Наумова, 2010).

Цель работы заключалась в следующем: установить изменения, произошедшие со временем в отвалах золотодобычи; на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла (НЗУ) Приамурья сделать сравнение вещественно-минерального состава первичных и техногенных россыпей; провести исследования химического состава

самородного золота из техногенных россыпей; определить экологические риски и рассмотреть перспективность техногенных россыпей для повторной отработки.

Краткая геологическая характеристика

Нижнеселемджинский золотоносный узел расположен в пределах Чагоян-Быссинской металлогенической зоны Приамурской золоторудной провинции на правобережье нижнего течения р. Селемджи (Рис. 1). Для него, как и для других золотоносных узлов этой металлогенической зоны, характерны оруденение преимущественно золото-кварцевого, золото-полиметаллического и золото-серебряного типов, и россыпи с мелким и тонким золотом (Кузнецова, 2011).

В строении Нижнеселемджинского золотоносного узла принимают участие, главным образом, рифейские метаморфические сланцы, а также терригенные образования силурийского возраста, прорванные разновозрастными интрузиями кислого и среднего состава.

Центральная часть узла сложена крупными гранитоидными интрузивами ордовикского гранитового комплекса и средне-позднекаменноугольного габбро-гранитового комплекса, а также серией малых интрузий и даек гранит-порфиров, гранодиорит-порфиров и диоритовых порфиров раннемелового возраста.

В пределах узла установлены проявления минерализации золота, серебра, свинца, олова, ниобия и других элементов.

Наиболее известные рудопроявления золота – Храброе, Утесное и Загадочное, и большинство точек минерализации представлены зонами золото-кварцевого и золото-сульфидно-кварцевого прожилкования в кварц-слудистых, углеродистых и известковистых сланцах рифея. Кроме того, установлены участки минерализации среди гранитоидов палеозоя (р. Татарка и руч. Георгиевский). Из рудных минералов отмечаются пирит, арсенопирит, галенит и самородное золото.

Золотополиметаллические (свинцовые) рудопроявления Королевское и Косматое установлены в песчаниках, алевролитах и туфах силура, а проявление Веселое привязано к верхнепротерозойским терригенно-карбонатным отложениям. Наличие в шлихах не окисленного галенита говорит о близком источнике коренной сульфидной минерализации (Моисеенко, Кузнецова, 2010). При дражной отработке россыпи р. Некля и руч. Веселый в тяжелых шлихах повсеместно встречался слабо окатанный галенит (до 24 % от массы шлиха). По данным атомно-абсорбционного анализа, в галените содержится Au – 67.75 г/т, Ag – 200 г/т. Отношение золота к серебру – 0.34. По этому показателю галенит НЗУ ближе к золоторудным и золото-полиметаллическим месторождениям Приамурской провинции, чем к собственно полиметаллическим (Кузнецова, Моисеенко, 2011).

Рудопроявления олова и ниобия (Т. 8-10 р. Татарка, Т. 12 руч. Безназванный) приурочены к метасоматически измененным гранитам октябрьского комплекса. По данным минералогического анализа в них содержатся колумбит, пироклор, самарскит и касситерит. Содержание олова достигает 0.06%, а ниобия – 0.041% (Кузнецова, 2011).

Месторождений благородного металла, соответствующих по продуктивности многочисленным россыпям, на

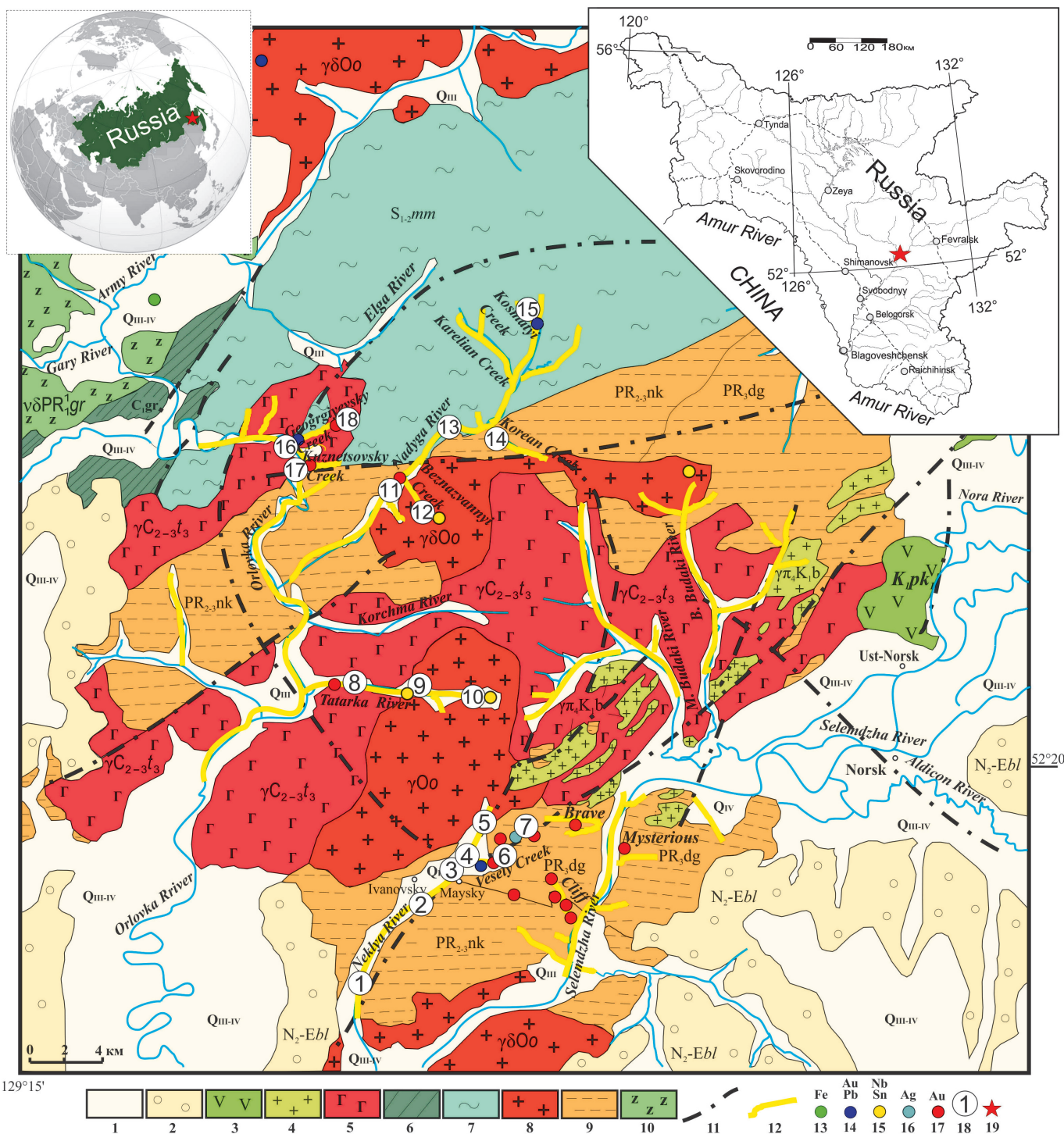


Рис. 1. Схематическая карта: географическое положение (отмечено на врезке), геологическое строение и рудоносность Нижнеселемджинского золотоносного узла (с использованием фондовых материалов В.Ф. Зубкова, 1980 и Д.Л. Вьюнова, 2005). 1 – четвертичные образования (валуны, галька, гравий); 2 – неоген-четвертичные образования (глины, песок, галька, алевролиты); 3 – раннемеловые андезиты; 4 – раннемеловые гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры и диоритовые порфириты; 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 и точки минерализации: 13 – железа, 14 – золота и свинца, 15 – олова и ниобия, 16 – серебра, 17 – золота, 18 – точки отбора проб; 19 – местоположение Нижнеселемджинского золотоносного узла. Т. 1-5 р. Некля; Т. 6-7 руч. Веселый; Т. 8-10 р. Татарка; Т. 11, 13 р. Надяга; Т. 12 руч. Безназванный; Т. 14 руч. Корейский; Т. 15 руч. Косматый; р. Орловка (16) ее притоки – Т. 17 руч. Кузнецовский; Т. 18 руч. Георгиевский (Кузнецова, 2011; Сафронов, Кузнецова, 2017).

данный момент не выявлено, что возможно объясняется тем, что основным источником золота россыпей НЗУ являются широко рассеянные по площади маломощные золотоносные кварцевые прожилки в осадочных породах, метаморфизованных в фации зеленых сланцев.

В пределах узла развиты в основном аллювиальные россыпи золота, большинство из которых залегает в верхнечетвертичных отложениях. Золотоносные пласты располагаются под современным аллювием на глубине от 2-5 до 12 м на плотике из коренных пород, сложенном

выветрелыми верхнепротерозойско-нижнекембрийскими сланцами и палеозойскими гранитами (иногда ими являются глины коры выветривания).

Аллювиальные отложения характеризуются большим содержанием глинистого и кварцевого материала. Средний минеральный состав первичных россыпей представлен на рис. 2.

