

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.23>

УДК 549.283(571.62)

Минералого-технологические особенности золота из россыпей южного склона Белой Горы (Хабаровский край) и этапы его формирования

Н.А. Лаврик*, Н.М. Литвинова, А.В. Лаврик

Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

Золотороссыпное месторождение ручьёв Покровский и Верный сформировано на южном склоне г. Белая Гора (Хабаровский край) (в 300 м от вершины), где ручьи дренируют золоторудные образования одноименного месторождения. Содержание золота в отвалах разработок россыпей прошлых лет нередко достигает промышленных концентраций, что позволяет их повторно перерабатывать, при этом часть золота вновь уходит в отвалы. Рудно-россыпное поле представляет собой сложную вулканическую структуру с концентрически-зональным строением, подчёркнутым разломами. В работе изучены минералого-технологические особенности золота в пробах продуктов обогащения с доводочного шлихобогатительного участка (магнитная и электромагнитная фракция, хвосты стола) каждого из ручьёв. С помощью сканирующего электронного микроскопа исследовано 135 зёрен золота размером от 10–15 мкм до 3 мм. По составу и морфологии выделено шесть основных видов: высокопробное в виде изометричных кристаллов; сростки кристаллов золота с примесью серебра 0–29 мас.%; дендриты золота с примесью серебра до 41 мас.%; амальгамы золота и серебра с изменчивым содержанием ртути; рыхлые образования вейшанита $(\text{Au}, \text{Ag})_3\text{Hg}_2$ желтовато-серого цвета с постоянным соотношением элементов; сростки рудных инерудных минералов с золотом, в которых драгоценный металл составляет менее половины зерна. Все зёрна золота имеют уплощённую форму, вариативно содержат включения глинистых минералов, кварца, гематита, ильменита, магнетита, лимонита. В пробах в минеральной ассоциации с золотом выделены зёрна самородных металлов и интерметаллидов. Выявленные особенности золота показывают, что формирование драгоценного металла связано с гипогенными и эпигенетическими процессами, а также с флюидными эманациями, поступающими по поздними глубинным разломам. Для эффективного извлечения золота требуется многостадийное обогащение.

Ключевые слова: золотороссыпное месторождение ручьёв Покровский и Верный, золоторудное месторождение Белая Гора, золото, электрум, амальгама, вейшанит, сростки, потери золота

Для цитирования: Лаврик Н.А., Литвинова Н.М., Лаврик А.В. (2023). Минералого-технологические особенности золота из россыпей южного склона Белой Горы (Хабаровский край) и этапы его формирования. *Георесурсы*, 25(3), с. 198–207. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.23>

Введение

При разработке золотороссыпных месторождений и извлечении драгоценного металла часть золота уходит в отвалы, что может быть связано с техническим несовершенством применяемого оборудования, присутствием линз многолетнемёрзлых пород и большого количества тяжёлых минералов, а также с геологическими особенностями формирования россыпей и минералого-технологическими характеристиками золота (Гольдфарб, Прейс, 2010; Кузнецова и др., 2019; Шило, 2000; Мирзеханов, Мирзеханова, 2022).

Месторождение россыпного золота ручьёв Покровский и Верный сформировано в их долинах на южном склоне г. Белая Гора (Николаевский район Хабаровского края), которая, в свою очередь, представляет собой месторождение рудного золота с одноимённым названием. Ручьи начинаются в непосредственной близости от месторождения и дренируют золоторудные породы.

Стабильная добыча золота в россыпях велась в 1977–2003 гг. Отработка осуществлялась дражным и гидравлическим способом. Отрабатывались балансовые и забалансовые запасы, также вторичной переработке подвергались отвалы хвостов. За указанный период было добыто 1011,2 кг золота. Среднее содержание золота в горной массе составляло 356 мг/м³. Не затронутыми эксплуатацией оставались верхний участок в долинах ручьёв Покровский и Верный, а также нижний участок ручья Покровский. Добыча золота возобновилась в 2017 г.; запасы золота на момент эксплуатации составляли 437,5 кг. По материалам эксплуатационных работ на россыпях подавляющая часть продуктивных золотоносных осадков представлена плотными вязкими глинами, что значительно затрудняет их промывку. Содержание золота в отвалах отработок прошлых лет, по разведочным данным, в большинстве достигает промышленных концентраций, что позволяет подвергнуть их повторной переработке. Основной проблемой при добыче золота из россыпей южного склона Белой Горы является потеря золота при промывке и обогащении с использованием магнитной сепарации.

Целью настоящей работы являлась оценка проб доводочного шлихобогатительного участка из россыпей

* Ответственный автор: Наталья Анатольевна Лаврик
e-mail: lavrik@jgd.khv.ru

© 2023 Коллектив авторов
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

верховий ручьёв Покровский и ручьёв Верный на содержание золота и определение основных характеристик золота по следующим пробам: магнитная и электромагнитная фракции, хвосты стола.

Краткая геологическая характеристика

Характеристика золотороссыпного месторождения ручьёв Покровский и Верный дана по фондовым материалам (Отчёт..., 1975¹; Технический проект..., 2017²; Отчёт..., 2019³). Месторождение охватывает пролювиально-делювиальные и делювиально-аллювиальные россыпи, сформировавшиеся в долинах ручьёв Покровский и Верный. Оно находится в непосредственной близости от разрабатываемого месторождения рудного золота Белая Гора (рис. 1), в Белогорском рудно-россыпном узле. Ручей Покровский и его левый приток, ручей Верный расположены в бассейне р. Коль, впадающей в Сахалинский залив Охотского моря; имеют протяженность соответственно 9 и 1,6 км. Ширина долин колеблется от 100–200 до 300–500 м. Площадь является одним из отрогов хребта Сихотэ-Алинь. Она представляет собой плоскую возвышенность с пологими склонами, покрытыми делювием, мощность которого местами достигает 20 м и более.

Исследования проводились по пробам из отрабатываемой части россыпи – площади слияния ручьёв Покровский и Верный (участок 1 на рис. 1).

Золото в россыпи весьма неравномерно рассеяно по всей толще песчано-глинистых отложений с дресвой, щебнем, мелкими глыбами. Нижняя граница промышленной золотоносности в среднем достигает 12,8 м от дневной поверхности. Продуктивный пласт литологически не выражен и выделяется по данным опробования. Рыхлые отложения подстилаются выветрелыми, дезинтегрированными базальтоидами сизиманской толщи ($\varrho_{2-3}sz$). По фондовым материалам (Отчёт..., 1975; Отчёт..., 2019), золото в пролювиально-делювиальной россыпи ручьёв Покровский и Верный представлено золотинами неокатанными, часто в сростках с кварцем, реже с лимонитом и еще реже с пиритом. В россыпи преобладает мелкое золото (до 0,9 мм) – 94,8%, крупное золото размером 1 мм и более составляет 5,2%. Цвет зеленовато-жёлтый, форма дендритовидная, крючковатая, проволочковидная. Пробность золота 695. Содержание золота в отвалах (Отчёт..., 1975) в большинстве проб достигает промышленных концентраций, что позволяет подвергнуть их повторной переработке.

