

Особенности формирования россыпного золота на участке реки Агенда (Баунтовский Эвенкийский район республики Бурятия)

©2024 В. И. Спицын^{1✉}, С. В. Добросоцкий², Г. С. Золотарева¹

¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

²ООО «Андреевский кочей», Ленина, 93, 672000,
Забайкальский край, Чита, Российская Федерация

Аннотация

Введение: Традиционно считается, что важнейшим фактором формирования россыпных месторождений золота является разрушение коренных пород с богатой золоторудной минерализацией и перенос разрушенного золотоносного материала с последующим его осаждением. Последнее время появился ряд публикаций, посвященных «скрытому», наноразмерному золоту, которое в процессе изменения внешних геологических, геохимических и геоморфологических условий и факторов способно самособирается в макроскопическую форму с последующим переносом уже в виде зерен, чешуек, сростаний или даже самородков [1–5]. Изучение таких процессов может дополнить или пересмотреть построение традиционных моделей формирования россыпных месторождений.

Геологическое строение участка: В орографическом отношении лицензионный участок Агенда расположен в пределах северо-западной части Витимского плоскогорья. Территория района представляет собой сложно построенную область, расположенную в узле сочленения южного складчатого обрамления Сибирской платформы, Алданского изгиба и Забайкальской зоны позднепалеозойской-мезозойской активизации.

Целью работы: Является изучение золотоносного потенциала долины реки Агенда, а также установление и оценка потенциальных источников сноса золота. Важным вопросом является рассмотрение альтернативных точек зрения по поводу россыпеобразования в изучаемом регионе в частности, и принципы образования россыпей без достоверно установленных коренных источников в целом.

Лабораторные работы: Включали в себя минералогический анализ на свободное золото в тяжелой фракции под бинакуляром, изучение химического состава золота методом растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа (электронный микроскоп JEOL-6380, микронзонд JNCA-250).

Результаты исследований: Визуальное описание частиц золота и их химический состав указывают на то, что все золото россыпей участка реки Агенда представляет собой устойчивый твердый раствор золота и серебра в соотношении от 85:15 до 95:5. Химическая зональность и наличие примесей других химических элементов, отражающих тенденцию роста или «самоочищения» золота не была зафиксирована. Геоморфология, и химический (минеральный) состав поверхности золотин указывают на то, что золото в условиях гипергенеза находится относительно длительное время, что позволило сформироваться россыпному месторождению.

Заключение. Источником золота для данной территории служили небогатые жилы, узлы рудной минерализации, локальные зоны кварцевого прожилкования, которые не могли обеспечить реальные ресурсы россыпей. Существенный вклад в ресурсный потенциал, по-видимому, принадлежит золоту, находящемуся в них в виде наночастиц, которое в условиях гипергенеза и слабой гидродинамики способно переходить в состояние самосборки. При активной динамике условий внешней среды, и



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Спицын Василий Иванович, e-mail: vspitsyn-vsu@mail.ru

при повышенной подвижности золота в наноформе [4], значительная его часть беспрепятственно мигрировала вниз по течению до конечного бассейна стока. Подобный подход позволяет по-новому взглянуть на процессы, в результате которых золото проходит путь от химического валентного-элемента (как правило наноразмерного) до видимой частицы благородного металла (ноль-валентного состояния) вблизи коренного источника в обстановке слабой динамики среды, а так же внести коррективы в модели формирования и технологии разработки подобных месторождений.

Ключевые слова: нанозолото, россыпь, Баунтовский Эвенкийский район республики Бурятия, самосборка.

Для цитирования: Спицын В. И., Добросоцкий С. В., Золотарева Г. С. Особенности формирования россыпного золота на участке реки Агенда (Баунтовский Эвенкийский район республики Бурятия) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 2. С. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/29-41>

Введение

Традиционно считается, что важнейшим фактором формирования россыпных месторождений золота является разрушение коренных пород с богатой золоторудной минерализацией (руды гидротермального, магматического, метаморфического генезиса) и перенос разрушенного золотоносного материала с последующим осаждением его под действием сил гравитации. Обычно для россыпных месторождений золота удается установить источник сноса. Не редки случаи, когда при наличии россыпного месторождения или проявления источник сноса установить не удается. Не является исключением и Баунтовский эвенкийский район республики Бурятия, где добыча россыпного золота ведется уже более трехсот лет.