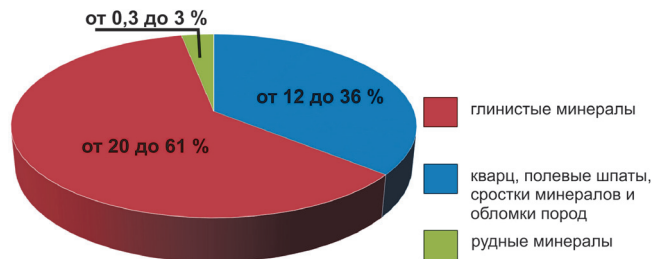


Рис. 2. Средний минеральный состав первичных россыпей НЗУ

Для первичных россыпей НЗУ характерен значительный разброс выхода тяжелого шлиха – от 0,2 до 9 кг/м³ промытой породы. При изучении минерального состава тяжелого шлиха было установлено, что электромагнитная фракция (34-72% от массы тяжелого шлиха) на 50% сложена ильменитом, также в ней встречаются гранат, монацит и гематит. Магнитная фракция (3-7% от массы тяжелого шлиха) на 90% состоит из магнетита и мартита. В немагнитной фракции (4-29% от массы тяжелого шлиха) доминирует циркон (до 55%), присутствуют рутил, сфен, касситерит, галенит, пироморфит и золото (Кузнецова, 2011).

Содержание золота в первичных россыпях составляет от десятков мг/м³ до 3946 мг/м³, в среднем 282 мг/м³ на массу. Основная масса золота (до 70%) относится к классу (-0,5 мм). Изредка отмечались находки самородков весом от 30 до 150 г. Средняя проба Au – 880 промилле (здесь и далее по тексту Au/(Au+Ag)×1000). В качестве примесей иногда присутствуют Fe, Zn, Sb, Zn, As, Pb, Ti, Mg, Mn, Ni, Co и Bi. Содержание меди в золоте стабильно в пределах 0,01-0,03 %. Значительные колебания установлены только для серебра (от 4,1 до 13,9%) (Неронский, Добрая, 1975), количество которого зависит как от термодинамических условий образования руд, так и от длительности воздействия на него различных факторов в экзогенных условиях. В зоне окисления происходит как электрохимическое выщелачивание серебра с поверхности зерен, так и отложение на зернах более высокопробного Au (Groen et al., 1990; Lalomov et al., 2016), что также приводит к увеличению пробности золота. Кроме того, в первичных россыпях постоянно присутствует слабо окатанное золото в сростках с кварцем.

На сегодняшний день практически все первичные россыпи отработаны и переведены в разряд техногенных россыпей.

Методы исследования

Для исследований было отобрано 7 объемных проб (30-80 кг) на объектах Нижнеселемджинского золотоносного узла: р. Некля (Т. 1-5) с притоком – руч. Веселый (Т. 6, 7), р. Татарка (Т. 8-10), р. Надяга (Т. 11, 13) с притоками – руч. Безназванный (Т. 12), ручей Корейский (Т. 14), ручей Косматый (Т. 15), р. Орловка (Т. 16) с притоками – руч. Кузнецовский (Т. 17), руч. Георгиевский (Т. 18) (Рис. 1).

Стандартным фракционированием из проб выделен тяжелый шлих. Атомно-абсорбционный и минералогический анализ проб и образцов проводился в Институте геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН (ФГБУН ИГиП ДВО РАН). Самородное золото и минералы-концентраты благородного металла в виде отдельных зерен и сростков выделялись по заранее отработанной методике (Моисеенко, 2007).

Изучение элементного состава, морфологических и микроструктурных особенностей минералов проводилось методом аналитической растровой электронной микроскопии (АРЭМ) на электронном микроскопе EVO 40XVP («Carl Zeiss», Германия), оснащенный системой энергодисперсионного рентгеновского (EDX) анализа INCA Energy («Oxford instruments», Великобритания), в центре электронной микроскопии в ФГБУН «Национальный научный центр морской биологии» Дальневосточного отделения РАН (ННЦМБ ДВО РАН). Зерна и сростки закреплялись на специальных столиках и изучались в режимах вторичных и обратно-рассеянных электронов и режиме EDX микрозондирования при различных увеличениях (при ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ). При этом образцы не напылялись углеродом, поскольку они, в большинстве своем, являются токопроводящим материалом. Это позволило в процессе анализа однозначно выявлять углерод в породах (минеральных смесях), находящихся в тесных сростаниях с золотом.

Результаты и их обсуждение

При изучении техногенных россыпей НЗУ было установлено, что по гранулометрическому и минеральному составам они отличаются от первичных россыпей. При отработке последних происходит вымывание глинистых минералов, соответственно в отвалах растет доля кварца и полевых шпатов, увеличивается процент рудных минералов (Рис. 3).

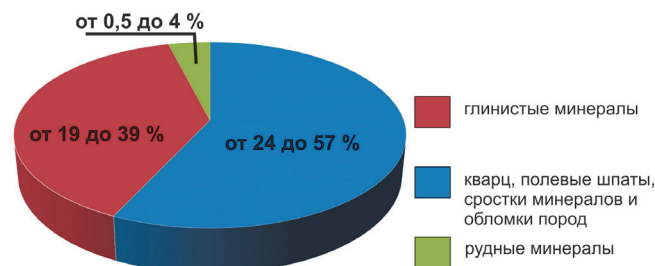


Рис. 3. Средний минеральный состав техногенных россыпей НЗУ

В среднем в техногенных россыпях выход тяжелого шлиха составляет от 0,5 до 4% от массы породы. Электромагнитная фракция (от 6 до 80%) представлена в основном ильменитом (до 62%), монацитом, сидеритом, гранатом и пироморфитом. Магнитная фракция (3-12%) сложена конгломератами окислов и гидроокислов железа (до 80%), магнетитом (до 25%) и мартитом. Немагнитная фракция (от 2 до 29%) включает в себя циркон (до 70%), касситерит, рутил, самородный свинец, золото, сфен и галенит.

Для тяжелого шлиха техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла характерен повышенный радиоактивный фон (до 170 мкР/ч), что

объясняется присутствием в шлихе (до 10%) ториевых минералов (монацита) и урансодержащего циркона (Кузнецова и др., 2017; Моисеенко, Кузнецова, 2017).

В процессе работ был проведен сравнительный анализ тяжелых фракций первичной и техногенной россыпей руч. Веселого (Табл. 1).

Россыпь руч. Веселый		
минералы тяжелой фракции	первичная	техногенная
	%	%
ильменит	30	46
галенит	12	5
мартит	8	зн.
гематит	6	—
лимонит	5	зн.
гранат	3	2
рутил	3	1
магнетит	3	1.3
пирит	2.3	зн.
танталониобаты	1.4	—
окислы Mn	0.1	—
самородный свинец	—	15
монацит	1.4	10
конгломерат окислов и гидроокислов Fe	0.3	8
циркон	4	5
шарики Fe	—	4
касситерит	0.5	1
сидерит	—	0.2
шеелит	—	зн.
амальгама золота	—	0.5
среднее содержание Au в шлихе, г/т	267	147
среднее содержание Au в россыпи на массу, мг/м ³	329	187

Табл. 1. Состав тяжелой фракции первичной и техногенной россыпей (ручей Веселый)

Часть россыпей НЗУ (руч. Веселый, Косматый и Георгиевский) образованы по породам с золото-полиметаллической (галенитовой) минерализацией. В зоне гипергенеза галенит разрушается, но медленнее, чем другие сульфиды. Его содержание в техногенных россыпях по сравнению с первичной россыпью уменьшается до 5%. Галенит частично корродирован с образованием на нем локальных участков из оксидов, гидрооксидов и сульфатов свинца. Для минералов свинца характерно повышенное содержание благородного металла. По данным АРЭМ продукты преобразования галенита в виде корочек медно-сурьмяно-хлоридно-свинцовых гидрооксидов встречаются на поверхности золотин. Нередко на золоте наблюдаются выделения англезита (PbSO₄).

В отвалах количество металлического Pb достигает 15%. Это связано с тем, что в окислительно-восстановительных условиях, создаваемых деструкцией органического вещества, заболоченностью и отсутствием кислорода, происходит разложение галенита и некоторых минералов железа с частичным восстановлением до самородного металла (Myagkaia et al., 2016). С этими же процессами связано наличие в тяжелой фракции отвалов до 4% металлического Fe.

Для техногенных россыпей кроме восстановительных условий, в первую очередь, характерны процессы окисления. В зоне гипергенеза происходит разрушение

минералов, в основном сульфидов, с образованием оксидов и гидроксидов металлов. Пирит интенсивно окисляется до оксидов и гидрооксидов железа, если в первичных россыпях его доля составляет несколько процентов, то в техногенных он встречается в знаковых количествах. Что касается маррита, гематита и лимонита, то в условиях техногенеза происходит их перераспределение с образованием конгломератов и стяжений. В тяжелом шлихе становится меньше магнетита. Увеличивается доля ильменита – до 46%, и монацита – до 10%.