Россыпи золота указанных ручьёв начинаются от границ золоторудного месторождения Белая Гора, поэтому рассмотрим кратко основные черты его геологического

¹Отчёт о результатах геологических работ на южном склоне Белой Горы с пересчётом запасов россыпного золота по месторождению Покровский-Верный по состоянию на 01.09.1975 г. (По работам Херпучинской партии за 1968–1975 гг. (1975). Отв. исполнители Чирков П.Л., Желонин К.К., Соснин А.Л. Хабаровск, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу».

²Технический проект разработки месторождения россыпного золота ручьёв Покровский-Верный в 2017–2025 гг. (2017). Отв. исполнители Гостев А.А., Мейран Р.В. Хабаровск, Фонды ТКР Дальнедра.

³Отчёт по результатам геологоразведочных работ на рудное золото на флангах месторождения Белая Гора в 2016–2018 гг. (2019). Отв. исполнитель Бирюков Е.И. Хабаровск, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу».

строения по материалам ранее проведенных исследований (Петровская, 1973; Онихимовский, Беломестных, 1996; Моисеенко, Эйриш, 1996; Мишин, 1999; Володькова, 2010; Константинов, Косовец, 2010; Остапенко, Нерода, 2019; Отчёт..., 2019). Месторождение Белая Гора относится к золотосеребряному эпимеральному жильному типу с примесями Hg, Cu, Pb, Zn. Расположено в районе тектонического сжатия Северно-Сихотэ-Алинского вулканогенного пояса. Рудное поле месторождения представляет собой сложную вулканическую структуру, по аэрогеофизическим данным (Володькова, 2010) имеет концентрически-зональное строение. Выделяется несколько зон, подчёркнутых кольцевыми разломами. С разрывными нарушениями часто связаны подземные воды, которые проявляются в виде мочажин, родников и приурочиваются к бортовым частям склонов. В пределах рудно-россыпной площади обнажаются покровы вулканогенных пород (верхний мел – нижний палеоген $K_2 - \varrho_1$) разнообразного состава и слаболитифицированные отложения миоцена. Ручьи Покровский и Верный дренируют эоцен-олигоценовые (ϱ_{2-3}) породы. Среди вулканогенных пород развиты базальты, андезибазальты, трахибазальты, трахиандезибазальты, встречаются лейкобазальты, андезиты, долериты, габбро-долериты и останцы вулканогенно-осадочных туфов риолитов, риодакитов, трахидацитов, дацитов, туффитов, туфопесчаников, туфоконгломератов. Покровные образования прорваны расширяющимися к поверхности олигоценовыми (ϱ_3) экструзиями трахидацитов и трахитов размером до 750–800 м. К радиальным и кольцевым трещинам вокруг кальдеры вулкана приурочены дайки полевошпатовых порфиров, брекчии взрыва. Породы Белой Горы брекчированы, интенсивно гидротермально-метасоматически изменены: пропилитизированы, аргиллизированы; развиты адуляризация, окварцевание. Само месторождение является золоторудным штокверком. Вкрашенность рудных минералов убогая. Рудные минералы представлены золотом, серебром, аргентитом, пиритом, марказитом, халькопиритом, сфалеритом, киноварью, галенитом, гематитом. Известно, что золото на Белой Горе встречается в срастании с киноварью. Для рудных тел характерны разрозненные обогащённые участки.

Руды обогащались гравитационными методами с последующей раздельной гидрометаллургической переработкой концентратов методами интенсивного и сорбционного цианирования с вывозом концентрата на золотоизвлекательную фабрику, принадлежащую компании предприятия Многовершинное (Халилова, 2011). В конце 2014 г. на предприятии была открыта новейшая химическая лаборатория, а в начале 2015 г. были введены в эксплуатацию циклы дополнительной гравитации с сорбционным выщелачиванием и элюирования. Эти нововведения были призваны повысить показатели извлечения до более чем 80%. Среднее содержание золота в руде составляет 1,874 г/т по данным на 01 января 2020 г. (Золоторудное..., 2020).

Методы исследований

В настоящей работе исследованы пробы весом от 350 г до 2,5 кг с доводочного участка шлихобогатительной установки (россыпи ручьёв Покровский и Верный). Предварительную оценку основного элементного состава

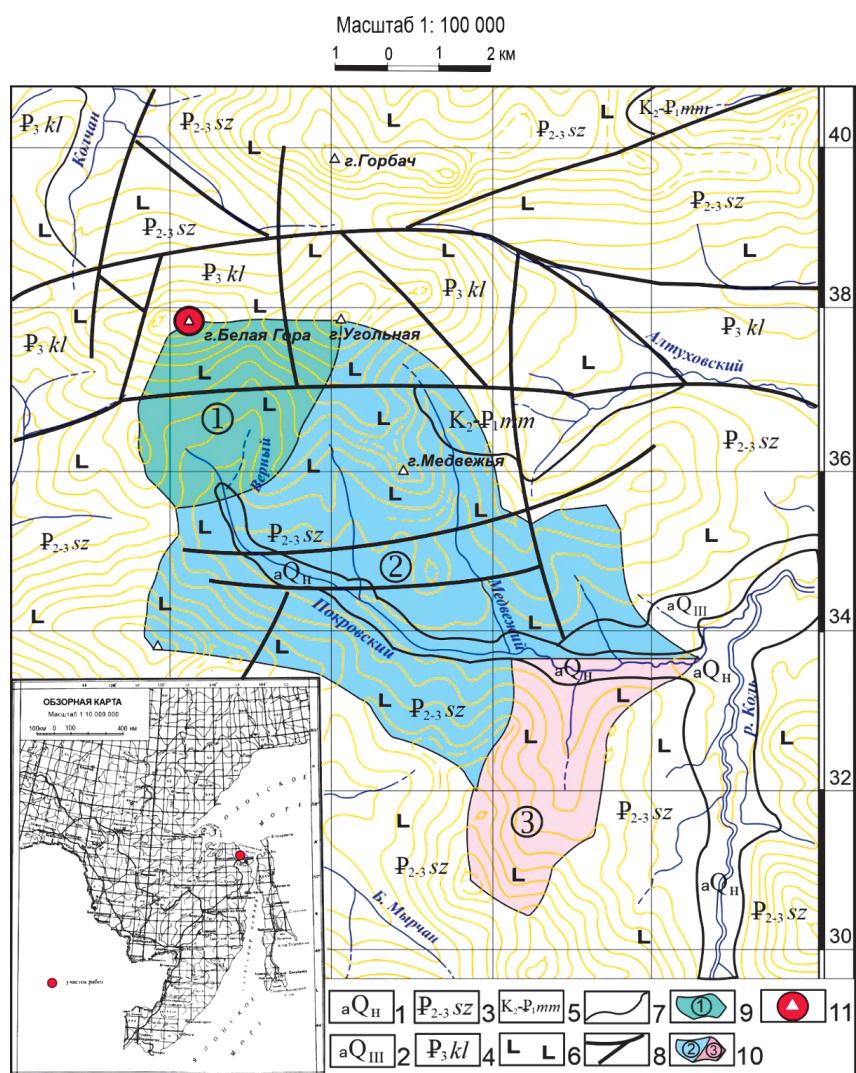


Рис. 1. Схема расположения и схематическая геологическая карта района золотороссынного месторождения ручьёв Покровский и Верный. Масштаб 1:100 000. Условные обозначения: 1 – голоценовые отложения нерасчленённые (аллювиальные галечники, гравийники, суглинки, глины); 2 – верхнее звено (нерасчленённые отложения. Аллювиальные галечники с валунами и гравием, суглинки, глины, пески); 3 – сизиманская толща (трахиандезибазальты, трахибазальты, базальты, лейкобазальты, долериты, андезиты, туфы базальтов, туффиты, туфоконгломераты, туфопесчаники, бурые угли); 4 – колчанская свита (трахидациты, игнимбриты трахидацитов, трахириодиацитов, трахиандезибазальты, трахиандезиты); 5 – маломихайловская свита (игнимбриты и туфы риодиацитов, трахидацитов, риолитов, дацитов, андезитов, туффитов, туфопесчаников); 6 – базальтовый комплекс пород и суббулканические образования; 7 – геологические границы; 8 – тектонические нарушения; 9 – (1) площади водостоков и сноса материала для верхнего отрабатываемого участка золотороссынного месторождения ручьёв Покровский и Верный; 10 – площади водостоков и сноса материала для среднего отработанного (2) и нижнего (3) участков золотороссынного месторождения ручьёв Покровский и Верный; 11 – разрабатываемое золоторудное месторождение Белая Гора. (Использованные материалы: Отчёт..., 1975; Технический проект..., 2017; Отчёт..., 2019)

проб по каждому ручью (магнитная и электромагнитная фракции, хвосты стола) проводили с применением рентгенофлуоресцентного анализатора Mobilab X-50 (Innov-Systems Inc, США). Количественный анализ на золото проводили с помощью пламенного атомно-абсорбционного метода (методики НСАМ 131-С).

Из каждой пробы выбрали зёрна золота различной величины. Качественный минералогический анализ выполняли с применением микроскопов Stemi 2000, Stereo Discovery V8 (Carl Zeiss, Германия), сканирующего электронного микроскопа JEOL (Япония), оснащенного энергодисперсионным рентгеновским анализатором JCM-6000 PLUS (ускорение 15 кВ, зондирующий ток 7,475 нА, применяемое увеличение – от 20 до 2000) (JEOL, Япония).

Зёрна и сростки закрепляли на специальных столиках и изучали в режимах вторичных и обратно-рассеянных электронов; в каждом зерне исследовали 5–10 точек от центра к краю. На сканирующем электронном микроскопе определяли морфологию и структуру зёрен золота, характер поверхности, состав, включения и вrostки других минералов, вычисляли пробность золота. Обобщённые выводы сделаны по всем пробам.

Результаты

При промывке на лотке установлено, что доля свободного гравитационно извлекаемого золота составляет около 43%; соответственно 57% – золото в сростках, химически связанное и пр.

В настоящей работе представлены результаты изучения вещественного состава проб и зёрен золота, извлечённых из магнитной, электромагнитной фракций и хвостов стола после ручной доводки. Установлено, что магнитная фракция состоит преимущественно из магнетита и титаномагнетита, отмечается выделения интерметаллидов хроможелезистого и железохромистого переменного состава. До 10% минеральных образований в магнитной фракции имеют сферические формы выделения различного размера. Электромагнитная фракция представлена ильменитом, гематитом, титаногематитом; встречается гранат, оливин, хромпикотит, гибнерит, различные интерметаллиды. В немагнитной фракции (хвостах) преобладает циркон, минералы редкоземельных минералов, которые также отмечаются в сростках с ильменитом, гематитом и титаногематитом.

С помощью сканирующего электронного микроскопа изучено 135 зёрен золота величиной от 10–15 мкм до 3 мм (от пылевидного до крупного), единично – тонкодисперсное золото в доли мкм.

Изученные зёरна золота весьма разнообразны по величине, морфологии, основному составу, количеству и составу примесей, включений. По составу и морфологии можно выделить шесть основных видов зёрен золота.

1. Зёरна золота ярко-жёлтого цвета с золотистым блеском в виде отдельных кристаллов и сростков кристаллов

(кубических, ромбододекаэдрических), с малой долей примеси серебра (0,0–3,3 мас. %). Золото весьма высокопробное. Большая часть таких зёрен имеет несколько сглаженные уплощённые формы с элементами кристаллографических огранок. Поверхность неровная, характерны вариативные включения породообразующих, жильных (глинистых минералов, кварца, полевых шпатов, единично оливина, пироксенов) и рудных минералов (магнетита, ильменита, гематита, интерметаллидов Ni–Cr–Fe-состава и др.), которые могут составлять до 5–10% поверхности зерна. Пример одного из зёрен высокопробного золота из указанных россыпей показан на рис. 2.

2. Уплощённые зёрна золота жёлтого и зеленовато-жёлтого цвета с ярким золотистым блеском, обычно сложной формы, представляющие собой сростки изометрических и удлинённых кристаллов (в некоторых случаях пластинчатых изогнутых) с вариативным содержанием примеси Ag в отдельных кристаллических (от 0,0 до 29 мас. %). В сростках встречаются кристаллики как чистого золота, так и электрума (рис. 3). Размер отдельных кристаллов золота составляет от 50 до 500 мкм. Зёरна золота вариативно содержат микронные включения рудных и породообразующих минералов, в межзерновом пространстве отмечаются вrostки кварца, калий-натровых полевых шпатов, глинистых минералов,

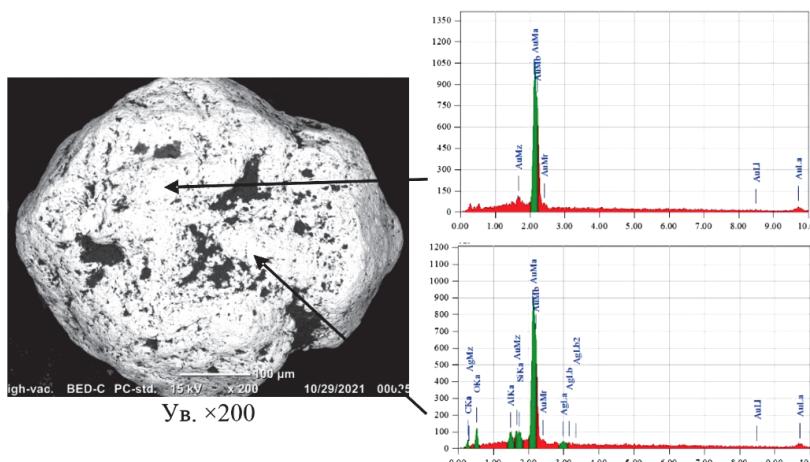


Рис. 2. Зерно золота ($0,55 \times 0,45$ мм) с элементами кристаллографических огранок – сросток уплощённых кристаллов. Фотография со сканирующего электронного микроскопа. Показаны энергодисперсионные спектры элементов (зелёным цветом – основные пики)