Появляется амальгама золота (до 0.5%). Встречается свободное самородное золото, среднее содержание которого в шлихе составляет 187 г/т. В отвалах самородное золото обычно представлено всеми гранулометрическими размерностями, характерными для первичных россыпей, но отмечается уменьшение содержания средних классов, которые наиболее легко извлекаются при первичной отработке, соответственно растет процент тонкодисперсионного и макроскопического золота (Шило, 2000), встречаются и самородки. Гистограмма распределения золота по гранулометрии в первичной и техногенной россыпи кл. Веселый отображена на рис. 4, из которой видно, что основная масса золота в отвалах (до 83%) относится к классу <0.5 мм, то есть к мелкому и тонкодисперсному.

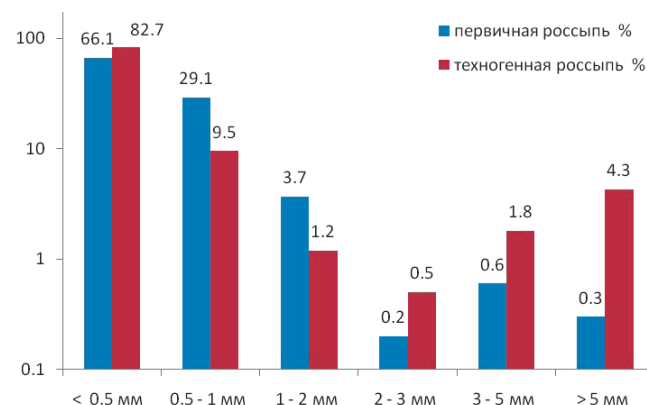


Рис. 4. Гистограмма распределения самородного золота по размерным классам в первичной и техногенной россыпях кл. Веселый

В отработанных россыпях, как правило, встречаются минералы-концентраты с разным содержанием в них золота. Например, в техногенной россыпи кл. Веселый установлены: рутил (Au 1000 г/т, Ag 70 г/т), монацит (Au 680 г/т, Ag 600 г/т), магнетит (Au 300 г/т, Ag 100 г/т), халцедоновидный кварц (Au 150 г/т, Ag 30 г/т), металлический свинец (Au 140 г/т, Ag 50 г/т) и галенит (Au 10 г/т, Ag < 2 г/т). Отложения наноразмерного Au на поверхности и по дефектам структур минералов (галенита, рутила, монацита), говорит о гипергенном генезисе благородного металла. В отвалах россыпей, где в процессе золотодобычи широко использовалась ртуть, происходит активная трансформация амальгам с высвобождением благородного металла. При этом золотом заражаются типично акцессорные минералы россыпей, такие как ильменит (Au 110 г/т, Ag 50 г/т) и циркон (Au 280 г/т, Ag 560 г/т) (данные атомно-абсорбционного анализа) (Кузнецова, 2011).

Для определения морфологии, микроструктуры и химического состава самородного золота из техногенных

россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья методами растровой электронной микроскопии было изучено 396 образцов, выполнено несколько сотен EDX анализов.

Полученные данные (Табл. 2) показывают, что самородное золото неоднородно по составу. В нем установлены фазы от практически чистого золота, твердых растворов золота с серебром, до амальгам на основе элементов Au, Ag, Hg, Pb. Амальгамные фазы присутствуют в большей части изученных образцов.

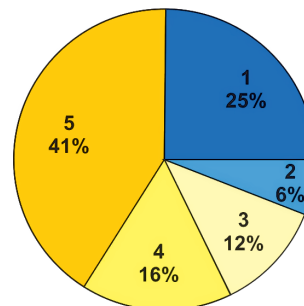
	Система	Диапазоны содержаний элементов			
		Au	Ag	Hg	Pb
Самородное золото	Au	100	-	-	-
	Au-Ag	88.9-99.3	0.7-11.1	-	-
Амальгамы золота	Au-Hg ¹	87.8-99.3	-	0.7-12.2	-
	Au-Ag-Hg	73.3-93.0	1.0-13.7	1.7-22.3	-
	Au-Hg-Pb ²	42.3-95.1	-	2.2-16.7	1.4-50.4
	Au-Ag-Hg-Pb ³	60.0-90.2 ³	0.4-4.7	1.5-17.4	0.6-24.0

Табл. 2. Химический состав самородного золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья по данным EDX анализа, масс.%. Примечание: пропуски означают, что элемент не обнаружен. Примеси: ¹ Cu 0.5-1.7%; ² Sb 1.8-3.5%; ³ Zn 0.78-0.9%. Все выполненные анализы нормированы, т.е. их суммы приведены к 100%.

Следует отметить, что особенностью изученного техногенного золота 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 (Сафронов, Кузнецова, 2017).

Исходя из элементного состава исследованных образцов (Табл. 2), авторы условно разделили самородное золото техногенных россыпей на 2 группы (Рис. 5). В первую группу (I) выделено самородное золото, во вторую группу (II) – амальгамы золота. К первой группе относится чистое золото (1000‰) и твердые растворы золота с серебром (Au-Ag) (979‰). Для образцов второй группы установлены ртутьсодержащие фазы, представляющие собой амальгамы двухкомпонентного (Au-Hg), трехкомпонентного (Au-Ag-Hg), (Au-Hg-Pb) и четырехэлементного (Au-Ag-Hg-Pb) составов. Средняя проба золота этой группы – 870‰. Среди трехкомпонентных амальгам 12% относится к системе Au-Ag-Hg и 16% – к системе Au-Hg-Pb. Среди трех- и четырехкомпонентных составов авторами впервые выделены следующие соединения: Au₁(Hg,Pb)₁, (Au,Ag)₂(Hg,Pb)₁, (Au,Ag)₄Hg₁, (Au,Ag)₄(Hg,Pb)₁, Au₃(Hg,Pb)₄, Au₄(Hg,Pb)₃, (Au,Ag)₉Hg₁ и (Au,Ag)₉(Hg,Pb)₁ (Сафронов, Кузнецова, 2017). В золоте встречаются примеси Cu, Zn и Sb.

По результатам проведенных исследований установлено, что 1/3 самородного золота техногенных россыпей относится к высокопробным разностям, и до 70% образцов заражено ртутью (Рис. 5). В ряде образцов зафиксированы фазы, состоящие на 97 масс.% из Hg с примесью Pb ~ 2% и As < 1%. Наличие свободной ртути указывает на ее присутствие в отвалах техногенных россыпей.



Группа	Фазы техногенного золота	Проба золота, ‰
I	1 (Au-Ag) + (Au)	887 до 1000 средняя 979
	2 (Au-Ag)	
II	3 (Au-Ag-Hg) + (Au-Hg) + (Au)	423 до 1000 средняя 870
	4 (Au-Hg-Pb) + (Au-Hg) + (Au)	
	5 (Au-Ag-Hg-Pb) + (Au-Hg-Pb) + (Au-Ag-Hg) + (Au-Hg) + (Au-Ag) + (Au)	

Рис. 5. Диаграмма количественного соотношения самородного золота техногенных россыпей с разным фазовым составом (Нижнеселемджинский золотоносный узел, Приамурье)

В россыпях Нижнеселемджинского золотоносного узла широко развито «новое» золото, которое отлагается на поверхности окатанных золотин (Петровская, 1973; Reith et al., 2012; Hough et al., 2011; Shuster, Southam, 2015). Аутигенное золото, обнаруженное под электронным микроскопом в виде микро- и наноразмерных фаз образует ажурные каймы, шестигранные призмы, губчатые, глобулярные и нитевидные образования (Рис. 6) и характеризуются более высокой пробой (до 1000‰), а в некоторых случаях образуют фазы с ртутью (Рис. 6е). На образование этого золота в техногенных условиях указывает не только высокая проба, отличная от пробы основного золота, но и примесь ртути (Yesares et al., 2014).

Амальгамированное золото попало в отвалы во время его добычи из россыпей. Но часть многофазного золота образовалась или подверглась изменению состава уже непосредственно в отвалах за счет взаимодействия остаточной ртути с частицами золота. Как правило, поверхность амальгамных обособлений золота обладает сглаженной структурой. Но иногда на поверхности встречаются корродированные участки с причудливой микроструктурой, которые, по-видимому, являются результатом воздействия агрессивных растворов на золото (Рис. 6е). При этом растворы, скорее всего, содержали свинцовые комплексы, поскольку в корродированных участках наблюдается повышенное содержание Pb (6.27 масс.%) и пониженное ртути (2.54 масс.%) по сравнению с менее измененными участками, где Pb 1.89%, а Hg 6.07%. Иначе говоря, ртуть в корродированных участках частично растворена (вынесена из них) и замещена свинцом. Содержания золота в обоих случаях практически одинаковые – 91 и 92%.