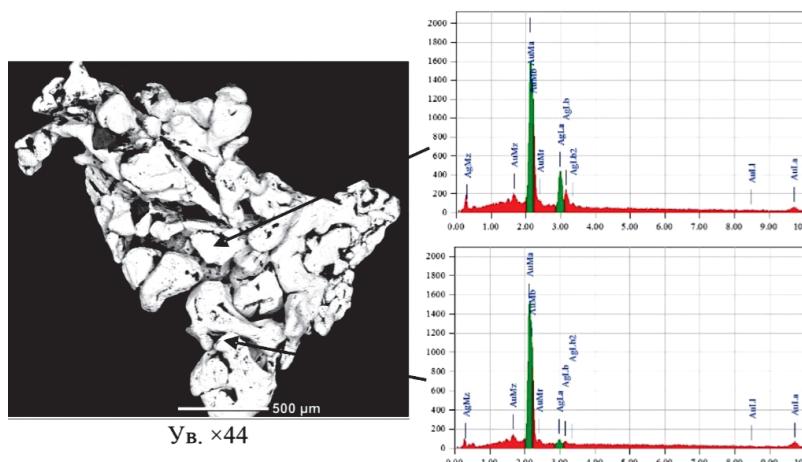


Рис. 3. Уплощённый сросток ($2,0 \times 1,0$ мм) кристаллов золота изометрической и удлинённой формы с изменчивым содержанием примеси серебра. Фотография со сканирующего электронного микроскопа. Показаны энергодисперсионные спектры элементов (зелёным цветом – основные пики)

высокоуглеродистых образований, магнетита, гематита, ильменита от 2–3% до 5–10% поверхности зерна.

3. Зёрна золота бледно-жёлтого, зеленовато-жёлтого цвета с золотистым блеском, представляющие дендритовидные сростки (рис. 4) из удлинённых и коротких кристаллов, прямых или изогнутых, пластинчатых образований величиной от 30–50 мкм до 0,5–1 мм; встречаются крючковатые, проволочковидные разности. Золото (электрум) в разных точках содержит примесь серебра от 8,74 до 41,2 мас. %. На некоторых удлинённых кристалликах отмечаются нарости изометрических кристаллов золота с низким содержанием примеси серебра. Вариативно могут отмечаться примеси железа до 2,07 мас. %, ртути до 7,47 мас. %. Несмотря на рыхлое строение, зёрна золота содержат включения различной величины породообразующих и рудных минералов до 5–10% поверхности. Промежутки между отдельными образованиями золота выполнены глинистыми минералами, кварцем, магнетитом, ильменитом, сферическими, почковидными и лучистыми выделениями гематита с примесью марганца.

4. Зёрна очень светлого желтоватого и сероватого цвета разных оттенков с металловидным блеском амальгамы золота и электрума, неправильной формы со слаженными оплавившими границами, в некоторых случаях с пропущенными элементами кристаллографических огранок (рис. 5). Форма зёрен разнообразная: от простой скруглённой до сложных оплавивших дендритовидных сростков (т.е. амальгамы вторичны). Поверхность зёрен нередко натёчная,

неровная, обычно тонкопористая. В порах содержатся мельчайшие включения глинистых минералов. Примесь серебра, как и примесь ртути, даже в одном зерне может варьировать, составляя от 5–10 до 30,3 мас. %. Единично в золоте установлены примеси меди, осмия, иридия, тантала, ниобия. В углублениях зёрен амальгам золота содержатся выделения глинистых минералов, ильменита, гематита, магнетита, интерметаллидов Fe–Cr- и Cr–Fe-состава, высокоуглеродистых образований. Амальгамы встречаются в виде отдельных зёрен, а также в виде округлых корочек, налётов на других минералах.

5. Зёрна вейшанита (Ag_3Au_2) Hg_2 светлого желтовато-серого, сероватого цвета с металловидным блеском или матовые, образующие отдельные рыхлые сростки мельчайших (5–30 мкм) призматических кристалликов, пластинчатых пакетов (рис. 6). Вейшанит встречается в виде мелких самостоятельных выделений, визуально похожих на пушистую пыль, реже в виде рыхлых налётов, частично покрывающих зёрна кварца, магнетита, гематита, ильменита. В отдельных случаях при больших увеличениях в кристалликах просматривается гексагональное сечение. Величина кристалликов от 2–3 до 20 мкм. Золото содержит высокую примесь серебра (до 20 мас. %) и ртути (до 35 мас. %). Состав и соотношение Au, Ag и Hg в призматических кристаллах и пластинчатых пакетах довольно стабильны. В амальгамах электрума содержание золота обычно выше, чем в вейшаните. Может содержаться примесь железа, ниobia. В углублениях кристалликов

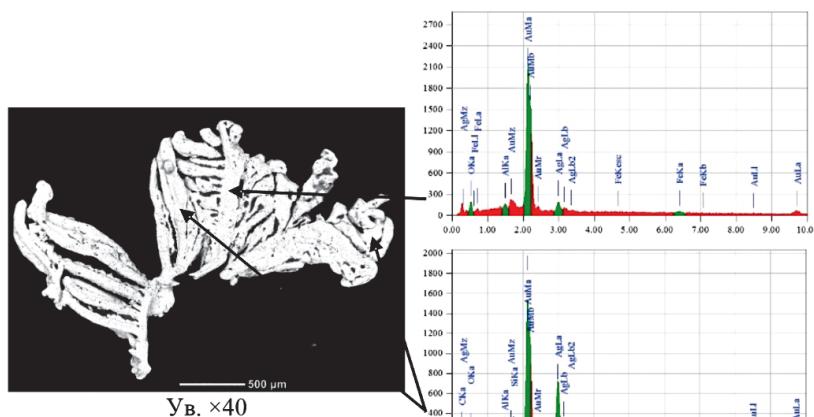


Рис. 4. Уплощённое дендритовидное зерно золота (2,8 × 1,8 мм). Фотография со сканирующего электронного микроскопа. Показаны энергодисперсионные спектры элементов (зелёным цветом – основные пики)

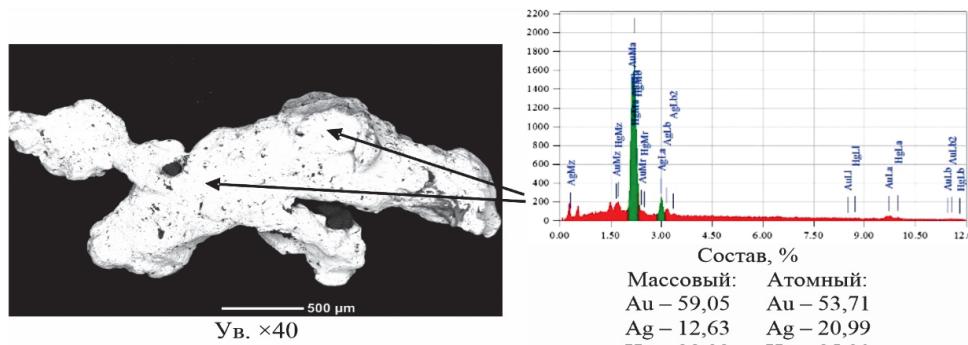


Рис. 5. Зерно амальгамы электрума (3,0 × 1,2 мм) сложной формы. Фотография со сканирующего электронного микроскопа. Показаны энергодисперсионные спектры элементов (зелёным цветом – основные пики)

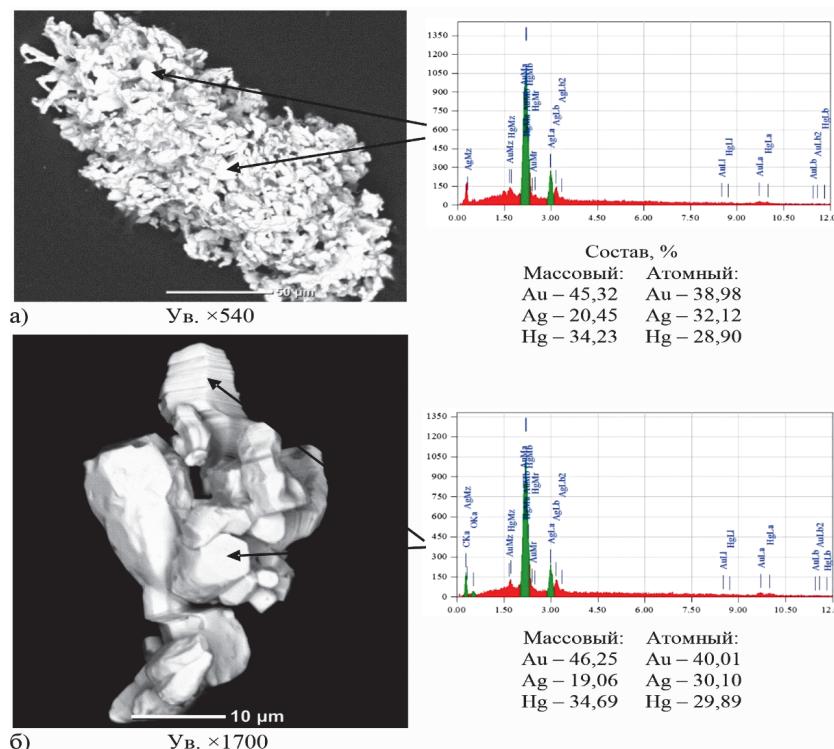


Рис. 6. Зёрна вейшанита: а) овальное, рыхлой структуры зерно (210×100 мкм), сложенное узкими призматическими кристаллами; б) сросток (50×25 мкм) призматических кристаллов и пластинчатых пакетов. Фотографии со сканирующего электронного микроскопа. Показаны энергодисперсионные спектры элементов (зелёным цветом – основные пики)

присутствуют включения оксидов железа, плагиоклазов, калий-натровых полевых шпатов, альбита, азотисто-высокоуглеродистых образований с галитом, в некоторых случаях – хлориды и оксиды ртути (каломель HgCl и монтреонит HgO). Ранее вейшанит на золотороссыпных месторождениях в пределах Белой Горы не упоминался.

Минерал вейшанит $(\text{Au},\text{Ag})_{1,2}\text{Hg}_{0,8}$ или $(\text{Ag},\text{Au})_3\text{Hg}_2$ был открыт впервые в Китае и зарегистрирован в 1984 г., имеет гексагональную сингонию (Li et al., 1984).

6. Зёрна, представляющие собой сростки породообразующих и рудных минералов с золотом примерно в равных соотношениях, либо с преобладанием породообразующих минералов до 80–90%. При этом золото по составу может быть разным, например, электрум с высоким содержанием примеси серебра или сростки, в которых золото разной пробы. Сглаженность зёрен золота также может

различаться. К этой же разновидности мы отнесём зёрна породообразующих и рудных минералов, неравномерно покрытыми налётами, корочками, округлыми лепёшковидными, ажурными или тонкопористыми выделениями амальгамы золота и вейшанита. Из породообразующих и жильных – кварц, глинистые минералы либо то и другое с включениями железистых и титаножелезистых минералов (титаномагнетита, магнетита, гематита, ильменита). Пример зерна кварца с вростками кристаллов электрума показан на рис. 7.

Необходимо также отметить тонкодисперсное золото (от долей до 10 мкм), встречающееся в глинистых комочках, кварце, арсенопирите, марказите и ильмените при исследованиях на электронном микроскопе. Подобные выделения золота имеют круглые формы; встречаются как отдельными самостоятельными вкраплениями,

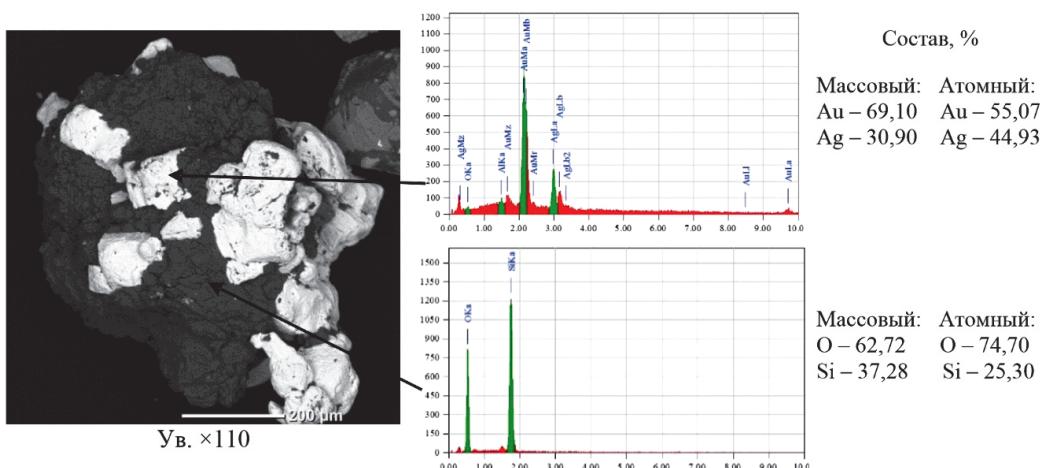


Рис. 7. Сросток ($0,9 \times 0,6$ мкм) кварца с кристалликами электрума величиной от 50 до 150 мкм. Фотография со сканирующего электронного микроскопа. Показаны энергодисперсионные спектры элементов (зелёным цветом – основные пики)

так и в агрегатах с самородными металлами или интерметаллидами Pb, Sb, Zn, Cu, Sn.

Кроме серебра в различных зёдрах золота в качестве примесей вариативно встречаются ниобий, ртуть, железо, алюминий, медь, свинец.

По результатам определения на электронном микроскопе весьма высокую и высокую пробность (900–1000‰) имеют 14% исследованных зёрен; среднюю (800–899‰) – 26%; относительно низкую (700–799‰) – 49%; низкую пробность (менее 700‰) – 11% исследованных зёрен.

В результате минералогического и электронно-микроскопического исследования проб золотороссыпного месторождения ручьёв Покровский и Верный выявлено, что с золотом в минеральной ассоциации встречаются гематит, титаногематит, ильменит, магнетит и титаномагнетит с примесью Mn, виостит FeO, а также хромит, хромпикотит, гюбнерит, шеелит, кассiterит и деревянистое олово, псиломелан, киноварь, рутил, сурик, циркон, гранат, фаялит и пироксены, минералы редкоземельных элементов, лимонит, пирит, марказит, арсенопирит, зёдра на самородного железа и интерметаллидов различного состава, самородные цинк, алюминий, медь и свинец, высокоуглеродистые образования.

Яркой характерной особенностью магнитной и электромагнитной фракций является присутствие многих самородных металлов и интерметаллидов, а также оксидов железа и титана в виде сфераидов (до 10%), их сростков, почковидных образований величиной от 50–70 мкм до 1–2 мм, в некоторых случаях с графической структурой.

Этапы формирования золота в рудном месторождении и россыпях

Рассмотрим возможные этапы образования золота, попадающего в россыпь.