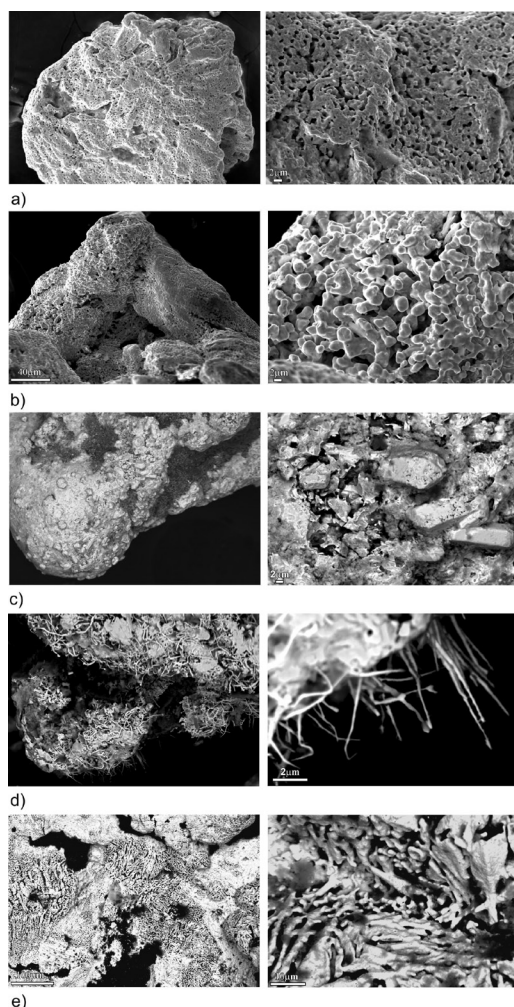


Рис. 6. Микроструктура самородного золота техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья: а) пористая, б) глобулярная, в) кристаллическая, д) нитевидная, е) дендритоидная. Микроснимки а, б получены во вторичных электронах; с, д, е – в обратно-рассеянных электронах.

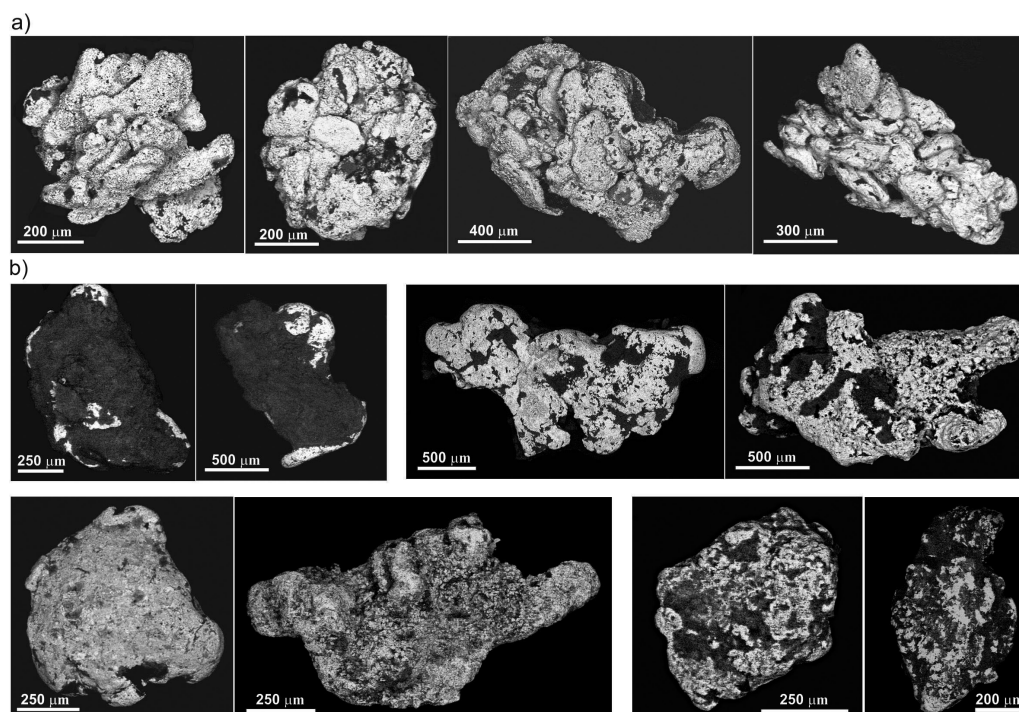


Рис. 7. Микроснимки различных морфологических типов самородного золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья. Снято в обратно-рассеянных электронах.

Определенная роль в образовании аутигенного золота в россыпях принадлежит бактериям. Давно установлено присутствие некоторых типов бактерий в россыпных месторождениях. А экспериментами показано, что бактерии способны концентрировать растворенное золото в видимые, по крайней мере, под электронным микроскопом частицы (Маракушев и др., 1989; Reith et al., 2010; Southam et al., 2009; Shuster, et al., 2016, Rea et al., 2016). Более того, в одном из месторождений Октябрьского золотоносного узла в свое время было обнаружено бактериальное золото (Сафронов и др., 1998).

При изучении золота техногенных россыпей методами электронной микроскопии зафиксировано, что большая часть благородного металла представляет собой сростки, состоящие из зерен различного состава и морфологии, сцементированных между собой полиминеральной матрицей (Рис. 7а), нередко амальгамой золота. Почти все образцы содержат включения пород сложного состава (Рис. 7б). Ниже в качестве примера приведены показательные микроснимки образцов золота содержащих породу с приведенными точками (спектрами) EDX анализов и рассчитанными составами (Рис. 8а, б, с; табл. 3, 4, 5). Просмотрено и изучено несколько сотен подобных участков и выполнено более 500 анализов. В целом, включения породы в золоте имеют сложный состав и строение. Во многих породных образованиях, находящихся в тесных сростаниях с самородным золотом, также происходит процесс формирования аутигенного благородного металла. Включения наноразмерного золота, невидимого под электронным микроскопом даже при самых больших увеличениях, – так называемого кластерного Au, надежно фиксируются энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (Сафронов, Кузнецова, 2016) (Рис. 8, снимок 5, табл. 4, сп. 2-5, Au ~ от 0.5 до 1.5%).

В процессе самоорганизации образуются более крупные изометричные, часто сфероидальные выделения

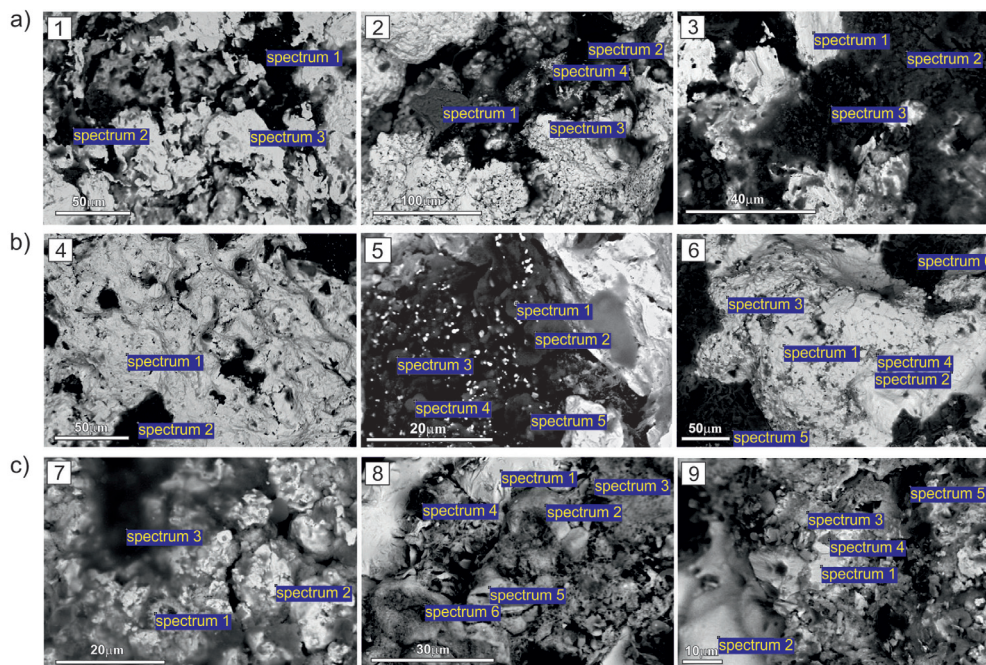


Рис. 8. Микроснимки 9 золотин содержащих пород с приведенными точками (спектрами) ЭДР анализов. Рассчитанные составы показаны в таблицах 3, 4, 5.

микроснимок элемент	1			2			3		
	спектр			спектр			спектр		
	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 1	Sp 2	Sp 3
C		63.51			85.64			18.52	38.02
N		18.16							
O	65.19	16.63		58.55	11.57			53.18	44.93
Na				0.87					
Al	15.18	0.28			0.48			1.13	1.15
Si	15.94	0.35		0.50	0.77			1.41	2.06
S				0.60				0.75	0.44
Cl				0.78					
K	0.13			0.46	0.10				
Ti	0.64								
Mn									0.13
Fe	2.61	0.56		38.05	0.34			23.60	12.58
Ag					0.09		13.48	0.49	
Au		0.41	100	0.19	0.87	100	86.52		
Hg	0.12	0.05						0.69	0.52
Pb	0.19	0.05			0.15			0.24	0.19

Табл. 3. Состав ассоциирующих с самородным золотом пород по данным ЭДР анализа, ат. % (микроснимки 1-3). К снимку 1: Сп 1 – включение каолинита в интерстиции самородного золота; в каолините примесь гидрогетита; Сп 2 – углеродистое образование с Au, Hg и Pb; Сп 3- золото (1000%). К снимку 2: Сп 1 – гематит; Сп 2 – углеродистая порода с Au, Ag и Pb; Сп 3 – золото (1000%). К снимку 3: Сп 1 – высокопробное золото; Сп 2 и Сп 3 – углеродсодержащая тонкодисперсная смесь лимонита и гидроалюмосиликата с Hg и Pb.

благородного металла различного размера. Состав такого золота простой – 100% Au (Табл. 4, снимок 5, сп. 1). Размер наночастиц колеблется в диапазоне от 50-100 нм до 500-600 нм. Некоторые частицы объединены в группы из двух, трех и более индивидов, и размер таких агрегатов уже выходит за рамки нанометрового диапазона и составляет несколько микрометров. Подобное нанозолото наблюдалось при изучении рудных месторождений (Моисеенко и др., 2010; Сафронов и др., 2011; Моисеенко, Кузнецова, 2014; Моисеенко, Моисеенко, 2012). В условиях гипергенеза и техногенеза первичные минералы-концентраты золота разрушаются, с высвобождением благородного металла (Наумов, Наумова, 2013; Hough et al., 2011; Reith et al., 2010; Lengke et al., 2006a, 2006b; Craw,

Lilly, 2016; Fairbrother et al., 2012; Кузнецова и др., 2015), далее происходит самоорганизация наночастиц золота через кластеры к сфероидам, от сфероидов к агрегатам до образования самостоятельных фаз, то есть последовательная концентрация и укрупнение Au от наноразмерных до видимых его выделений (Моисеенко, 2007; Моисеенко, Моисеенко, 2012; Shuster, Southam, 2015, Shuster et al., 2017; Hough et al., 2011).

Изученные на аналитическом растровом электронном микроскопе включения пород в зернах золота, как правило, представляют собой тонкодисперсную (иногда мелкозернистую) смесь ряда минералов и углеродистого вещества. Из наиболее часто встречающихся образований пород в образцах благородного металла можно выделить

микроснимок элемент	4		5					6					
	спектр		спектр					спектр					
	Sp 1	Sp 2	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 4	Sp 5	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 4	Sp 5	Sp 6
C											27.13		
O		64.66		62.93	69.51	69.17	63.55				52.88	63.15	64.03
Na				0.37	0.39	0.24	0.19						
Mg		0.77		0.72	0.31		0.33					1.03	2.65
Al		12.06		10.56	11.39	10.18	11.84				5.43	10.85	11.16
Si		14.05		10.73	11.65	9.80	10.83				5.96	17.71	13.81
P				0.20	0.19	0.33	0.25						
S					0.17	0.27	0.02						
Cl		0.27		0.34	0.44	0.41	0.27						
K		0.91		1.62	0.70	0.42	0.75					2.34	0.30
Ca		0.21		0.56	0.26	0.47	0.43					0.24	0.41
Ti		0.15		0.26	0.12	0.24	0.27					0.19	
Mn		2.66		1.74	1.68	1.23	1.47				0.98	2.24	1.07
Fe		2.35		8.83	2.24	5.30	9.01				0.43	1.84	6.26
Ag	11.75							1.88	6.59	4.36			
Sn	3.05												
Au	55.78		100	0.68	0.70	1.54	0.47	90.30	78.74	85.37	0.54		
Hg	15.93	0.56		0.30	0.12	0.14	0.13	7.82	9.85	6.60		0.34	0.30
Pb	13.48	1.35		0.17	0.13	0.25	0.17		4.82	3.67	6.63	0.07	

Табл. 4. Состав ассоциирующих с самородным золотом пород по данным EDX анализа, ат. % (микроснимки 4-6). К снимку 4: Сп 1 – амальгама золота с Pb и Sn; Сп 2 – смесь гидроалюмосиликатов и гидроокислов Mn и Fe. К снимку 5: Сп 1 – нанозолото (1000‰); Сп 2, Сп 3, Сп 4, Сп 5 – тонкодисперсная смесь гидроалюмосиликатов и гидроокислов Fe и Mn с частицами наноразмерного золота. К снимку 6: Сп 1 – высокопробная амальгама золота; Сп 2 и Сп 3 – амальгама золота с примесью Pb; Сп 4 – карбонат Pb с каолинитом; Сп 5 и 6 – гидроалюмосиликат с примесью Hg и Pb.

микроснимок элемент	7			8						9				
	спектр			спектр						спектр				
	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 4	Sp 5	Sp 6	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 4	Sp 5
C	48.34		76.8		47.25	39.69	85.02		35.75			27.11	88.64	89.13
O	30.53		14.41		22.43	40.57	10.42		43.41			48.05	5.79	7.00
Na	1.50		0.94											
Al	0.52		0.14			0.96			2.77					
Si	0.42		0.12						2.99					
P	4.13		0.84											
S					12.73	0.81		48.62	2.68					
Cl	3.55		0.48						1.69			2.26		
K	1.64		2.05											
Ca			0.17											
Mn			0.15											
Fe	0.61		0.66						1.14					
Cu		2.66	0.43		1.63				0.51					
Zn	0.21		0.26											
As			0.01	0.66										0.01
Ag		5.62								5.89	5.21			
Sb					1.28	2.17			0.87					
Au	1.32	81.1	1.31							81.28	72.76	2.42	2.26	0.72
Hg		8.24	0.26	97.02			0.35		0.39	9.53	10.82			
Pb	7.23	2.38	0.98	2.32	14.68	15.79	4.21	51.38	7.09	3.31	11.20	20.17	3.30	3.14

Табл. 5. Состав ассоциирующих с самородным золотом пород по данным EDX анализа, ат. % (микроснимки 7-9). К снимку 7: Сп 1 – пироморфит; Сп 2 – амальгама золота с Pb и Cu; Сп 3 – высокоуглеродистая порода с Au, Hg, Pb, Cu и Zn. К снимку 8: Сп 1 – свободная ртуть; Сп 2 – медно-сурьмянистый англезит в углеродсодержащей матрице; Сп 3 – гидроцеруссит с гидроокислом Pb; Сп 4 – пленки углерода с примесью Pb и Hg; Сп 5 – галенит; Сп 6 – гидроалюмосиликат Pb с Cu и Sb. К снимку 9: Сп 1 и Сп 2 – амальгама золота, содержащая Pb; Сп 3 – смесь церуссита и фосгенита; Сп 4 – включение графита со свинцом; Сп 5 – включение графита содержащее Pb и Au.

следующие минеральные разновидности: гидроалюмосиликаты (глинистые минералы, гидрослюды, хлориты и пр.) (Рис. 8а, b; табл. 3, 4); гидроокислы Fe; гидроокислы Mn (Рис. 8а, b; табл. 3, 4). Высокоуглеродистые и углеродсодержащие образования (Рис. 8а, с; табл. 3, 5) встречаются

в виде пленок, скоплений и графитизированного вещества.

В породной составляющей золота нередко встречаются как самородный свинец, так и его соединения: оксиды и гидроокислы Pb (сурик, массикот), сульфаты (англезит) и карбонаты Pb (церуссит, фосгенит). Реже фиксируются

хлориды Pb (котунит, мандипит), фосфаты (пироморфит) и сульфиды (галенит). Также наблюдаются U-Pb-карбонат-фосфатные соединения сложного состава и трудно диагностируемые минеральные смеси Pb-содержащих гидроалюмосиликатов (Рис. 8b, с; табл. 3, 5).

В составе включений установлены следующие силикаты: каолинит, галлуазит, хлорит и серицит. Сульфиды представлены окисленным пиритом, а окислы, гидроокислы железа гематитом, гетитом и гидрогетитом (лимонит). Из гидроокислов марганца встречаются романешит и голландит. Основные породообразующие минералы включений в золоте – кварц и адуляр.

Практически во всех фазах породных составляющих присутствует органический (и/или неорганический) углерод, содержащий в небольших количествах Au, Ag, Pb и Hg.

Для золота техногенных россыпей характерны микро- и нанофазы амальгам золота и свинца, которые фиксируются в большинстве включений.

В отвалах имели место процессы растворения, переноса и переотложения породных и рудных элементов (Saryg-ool et al., 2017). В результате таких процессов часть золота стало более высокопробным, что объясняется как выщелачиванием серебра (Larizzatti et al., 2008), так и отложением на зернах «нового» высокопробного золота (Groen et al., 1990; Lalomov et al., 2016; Наумов, Наумова, 2013). Кроме того, некоторые минералы могли преобразовываться, например, галенит в сульфатные и гидро-карбонат-сульфатные формы. Это подтверждается наблюдениями выделений англезита и Pb-содержащих алюмосиликатных смесей сложного состава. Ряд минералов перешли в водонасыщенные разности: каолинит в галлуазит, гетит в гидрогетит и т.д. Комплексы оксидов и гидрооксидов Fe (лимонит) и Mn выполняют роль сорбентов, на которые садятся золото, свинец (в том числе самородный), ртуть и другие соединения. Роль сорбентов играют и глинистые минералы: каолинит и пр.

Присутствие углерода свидетельствует о бактериальных процессах, которые создают восстановительные условия и способствуют отложению, концентрированию и укрупнению благородного металла (Моисеенко, 2007; Моисеенко, Кузнецова, 2014).