Россыпи ручьёв Покровский и Верный формируются в 300 м от вершины г. Белая Гора (т.е. в непосредственной близости от месторождения рудного золота Белая Гора (рис. 1)), золото в россыпях практически не окатанное и имеет разнообразный состав. Судя по типоморфным характеристикам золота, формирование месторождения и россыпей было сложным.

Как уже отмечалось выше, золото с весьма высокой и высокой пробностью (950–1000‰) в виде хорошо обработанных, чуть уплощённых кристаллов и их сростков составляет около 14% исследованных зёрен. Н.В. Петровская отмечала, что максимально высокую пробу золото имеет в рудных телах, сформированных на больших глубинах (Петровская, 1973).

Золото, имеющее пробность от низкой до средней (от 593‰ до 882‰) и образующее дендритовидные сростки и сростки удлинённых и изометричных кристаллов преимущественно мелкого размера, с вариативными примесями серебра, а также железа, марганца, алюминия, ртути, меди составляет основную часть золота исследованных россыпей. Типоморфные характеристики подобного золота характерны для малоглубинных (эпигермальных) месторождений, формировавшихся в областях высокой вулканической активности с интенсивной переработкой пород (Петровская, 1973; Кондратьева, 2010).

Необходимо также отметить вейшанит и природные амальгамы золота, встречающиеся в россыпях

на отдельных участках. Несмотря на длительный срок изучения и эксплуатации золоторудного месторождения Белая Гора и золоторудных россыпей, сформированных в ручьях по склонам горы, а также на присутствие сростков киновари с золотом, упоминаний о вейшаните не встречается. По результатам наших исследований проб из золотороссыпного месторождения ручьёв Покровский и Верный вейшанит наблюдается в виде мельчайших рыхлых сростков и реже таких же рыхлых налётов на породообразующих и рудных минералах. Другие амальгамы золота и серебра чаще всего образуют плотные или рыхлые корочки и почки. В исследованных россыпях в амальгамах соотношение золота, серебра и ртути изменчиво, в вейшаните – стабильно. Вейшанит $(Au,Ag)_3Hg_2$ – природная амальгама золота – является единственным гипогенным минералом состава Au–Ag–Hg, имеющим собственное название (Li et al., 1984; Дамдинов и др., 2012). Вейшанит относится к упорным минералам.

Ртуть появляется в золоте при определённых условиях в месторождениях сложного генезиса. Ртуть встречается в малоглубинных месторождениях, однако известно, что по зонам проявлений Hg-содержащего золота можно распознавать крупные разломы глубокого заложения. Источниками рудных компонентов таких объектов являются мантийные флюиды, поступающие по глубинным разломам в пределах границ литосферных плит, что подтверждает известный факт о ртутной дегазации мантии. Неравномерный характер распределения ртути в золотинах указывает на продолжающийся процесс флюидной активности в открытых зонах аэрации, таких как коры выветривания, рыхлые отложения, аллювиальные и пролювиальные пески (Озерова, 1986; Гореликова и др., 2010).

С зонами глубинных разломов связана также минерализация самородных элементов и интерметаллидов. Самородные металлы и интерметаллические соединения являются указателями на действие трансмагматических металлоносных флюидов, состоящих из CH_4 , H_2 , CO, которые захватывают и переносят металлы (Новгородова, 1983; Гореликова и др., 2010; Медведев, Молчанов, 2013; Редин, 2015).

В россыпях ручьёв Покровский и Верный нами в минеральной ассоциации с золотом выявлены самородные элементы: Al, Zn, Fe, Cr, Pb, Sn, Sb, Cu – различные интерметаллиды. Хотя в данном случае присутствие самородных металлов может быть связано и с магматическими породами, и с формированием гидротермальных месторождений, и с глубинными разломами.

На глубинные источники могут указывать также мельчайшие включения азотисто-углеродистых и высокоуглеродистых образований в зёдрах золота и других самородных металлов и интерметаллидов. О флюидной активности может свидетельствовать и тот факт, что в тяжёлой фракции до 10% выделений минералов представлены микросферами (0,25–1,5 мм); это интерметаллиды железа и хрома в разных соотношениях, гематит, магнетит, графические срастания хромита и интерметаллида Fe_6Cr . Нередко они содержат включения до 3 мкм золото-серебро-ртутного состава. Таким образом, можно предположить, что амальгамы золота и вейшанит являются наиболее молодыми проявлениями золотой минерализации и связаны с глубинными разломами.

Итак, можно заключить, что золото, попадающее в россыпи, образовалось в три этапа: на 1-м этапе – глубинное высокопробное золото, вынесенное на поверхность в процессе формирования покровов базальтов-андезибазальтов, туфов и субвуликанических образований; на 2-м этапе – основное эптермальное золото с вариативным содержанием примесей серебра и малой долей ртути, связанное собственно с формированием штокверка золоторудного месторождения; на 3-м этапе образовались амальгамы Au–Ag и вейшанит, вынесенные флюидами по глубинным разломам на отдельных участках.

Обсуждение

По результатам исследований можно выделить основные минералого-технологические свойства трудноизвлекаемых зёрен золота, которые уходят в отвалы вне зависимости от размеров.

Зёрна золота содержатся в межзерновом пространстве, а также в качестве мельчайших вростков от 5–10% до 50–80% породообразующих и рудных минералов: глины (монтмориллонита, каолинита), кварца, полевых шпатов, титаножелезистых минералов с переменным содержанием примеси титана. Обилие глинистых минералов и сростков с кварцем способствует слабой промывистости. Присутствие магнетита, титаномагнетита в зёдрах золота придаёт, по-видимому, им определённые магнитные свойства. По данным японских исследователей (Yamamoto et al., 2004), наночастицы золота могут проявлять ферромагнитные свойства. Кроме того, имеющие большой удельный вес минералы, такие как магнетит, ильменит, хромит, кассiterит, тетрадимит, вольфрамит, содержащиеся в больших количествах в песках, накапливаются и уплотняются на шлюзах, мешая осаждению частиц благородных металлов (Алексеев и др., 2019; Мирзеханов, Мирзеханова, 2022).

Большинство зёрен золота (отдельные сглаженные кристаллики, комковатые и дендритовидные сростки, мельчайшие ажурные агрегаты и др.) имеет уплощенную форму. В магнитной и электромагнитной фракциях до 10% выделений минералов имеют сферические формы. Уплощённые зёдра золота выталкиваются сферами на поверхность потока, в то же время обилие магнитных минералов создаёт поле, которое удерживает золотины.

Состав и морфология зёрен золота: обилие включений глинистых минералов, большое количество вростках с кварцем, оксидами титаножелезистых минералов, преимущественно уплощённая форма золотин и в то же время присутствие сферических форм рудных минералов – способствуют потерям золота при обогащении на разных этапах. Для эффективного извлечения золота требуется многостадийное обогащение.

Заключение

В результате изучения минералого-технологических характеристик золота из россыпей ручьёв Покровский и Верный установлено следующее:

1) в хвостах стола доля свободного гравитационно извлекаемого золота составляет 43%; 57% – золото в сростках, химически связанное и пр.;

2) зёдра золота с правильными кристаллографическими огранками и неправильной формы, в сростках,

дендритовидные обычно уплощены и содержат большое количество включений глинистых минералов, кварца, магнетита, титаномагнетита, ильменита, гематита;

3) в россыпях присутствуют амальгамы золота и серебра с изменчивым содержанием примеси ртути, а также вейшанит $(\text{Au}, \text{Ag})_3\text{Hg}_2$ – гипогенный упорный минерал с довольно постоянным соотношением элементов и характерной формой выделения (возможно, амальгамы золота не упоминали, полагая, что это техногенное заражение);

4) тончайшие вкрапления тонкодисперсного золота наблюдаются в глинистых минералах, кварце, ильмените, титаномагнетите.

Таким образом, уплощённая форма зёрен золота, обилие включений глинистых минералов, кварца, магнетита, гематита, ильменита, присутствие золота с высоким содержанием ртути и серебра, а также обилие тонкодисперсного золота способствуют неполноте извлечения золота из исследованных россыпей.

В настоящее время проводятся исследования по изучению технологических свойств золотосодержащих россыпей и отвалов россыпей, включающие определение доли глинистой составляющей в пробе, изучение физико-механических свойств глин, определяющих прочностные характеристики глин и их гидростойкость и, следовательно, промывистость. Технологические решения по снижению потерь золота в исследуемых россыпях должны быть направлены на повышение эффективности процесса дезинтеграции глинистого материала, связанного с увеличением удельного расхода воды, интенсивности механического воздействия, времени дезинтеграции материала. При проведении основных процессов обогащения на доводочной обогатительной установке необходимо включить дополнительные операции перечистки продуктов обогащения, использовать многостадийное магнитное обогащение при различной напряженности магнитного поля для селективного выделения минералов с низкой магнитной восприимчивостью.

Финансирование/Благодарности

Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

Авторы статьи выражают глубокую сердечную благодарность рецензентам и редакторам журнала за исправления и замечания, позволившие значительно улучшить содержание статьи.

Литература

Алексеев В.С., Банчикова Т.С., Серый Р.С. (2019). Обоснование применения магнитной сепарации при переработке исходных песков рудно-россыпного месторождения ручья Болотистый (Нижнее Приамурье). *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (8), с. 190–197. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-190-197>

Белая Гора, золоторудное месторождение. (2020). *Недра ДВ*. https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=f2f5e2370b07304ef3b5b8e49142a516

Волodyкова Т.В. (2010). Особенности рудоносных палеовулканических структур Приамурья и вулканов Курил по аэрогеофизическим данным. *Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья: Материалы Всерос. науч.-практик. конф.* Улан-Удэ, с. 45–48.

- Гольдфарб Ю.И., Прейс В.К. (2010). Резервы золота в отработанных россыпях Северо-Востока России. *Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условий образования месторождений, задачи прикладных исследований: Материалы Всерос. конф., посвящ. 100-летию Нины Васильевны Петровской*. М.: ИГЕМ РАН, Т. I, с. 153–155.
- Гореликова Н.В., Магазина Л.О., Наумов В.А. (2010). Природные амальгамы Au и Pt в золотоносных россыпях Верхнекамской впадины. *Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условий образования месторождений, задачи прикладных исследований: Материалы Всерос. конф.* М.: ИГЕМ РАН, Т. I, с. 156–158.
- Дамдинов Б.Б., Рощектаев П.А., Жмодик С.М., Канакин С.В., Дамдинова Л.Б. (2012). Интерметаллиды системы Au–Ag–Hg в рудах Коневинского золоторудного месторождения (Восточный Саян). *Записки Российской минералогического общества*, (3), с. 50–60.
- Кондратьева Л.А. (2010). Типоморфизм самородного золота месторождения Задержниковое. *Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условий образования месторождений, задачи прикладных исследований: Материалы Всерос. конф.* М.: ИГЕМ РАН, Т. I, с. 264–265.
- Константинов М.М., Косовец Т.Н. (2010). Сихотэ-Алинская провинция. *Золоторудные месторождения России*. М.: Акварель, с. 242–259.
- Кузнецова И.В., Сафонов П.П., Моисеенко Н.В. (2019). Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей – потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнесемеджинского золотоносного узла Приамурья, Россия). *Георесурсы*, 21(1), с. 2–14. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.2-14>
- Медведев Е.И., Молчанов В.П. (2013). Амальгама золота и её минералы-спутники (Дальний Восток, Приморье). *Фундаментальные исследования*, (11), с. 958–963.
- Мирзеханов Г.С., Мирзеханова З.Г. (2022). Влияние тяжёлых минералов на технологические потери золота при отработке россыпных месторождений Дальневосточного региона. *Горный журнал*, (7), с. 22–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.03>
- Мишин Л.Ф. (1999). Гидротермально изменённые породы и поисковая оценка месторождения Белая Гора. *Геология и полезные ископаемые Приамурья: Сб. науч. тр.* Хабаровск: Магеллан, с. 172–177.
- Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. (1996). Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 352 с.
- Озерова Н.А. (1986). Ртуть и эндогенное рудообразование. М.: Наука, 242 с.
- Онихимовский В.В., Беломестных Ю.С. (1996). Полезные ископаемые Хабаровского края (Перспективные для освоения месторождения и проявления). Хабаровск, 495 с.
- Остапенко Н.С., Нерода О.Н. (2019). Некоторые особенности формирования месторождений золота Хаканджа, Многовершинное и Белая Гора (Россия). *Международный научно-исследовательский журнал*, (12), Часть 1, с. 148–153.
- Петровская Н.В. (1973). Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 347 с.
- Редин Ю.О. (2015). Золоторудная минерализация Лугоканского рудного узла (Восточное Забайкалье): минеральные ассоциации, возраст, эндогенная зональность: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Новосибирск, 124 с.
- Халилова З.А. (2011). Восхождение на «Белую Гору». *Горная промышленность*, (6), с. 64–65.
- Шило Н.А. (2000). Учение о россыпях. М.: Изд-во Акад. горных наук, 631 с.
- Yamamoto Y., Miura T., Suzuki M., Kawamura N., Miyagawa H., Nakamura T., Kobayashi K., Teranishi T., Hori H. (2014). Direct evidence for ferromagnetic spin polarization in gold nanoparticles. *Physical Review Letters*, 93(11), 116801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.116801>
- Li Y., Ouyang Sh., Tian P. (1984). Weishanite – a new gold-bearing mineral. *Acta Mineralogica Sinica*, 4(2), pp. 102–105. (in Chinese)

Сведения об авторах

Наталья Анатольевна Лаврик – старший научный сотрудник, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51
e-mail: lavrik@igd.khv.ru

Наталья Михайловна Литвинова – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51

Александра Викторовна Лаврик – младший научный сотрудник, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51

Статья поступила в редакцию 29.11.2022;

Принята к публикации 25.07.2023; Опубликована 30.09.2023

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Mineralogical and technological features of gold from placers of the southern slope of Belya Gora (Khabarovsk Krai) and stages of its formation

N.A. Lavrik*, N.M. Litvinova, A.V. Lavrik

Khabarovsk Federal Research Center of the Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Corresponding author: Natalia A. Lavrik, e-mail: lavrik@igd.khv.ru

Abstract. The gold-placer deposit of Pokrovsky-Verny streams is formed on the southern slope of Belya Gora (Khabarovsk Krai), where streams drain gold formations of the same-name deposit. The gold content in the waste dumps of past years often reaches commercial concentrations, which allows to be re-processed them and some of the gold goes back into the dumps. The field formed by ore and alluvial formations is a complex volcanic structure with a concentric-zone structure underlined by faults. At the initial stage of research, the goal was to determine the content of the precious metal in gravity concentrate samples from the placers, the study of the mineralogical and technological characteristics of gold going into dumps. 135 gold grains ranging in size from 10–15 μm to 3 mm were studied using an electron scanning microscope.