Все вышеперечисленное говорит об изменении минерально-вещественного состояния россыпей в условиях техногенеза и свидетельствует о техногенном происхождении изученных минеральных ассоциаций.

Выводы

В процессе изучения вещественного состава техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья установлено следующее.

1. При техногенезе происходит активное изменение минерального состава россыпей.

2. В техногенных россыпях содержится до 190 мг/м³ остаточного самородного золота, и до 30% этого металла отличается высокой пробой.

3. До 83% золота в отвалах мелкое и тонкодисперсное.

4. Благородный металл весьма неоднороден по составу. В нем установлены многочисленные фазы, начиная от практически чистого золота, твердых растворов золота с серебром, заканчивая амальгамами на основе двух-, трех- и четырехкомпонентных систем элементов Au, Ag, Hg, Pb.

5. До 70% исследованных образцов золота в той или иной мере заражено ртутью, вплоть до выделения свободной ртути, что указывает на высокое загрязнение этим элементом техногенных отвалов.

6. Все самородное золото находится в тесной ассоциации с породообразующей матрицей различного состава: гидроалюмосиликатами, окислами и гидроокислами Fe, Mn и Pb, высокоуглеродистыми и углеродсодержащими образованиями и т.д.

7. Под воздействием физико-химических и биохимических процессов в техногенных россыпях происходят различные преобразования самородного золота: очищение, за счет выноса серебра, разрушение минералов-концентраторов золота, осаждение микро- и нанозолота на геохимических барьерах с формированием так называемого «нового» золота (от нанообразований до микро- и макроформ).

8. При разработке новых технологий для более полного извлечения благородного металла из техногенных россыпей следует учитывать, что рудные минералы в них отличаются повышенной концентрацией тяжелых металлов и радиоактивных элементов, золото имеет сложный многофазовый и многокомпонентный состав, и $\frac{3}{4}$ его амальгамировано.

Благодарности

Авторы благодарны уважаемому Рецензенту за внимательное прочтение работы и сделанные критические замечания и ценные советы.

Литература

- Ахметов Р.М. (2013). Ртуть в природе и техногенных образованиях. *Геологический сборник*, 10, с. 222-224.
- Кузнецова И.В. (2011). Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселемджинского узла (Приамурье). *Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук*. Красноярск: СФУ, 21 с.
- Кузнецова И.В., Моисеенко В.Г. (2011). Поведение золота и свинца в зоне гипергенеза. *Руды и металлы*, 2, с. 24-27.
- Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В., Харитонов В.И. (2015). Особенности самородного микро- и нанозолота в зоне гипергенеза (Приамурье). *Естественные и технические науки*, 11(89), с. 225-230.
- Кузнецова И.В., Моисеенко Н.В., Сафронов П.П., Синякова Н.И. (2017). Средство радиоактивных элементов и золота в минералах месторождений Приамурья. *Естественные и технические науки*, 11(113), с. 79-85.
- Маракушев С.А., Ковалевская А.Н., Сафронов П.П., Бородавкина О.Н., Моисеенко В.Г. (1989). Бактериальная перекристаллизация золота. *Доклады АН СССР*, 308(2), с. 482-485.
- Мирзеханова З.Г., Мирзеханов Г.С., Дебеляя И.Д. (2014). Техногенные образования россыпных месторождений золота: ресурсно-экологические аспекты отработки. Хабаровск: ДВО РАН, 297 с.
- Моисеенко В.Г. (2007). От атомов золота через кластеры, нано- и микроскопические частицы до самородков благородного металла. Благовещенск: ДВО РАН, Амурское отделение РМО, 187 с.
- Моисеенко В.Г., Кузнецова И.В. (2010). Роль наночастиц золота, серебра и свинца в образовании месторождений благородных металлов. *Доклады АН*, 430(3), с. 377-381.
- Моисеенко В.Г., Моисеенко Н.В., Сафронов П.П. (2010). Наноразмерное золото в рудах Покровского месторождения. *Доклады АН*, 435(4), с. 527-530.
- Моисеенко В.Г., Моисеенко Н.В. (2012). Концентрация наноминералов золота в процессе образования руд Покровского месторождения. *Доклады АН*, 444(1), с. 73-76. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12050054>
- Моисеенко В.Г., Кузнецова И.В. (2014). Нанозолото в древних известняках и доломитах Октябрьского рудного поля (Приамурье). *Доклады АН*, 456(4), с. 692-695. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1406018X>
- Моисеенко В.Г., Кузнецова И.В. (2017). Взаимосвязь урана, золота и углерода в рудообразовании. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, 12, с. 40-47.

- Наумов В.А., Наумова О. Б. (2010). О направленном формировании месторождений на примере техногенных россыпей золота. *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*, 1, с. 282-287.
- Наумов В.А., Наумова О.Б. (2013). Преобразование золота в техногенных россыпях. *Современные проблемы науки и образования*, 5, с. 531-532.
- Неронский Г.И., Добрая В.Т. (1975). Особенности состава золота из россыпей Нижнеселемджинского района. *Амурский краевед*, с. 86-100.
- Петровская Н. В. (1973). Самородное золото. М: Наука, 348 с.
- Сафронов П.П., Школьник Э.Л., Неронский Г.И. (1998). Необычные структуры золотин из россыпи Октябрьского золотоносного узла Амурской области. *Мат. III-го регионального совещания: Минералогия Урала*. Т. 2. Миасс: ИМин УрО РАН, с. 109-111.
- Сафронов П.П., Моисеенко Н.В., Моисеенко В.Г. (2011). Наноразмерное самородное золото в минералах месторождения Пионер (Приамурье) по данным электронномикроскопических исследований. *Мат. XVII Росс. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РЭМ-2011)*. Черногоровка, с. 206.
- Сафронов П.П., Кузнецова И.В. (2016). Нанозолото в породах, ассоциирующих с самородным золотом в техногенных россыпях Приамурья. *Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Мат. IV-й Всеросс. науч. конф. Благовещенск: ИТИГ ДВО РАН*, с. 112-115.
- Сафронов П.П., Кузнецова И.В. (2017). Особенности состава самородного золота техногенных россыпей на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла (Приамурье). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 328(2), с. 46-58.
- Соболев И.С., Лобов Е.И., Александров А.Н. и др. (1997). Пособие по оценке воздействия горного производства на окружающую среду и экологическому обоснованию хозяйственной деятельности горных предприятий. *Экологическая экспертиза*, 6, с. 2-70.
- Тарасенко И.А., Харитоновна Н.А., Оводова Е.В., Зиньков А.В., Корзун А.В. (2017). Трансформация минерало-геохимического состава отходов обогащения и ее влияние на формирование высокоминерализованных вод (Приморский край, Россия). *Тихоокеанская геология*, 36(2), с. 106-118.
- Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. (2008). Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья. *Горный журнал*, 6, с. 71-74.
- Шило Н.А. (2000). Учение о россыпях. М: Изд. Академии горных наук, 632 с.
- Alpers C.N., Hunerlach M.P., May J.T., and Hothem R.L. (2005). Mercury Contamination from Historical Gold Mining in California. U.S. Geological Survey. Fact Sheet 2005-3014. Version 1.1. <https://doi.org/10.3133/fs20053014>
- Craw D., Lilly K. (2016). Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 79, pp. 301-315. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.001>
- Fairbrother L., Brugger J., Shapter J., Laird J.S., Southam G., Reith F. (2012). Supergene gold transformation: biogenic secondary and nanoparticulate gold from arid Australia. *Chemical Geology*, 320-321, pp. 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.025>
- Groen, J.C., Craig, J.R., Rimestidt, J.D. (1990). Gold-rich rim formation on electrum grains in placers. *Can. Mineral*, 28, pp. 207-228.
- Hough R., Noble R., Reich M. (2011). Natural gold nanoparticles. *Ore Geology Reviews*, 42, pp. 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.003>
- Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A., Naumova O.B., Lebage W., Dilly R.A. (2016). Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 85, pp. 321-335.
- Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. (2008). Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison "Garimpo", Amazon, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 25, pp. 259-376. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.06.002>
- Lengke M.F., Fleet M.E., Southam G. (2006). Morphology of gold nanoparticles synthesized by filamentous cyanobacteria from gold(I)-thiosulfate and gold(III)-chloride complexes. *Langmuir*, 22, pp. 2780-2787. <https://doi.org/10.1021/la052652c>
- Lengke M.F., Ravel B., Fleet M.E., Wanger G., Southam G. (2006). Mechanisms of gold bioaccumulation by filamentous cyanobacteria from gold(III)-chloride complex. *Environmental Science and Technology*, 40, pp. 6304-6309. <https://doi.org/10.1021/es061040r>
- Myagkaya I.N., Lazareva, E.V., Gustaytis, M.A., Zhmodik S.M. (2016). Gold and Silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*. 165, 8-22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.016>
- Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. (2016). Bacterial biofilms on gold grains-implications for geomicrobial transformations of gold. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(6), fiw082. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw082>
- Reith F., Fairbrother L., Nolze G., Wilhelm O., Clode P.L., Gregg A., et al. (2010). Nanoparticle factories: biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation. *Geology*, 38, pp. 843-846. <https://doi.org/10.1130/G31052.1>
- Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. (2012). Supergene gold transformation: Secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand. *Chemical Geology*, 320, pp. 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>
- Saryg-ool B.Yu., Myagkaya I.N., Kirichenko I.S. et al. (2017). Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings. Part I. *Geochemistry and mineralogy. Science of the Total Environment*, 581-582, pp. 460-471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.154>
- Shuster J., Southam G. (2015). The in-vitro «growth» of gold grains. *Geology*, 43(1), pp. 79-82. <https://doi.org/10.1130/G36241.1>
- Shuster J., Lengke M., Marquez-Zavalía M.F., Southam G. (2016). Floating gold grains and nanophase particles produced from the biogeochemical weathering of a gold-bearing ore. *Economic Geology*, 111, pp. 1485-1494. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.6.1485>
- Shuster J., Reith F., John G.C., John E.P., Southam M.P.G. (2017). Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments. *Chemical Geology*, 450(5), pp. 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.027>
- Southam G., Lengke M.F., Fairbrother L., Reith F. (2009). The biogeochemistry of gold. *Elements*, 5, pp. 303-307. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.303>
- Tarasenko I.A., Kharitonova N.A., Zin'kov A.V., Ovodova E.V., Korzun A.V. (2017a). Tailing Dumps at the Krasnorechenskaya Concentration Mill (Primorsky krai, Russia): Geochemistry and Mineralogy. *Moscow University Geology Bulletin*, 72(3). pp. 192-199. <https://doi.org/10.3103/S014587521703005X>
- Tarasenko I.A., Zinkov A.V., Ovodova E.V., Petukhov V.I., Solyanik I.V. (2017b). Geochemistry and mineralogy of old concentration tailings (Dalnegorsky ore district, Primorsky krai, Russia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (EES)*, 87, 042023. DOI 10.1088/1755-1315/87/4/042023
- Telmer K.H., Veiga M.M. (2008). World emissions of mercury from small scale artisanal gold mining and the knowledge gaps about them. In M. Pirrone and R. Mason (Eds.), Mercury fate and transport in the global atmosphere: Measurements, models and policy implications. Geneva: UNEP, pp. 96-129.
- Yesares L., Saez R., Nieto J.M., Almodovar G.R., Cooper S. (2014). Supergene enrichment of precious metals by natural amalgamation in the Las Cruces weathering profile (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). *Ore Geology Review*, 58, pp. 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.10.004>

Сведения об авторах

Инна Владимировна Кузнецова – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник Лаборатории наноминералогии, Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН

Россия, 675000, Амурская обл., Благовещенск, Рёлочный пер., д. 1

Тел: +7(4162)53-52-48, e-mail: kuzia67@mail.ru

Петр Петрович Сафронов – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН

Россия, 690022, Россия, Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, д. 159

Тел: +7(4232)31-85-20, e-mail: psafroнов@mail.ru

Наталья Валентиновна Моисеенко – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник Лаборатории наноминералогии, Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН

Россия, 675000, Амурская обл., Благовещенск, Рёлочный пер., д. 1

Тел: +7(4162)53-52-48, e-mail: kaunamka82@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.06.2018;

Принята к публикации 10.11.2018; Опубликована 30.03.2019

Matter-mineral characteristics of technogene placers – potential sources of precious metals (on the example of the Nizhneselmdzhinsky gold-bearing node of Priamurye, Russia)

I.V. Kuznetsova^{1*}, P.P. Safronov², N.V. Moiseenko¹

¹Institute of Geology and Nature Management of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russian Federation

²Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

*Corresponding author: Inna V. Kuznetsova, e-mail: kuzia67@mail.ru

Abstract. Over tens of years of mining and processing of ores and placers of gold in the world a huge amount of wastes originated in the form of spoil heaps and tailing dumps, in which the content of valuable components allow them to be considered a real additional resource of precious metals. The aim of the work was to establish the changes that took place in time in the spoil heaps of gold mining and to determine the prospects of the technogene placers as a potential source of the precious metal. The investigations were carried out with the use of the methods of the analytical raster electron microscopy and mineralogical and atomic-absorption analyses.

On the example of the Nizhneselmdzhinsky gold-bearing node of Priamurye we have done the comparative analysis of the mineral and granulometric composition of the original and developed placers. It is shown that through the technogenesis the mineral composition of the deposits changes including the process of decomposition of the lead and iron minerals with a partial reduction to a native metal.

In addition to the native gold in the technogene placers there have been found the following minerals with a high content of the precious metal: rutile, monazite, magnetite, metallic lead, galena, ilmenite, and zircon. The content of free gold in dumps is 190 mg/m³ in the average. The main amount of it (about 83%) consists of the fine gold (< 0.5 mm).

We have studied the chemical composition of the native gold and associated rocks. It has been established that the gold has a multiphase composition. The phases are for the most part the gold amalgams and have two-, three-, and four-component compositions (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). About 30% of gold of the technogene placers have a high standard of fineness (~980‰). Almost all native gold is in close intergrowths with the rock-forming matrix of different composition: hydroalumosilicates, oxides, and hydroxides of Fe, Mn, and Pb, highly carbonaceous and carbon-bearing formations, and so on. Under the action of the physicochemical and biochemical process in the technogene placers different transformations of the native gold take place: purification at the expense of the silver evacuation; decomposition of the minerals-concentrators of gold; precipitation of micro- and nano-gold at the geochemical barriers with the formation of the so-called “new” gold (from nanoformations to micro- and macroforms).

Through the operation of the technogene placers one should take into account the fact that the ore minerals in them have high concentrations of heavy metals and radioactive elements, and the gold has a complicated multiphase and multicomponent composition, and ¾ of it is amalgamated. The data obtained give the additional information for the elaboration of technologies for the development of the prospective gold-bearing technogene placers.

Keywords: technogene placers, native gold, phase composition, gold amalgam, fineness of gold

Acknowledgments. The authors are grateful to the reviewer for careful consideration of the manuscript and critical comments and valuable recommendations.

Recommended citation: Kuznetsova I.V., Safronov P.P., Moiseenko N.V. (2019). Matter-mineral characteristics of technogene placers – potential sources of precious metals (on the example of the Nizhneselmdzhinsky gold-bearing node of Priamurye, Russia). *Georesursy = Georesources*, 21(1), pp. 2-14. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.3-14>

References

- Akhmetov R.M. (2013). Mercury in nature and man-made formations. *Geologicheskii sbornik*, 10, pp. 222-224. (In Russ.)
- Alpers C.N., Humerlach M.P., May J.T., and Hothem R.L. (2005). Mercury Contamination from Historical Gold Mining in California. U.S. Geological Survey. Fact Sheet 2005-3014. Version 1.1. <https://doi.org/10.3133/fs20053014>
- Chanturiya V.A., Vigdergauz V.E. (2008). Innovative technologies for processing technogenic mineral raw materials. *Gornyy zhurnal*, 6, pp. 71-74. (In Russ.)
- Craw D., Lilly K. (2016). Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 79, pp. 301-315. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.001>
- Fairbrother L., Brugger J., Shapter J., Laird J.S., Southam G., Reith F. (2012). Supergene gold transformation: biogenic secondary and nanoparticulate gold from arid Australia. *Chemical Geology*, 320-321, pp. 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.025>
- Groen, J.C., Craig, J.R., Rimstidt, J.D. (1990). Gold-rich rim formation on electron grains in placers. *Can. Mineral*, 28, pp. 207-228.
- Hough R., Noble R., Reich M. (2011). Natural gold nanoparticles. *Ore Geology Reviews*, 42, pp. 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.003>
- Kuznetsova I.V. (2011). Geology, fine and nano-sized gold in placer minerals of the Nizhneselmdzhinsky node (Priamurye). *Avtoref. dis. k. geol.-min. n.* [Abstract Cand. geol. and min. sci. diss.]. Krasnoyarsk: SFU, 21 p. (In Russ.)
- Kuznetsova I.V., Moiseenko V.G. (2011). Behavior of gold and lead in the hypergenesis zone. *Rudy i metal'y*, 2, pp. 24-27. (In Russ.)
- Kuznetsova I.V., Safronov P.P., Moiseenko N.V., Kharitonov V.I. (2015). Features of native micro- and nanogold in the hypergenesis zone (Priamurye). *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki*, 11(89), pp. 225-230. (In Russ.)
- Kuznetsova I.V., Moiseenko N.V., Safronov P.P., Sinyakova N.I. (2017). Consanguinity of radioactive elements and gold in the minerals of the Priamurye. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki*, 11(113), pp. 79-85. (In Russ.)
- Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A., Naumova O.B., Lebarge W., Dilly R.A. (2016). Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 85, pp. 321-335.
- Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. (2008). Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison “Garimpo”, Amazon, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 25, pp. 259-376. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.06.002>
- Lengke M.F., Fleet M.E., Southam G. (2006). Morphology of gold nanoparticles synthesized by filamentous cyanobacteria from gold(I)-thiosulfate and gold(III)-chloride complexes. *Langmuir*, 22, pp. 2780-2787. <https://doi.org/10.1021/la052652c>