Six main species were distinguished by composition and morphology: high-grade in the form of isometric crystals; aggregates of gold crystals with 0–29% silver admixture; dendrites with up to 41% silver admixture; grayish gold and silver amalgams; loose weishanite $(\text{Au},\text{Ag})_3\text{Hg}_2$ formations of gray color; aggregates of ore-bearing and nonmetalliferous minerals with gold, in which the precious metal is less than half the grain. All gold grains have a flattened shape, variably contain inclusions of clay minerals, quartz, hematite, ilmenite, magnetite, limonite. Grains of native metals and intermetallic compounds are isolated in mineral association with gold. The revealed features of gold show that the formation of the precious metal is associated with hypogenic and epithermal processes, as well as with fluid emanations coming through

late deep faults. Effective gold recovery requires several stages mineral processing.

Keywords: gold-placer deposit of the Pokrovsky-Verny streams, Belya Gora gold deposit, gold, electrum, amalgam, weishanite, intergrowths, loss of gold

Recommended citation: Lavrik N.A., Litvinova N.M., Lavrik A.V. (2023). Mineralogical and technological features of gold from placers of the southern slope of Belya Gora (Khabarovsk Krai) and stages of its formation. *Georesursy = Georesources*, 25(3), pp. 198–207. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.23>

Acknowledgments

The studies were carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment “Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences”, funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. 075-15-2021-663.

References

- Alekseev V.S., Banshchikova T.S., Seryi R.S. (2019). Substantiation of the Use of Magnetic Separation in Processing the Initial Sands of the Ore-Placer Deposit of the Bolotisty Stream (Nizhne Priamurye). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining Information and Analytical Bulletin*, (8), pp. 190–197. (In Russ.)
- Belya Gora gold deposit. Subsoil of the Far East (2022). (In Russ.) https://nedrady.ru/nedrady/ru/find_place?obj=f2f5e2370b07304ef3b5b8e49142a516
- Damdinov B.B., Roshchektaev P.A., Kanakin S.V. (2012). Au-Ag-Hg intermetallics in the ores of the Konevinsky gold ore deposit (East Sayan). *Proc. III All-Russian Sci. Pract. Conf.: Mineralogeny of Northeast Asia*. Ulan-Ude: Ekos Publ., pp. 220–222. (In Russ.)
- Goldfarb Yu.I., Preis V.K. (2010). Gold reserves in spent placers of the North-East of Russia. *Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions for the formation of deposits, problems of applied research: Proc. All-Russi. Conf. Vol. I*. Moscow: IGEM RAN, pp. 153–155. (In Russ.)
- Gorelikova N.V., Magazina L.O., Naumov V.A. (2010). Natural amalgams Au and Pt in gold-bearing placers of the Nizhne-Kamskaya Depression. *Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions for the formation of deposits, problems of applied research: Proc. All-Russi. Conf. Vol. I*. Moscow: IGEM RAN, pp. 156–158. (In Russ.)
- Khalilova Z.A. (2011). Ascent to the “Belya Gora”. *Gornaya promyslennost'*, 6 (100), p. 64. (In Russ.)
- Kondratyeva L.A. (2010). Native gold typomorphism of the Zaderzhninskoe deposit. *Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions for the formation of deposits, problems of applied research: Proc. All-Russi. Conf. Vol. I*. Moscow: IGEM RAN, pp. 264–265. (In Russ.)
- Konstantinov M.M., Kosovets T.N. (2010). Sikhote-Alin Province Gold ore deposits in Russia. Moscow: Akvarel, pp. 242–259. (In Russ.)
- 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. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.3-14>
- Li Y., Ouyang Sh., Tian P. (1984). Weishanite – a new gold-bearing mineral. *Acta Mineralogica Sinica*, 4(2), pp. 102–105. (In Chinese)
- Medvedev E.I., Molchanov V.P. (2013). Amalgam of gold and its satellite minerals (Far East, Primorye). *Fundamental'nye issledovaniya*, 11(5), pp. 958–963. (In Russ.)
- Mirzehkanov G.S., Mirzehkanova Z.G. (2022). Influence of heavy minerals on technological losses of gold during mining of alluvial deposits in the Far East region. *Gornyy zhurnal*, (7), pp. 22–26. (In Russ.)
- Mishin L.F. (1999). Hydrothermally altered rocks and prospecting assessment of the Belya Gora deposit. *Geology and minerals of the Amur region: Coll. papers. Khabarovsk: Magellan*, pp. 172–177. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Eirish L.V. (1996). Gold ore deposits of the East of Russia. Vladivostok: Dalnauka, 352 p. (In Russ.)
- Onikhimovsky V.V., Belomestnykh Yu.S. (1996). Minerals of Khabarovsk Krai (Field development potential). Khabarovsk, 495 p. (In Russ.)
- Ostapenko N.S., Neroda O.N. (2019). Some features of the formation of gold deposits Khakanja, Mnogovershinnoye and Belya Gora (Russia). *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, (12), Part 1, pp. 148–153. (In Russ.)
- Ozerova N.A. (1986). Mercury and endogenous ore formation. Moscow: Nauka, 242 p. (In Russ.)
- Petrovskaya N.V. (1973). Native gold (general characteristic, typomorphism, questions of genesis). Moscow: Nauka, 347 p. (In Russ.)
- Redin Y.O. (2015). Gold ore mineralization of the Lugokan ore node (Eastern Transbaikalia): mineral associations, age, endogene zoning. *Cand. geol. and mineral. sci. diss. Novosibirsk*, 124 p. (In Russ.)
- Shilo N.A. (2000). The doctrine of placers. Moscow: Izd-vo Akad. gornykh nauk, 632 p. (In Russ.)
- Volodkova T.V. (2010). Features of ore-bearing paleovolcanic structures of Priamurye and Kuril volcanoes according to aerogeophysical data. *New and unconventional types of mineral deposits in the Baikal region and Transbaikalia: Proc. All-Russian Sci. Pract. Conf.* Ulan-Ude, pp. 45–48. (In Russ.)
- Yamamoto Y., Miura T., Suzuki M., Kawamura N., Miyagawa H., Nakamura T., Kobayashi K., Teranishi T., Hori H. (2014). Direct evidence for ferromagnetic spin polarization in gold nanoparticles. *Physical Review Letters*, 93(11), 116801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.116801>

About the Authors

Natalia A. Lavrik – Senior Researcher

Khabarovsk Federal Research Center of the Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences

51, Turgeneva st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation
e-mail: lavrik@igd.khv.ru

Natalia M. Litvinova – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher

Khabarovsk Federal Research Center of the Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences

51, Turgeneva st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Alexandra V. Lavrik – Junior Researcher

Khabarovsk Federal Research Center of the Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences

51, Turgeneva st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Manuscript received 29 November 2022;
Accepted 25 July 2023; Published 30 September 2023