- Lengke M.F., Ravel B., Fleet M.E., Wanger G., Southam G. (2006). Mechanisms of gold bioaccumulation by filamentous cyanobacteria from gold(III)-chloride complex. *Environmental Science and Technology*, 40, pp. 6304-6309. <https://doi.org/10.1021/es061040r>
- Marakushev S.A., Kovalevskaya A.N., Safronov P.P., Borodavkina O.N., Moiseenko V.G. (1989). Bacterial gold recrystallization. *Doklady AN SSSR [Proc. of the USSR Academy of Sciences]*, 308(2), pp. 482-485. (In Russ.)
- Mirzekhanova Z.G., Mirzekhanov G.S., Debelaya I.D. (2014). Tekhnogennyye obrazovaniya rossypanykh mestorozhdeniy zolota: resursno-ekologicheskyye aspekty otrabotki [Technogenic formations of alluvial gold deposits: resource and environmental aspects of mining]. Khabarovsk: DVO RAN, 297 p. (In Russ.)
- Moiseenko V.G. (2007). Ot atomov zolota cherez klastery, nano- i mikroskopicheskiye chastitsy do samorodkov blagorodnogo metalla [From gold atoms through clusters, nano- and microscopic particles to originals of noble metal]. Blagoveshchensk: DVO RAN, Amurskoye otdeleniye RMO, 187 p. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Kuznetsova I.V. (2010). The role of nanoparticles of gold, silver and lead in the formation of noble metals deposits. *Doklady Earth Sciences*, 430(3), pp. 377-381. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Moiseyenko N.V., Safronov P.P. (2010). Nanoscale gold in the ores of the Pokrovsky deposit. *Doklady Earth Sciences*, 435(4), p. 527-530. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Moiseyenko N.V. (2012). The concentration of gold nanominerals in the process of ore formation in the Pokrovsky deposit. *Doklady Earth Sciences*, 444(1), pp. 73-76. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1028334X12050054>
- Moiseenko V.G., Kuznetsova I.V. (2014). Nanogold in ancient limestones and dolomites of the Ocyabrskoe ore field (Priamurye). *Doklady Earth Sciences*, 456(4), pp. 692-695. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1028334X1406018X>
- Moiseenko V.G., Kuznetsova I.V. (2017). The relationship of uranium, gold and carbon in ore formation. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 12, pp. 40-47. (In Russ.)
- Myagkaya I.N., Lazareva, E.V., Gustaytis, M.A., Zhmodik S.M. (2016). Gold and Silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Re-precipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*. 165, 8-22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.016>
- Naumov V.A., Naumova O.B. (2010). On the directed formation of deposits on the example of man-made gold placers. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki*, 1, pp. 282-287. (In Russ.)
- Naumov V.A., Naumova O.B. (2013). Reorganization of gold in man-made placers. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 5, pp. 531-532. (In Russ.)
- Neronskiy G.I., Dobraya V.T. (1975). Peculiarities of the composition of gold from placers of the Nizhneselmidzhinsky region. *Amurskiy kraeved*, pp. 86-100. (In Russ.)
- Petrovskaya N.V. (1973). Samorodnoe zoloto [Native gold]. Moscow: Nauka, 348 p. (In Russ.)
- Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. (2016). Bacterial biofilms on gold grains-implications for geomicrobial transformations of gold. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(6), fiv082. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiv082>
- Reith F., Fairbrother L., Nolze G., Wilhelm O., Clode P.L., Gregg A., et al. (2010). Nanoparticle factories: biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation. *Geology*, 38, pp. 843-846. <https://doi.org/10.1130/G31052.1>
- Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. (2012). Supergene gold transformation: Secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand. *Chemical Geology*, 320, pp. 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>
- Safronov P.P., Shkolnik E.L., Neronskiy G.I. (1998). Unusual structures of gold from the placer of the Oktyabrskoe gold-bearing node of the Amur Region. *Mat. III-go regional'nogo soveshchaniya: Mineralogiya Urala* [Proc. III Regional Sem.: Mineralogy of the Urals]. Vol. 2. Miass, pp. 109-111. (In Russ.)
- Safronov P.P., Moiseenko N.V., Moiseyenko V.G. (2011). Nanoscale native gold in minerals of the Pioneer deposit (Priamurye) according to electron microscopic studies. *Mat. XVII Ross. simp. po rastrovoy elektronnoy mikroskopii i analiticheskim metodam issledovaniya tvërdykh tel (REM-2011)* [Proc. XVII Russ. Simp. on scanning electronic microscopy and analytical methods in studying solids]. Chernogolovka, pp. 206 (In Russ.)
- Safronov P.P., Kuznetsova I.V. (2016). Nanogold in rocks associated with native gold in the man-made placers of the Priamurye. *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoyeniya prirodnykh resursov Vostochnoy Azii: Mat. IV-y Vseross. nauch. konf.* [Proc. IV All-Russ. Conf.: Problems of geology and integrated development of natural resources of the Eastern Asia]. Blagoveshchensk: ITiG DVO RAN. pp. 112-115. (In Russ.)
- Safronov P.P., Kuznetsova I.V. (2017). Special features of composition of native gold from technogene placers on the example of the Nizhneselmidzhinsky gold-bearing node (Priamurye). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 328(2), pp. 46-58. (In Russ.)
- Saryg-ool B.Yu., Myagkaya I.N., Kirichenko I.S. et al. (2017). Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings. Part I. *Geochemistry and mineralogy. Science of the Total Environment*, 581-582, pp. 460-471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.154>
- Shilo N.A. (2000). Ucheniye o rossypanykh [Teaching about placers]. Moscow: Izd. Akademii gornykh nauk, 632 p. (In Russ.)
- Shuster J., Southam G. (2015). The in-vitro «growth» of gold grains. *Geology*, 43(1), pp. 79-82. <https://doi.org/10.1130/G36241.1>
- Shuster J., Lengke M., Marquez-Zavalia M.F., Southam G. (2016). Floating gold grains and nanophase particles produced from the biogeochemical weathering of a gold-bearing ore. *Economic Geology*, 111, pp. 1485-1494. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.6.1485>
- Shuster J., Reith F., John G.C., John E.P., Southam M.P.G. (2017). Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments. *Chemical Geology*, 450(5), pp. 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.027>
- Southam G., Lengke M.F., Fairbrother L., Reith F. (2009). The biogeochemistry of gold. *Elements*, 5, pp. 303-307. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.303>
- Sobolev I.S., Lobov E.I., Aleksandrov A.N. et al. (1997). Manual on the assessment of the impact of mining on the environment and ecological justification of the economic activities of mining enterprises. *Ekologicheskaya ekspertiza*, 6, pp. 2-70. (In Russ.)
- Tarasenko I.A., Kharitonova N.A., Ovodova E.V., Zin'kov A.V., Korzun A.V. (2017). Transformation of mineralogical and geochemical composition of tails and its influence on the high mineralization water origination (Primorye region, Russia). *Tikhookeanskaya geologiya*, 36(2), pp. 106-118. (In Russ.)
- Tarasenko I.A., Kharitonova N.A., Zin'kov A.V., Ovodova E.V., Korzun A.V. (2017a). Tailing Dumps at the Krasnorechenskaya Concentration Mill (Primorskii krai, Russia): Geochemistry and Mineralogy. *Moscow University Geology Bulletin*, 72(3), pp. 192-199. <https://doi.org/10.3103/S014587521703005X>
- Tarasenko I.A., Zinkov A.V., Ovodova E.V., Petukhov V.I., Solyanik I.V. (2017b). Geochemistry and mineralogy of old concentration tailings (Dalnegorskiy ore district, Primorsky krai, Russia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (EES)*, 87, 042023. DOI 10.1088/1755-1315/87/4/042023
- Telmer K.H., Veiga M.M. (2008). World emissions of mercury from small scale artisanal gold mining and the knowledge gaps about them. In M. Pirrone and R. Mason (Eds.), Mercury fate and transport in the global atmosphere: Measurements, models and policy implications. Geneva: UNEP, pp. 96-129.
- Yesares L., Saez R., Nieto J.M., Almodovar G.R., Cooper S. (2014). Supergene enrichment of precious metals by natural amalgamation in the Las Cruces weathering profile (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). *Ore Geology Review*, 58, pp. 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.10.004>

About the Authors

Inna V. Kuznetsova – PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Nanomineralogy Laboratory, Institute of Geology and Nature Management of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

1, Relochny Lane, Blagoveshchensk, Amur region, 675000, Russian Federation

Tel: +7(4162)53-52-48, e-mail: kuzia67@mail.ru

Petr P. Safronov – PhD (Physics and Mathematics), Researcher of the Geochemistry Laboratory, Institute of Geology and Nature Management of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

159, 100-Letiya Ave., Vladivostok, 690022, Russian Federation
Tel: +7(4232)31-85-20, e-mail: psafonov@mail.ru

Natalya V. Moiseenko – PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Nanomineralogy Laboratory, Institute of Geology and Nature Management of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

1, Relochny Lane, Blagoveshchensk, Amur region, 675000, Russian Federation

Tel: +7(4162)53-52-48, e-mail: kaunamka82@mail.ru

Manuscript received 28 June 2018;

Accepted 10 November 2018; Published 30 March 2019