В последние годы часто обсуждается идея, что в формировании россыпных месторождений золота принимают участие не только породы, которые отличаются богатой золоторудной минерализацией, но и породы, считавшиеся «стерильными», не содержащими золото в определяемой форме [1–5].

Еще в 70-х годах XX века известный исследователь Баргузинской тайги и Витимского плоскогорья М. Ф. Шелковников при составлении отчетов, отражающих результаты его поисково-разведочной деятельности, отмечал идею о «хемогенном происхождении россыпей за счет кларковых и субкларковых содержаний золота в субстрате».

В последнее время появляется ряд публикаций, посвященных «скрытому», наноразмерному золоту, которое в процессе изменения внешних геологических, геохимических и геоморфологических условий и факторов способно самособирается в макроскопическую форму с последующим переносом уже в виде зерен, чешуек, сростаний или даже самородков [1–5].

Изучение таких процессов может дополнить или пересмотреть построение традиционных моделей формирования россыпных месторождений. И такие модели в будущем можно применять, в том числе и в Бурятии.

Геологическое строение участка

В 2017–2021 гг. ООО «Б-Терминал» проведены поиски и оценка россыпного золота на лицензионном участке Агенда в Баунтовском эвенкийском районе

Республики Бурятия. Площадь лицензионного участка Агенда составляет 54.58 км².

В орографическом отношении лицензионный участок Агенда расположен в пределах северо-западной части Витимского плоскогорья, которую по морфологическим признакам можно разделить на две части: верхнюю высокогорную и среднюю со сглаженными формами рельефа. Абсолютные отметки водоразделов на рассматриваемой территории варьируют от 1422 м до 1684 м, долин – от 1200 м до 1300 м с превышениями водоразделов над днищами долин до 250–400 м. Последние заболочены с многочисленными старичными озёрами [6].

Гидросеть в районе развита хорошо. Она принадлежит к бассейну р. Витим. Главным водотоком непосредственно на площади работ является р. Чина, в которую слева впадает р. Агенда. Все водотоки площади характеризуются быстрым течением и изменяющимся дебитом. Уклон русел составляет 3–5 м на 1 км, глубина колеблется от 0.5 до 3.0 м, скорость течения обычно равна 10–12 км/час. Питание всех водотоков происходит, в основном, за счет атмосферных осадков, оттаивания мерзлоты и, в меньшей степени, подземных вод. В связи с малым количеством снега, выпадающего зимой, водотоки не имеют весеннего паводка. Летом же после продолжительных и ливневых дождей все реки и ручьи превращаются в бурные потоки, уровень воды в мелких реках и ручьях повышается на 1–2 м, а в крупных на 3–4 м.

Территория района представляет собой сложно построенную область, расположенную в узле сочленения южного складчатого обрамления Сибирской платформы, Алданского изгиба и Забайкальской зоны позднепалеозойской-мезозойской активизации. В целом она имеет сложное блоковое строение с преимущественно северо-восточным и северо-западным направлением тектонических зон и отдельных разломов, предопределяющих распределение рудно-россыпных узлов и золоторудных зон. Стратифицированные образования занимают около половины площади участка, слагая полосу шириной 15–20 км, вытянутую в северо-восточном направлении. Геологическое строение изученной территории характеризуется значительной сложностью и большим своеобразием.

Целью работы является изучение золотоносного

потенциала долины реки Агенда, а также установление и оценка потенциальных источников сноса золота. Кроме того, авторы считают важным рассмотреть вопрос альтернативных точек зрения по поводу россыпеобразования в изучаемом регионе в частности, и принципы образования россыпей без достоверно установленных коренных источников в целом.

Методика

В ходе проведения ГРП выполнен комплекс топографо-геодезических, буровых, опробовательских, лабораторных и камеральных работ.

В 2019–2021 годах для изучения лицензионного участка Агенда было пробурено 957 скважин общим объемом 5450 п.м. Объем опробования керна составил 15539 проб, включая 1914 контрольных, из них в долине р. Агенда – 10746 рядовых и 1418 контрольных проб, по руч. Конгрокан (Болотный) – 1726 рядовых и 296 контрольных, по ручьям Заблудишка, Тихий (Конгломератовый), Алакан и Зеленый – 1153 рядовых и 200 контрольных проб.

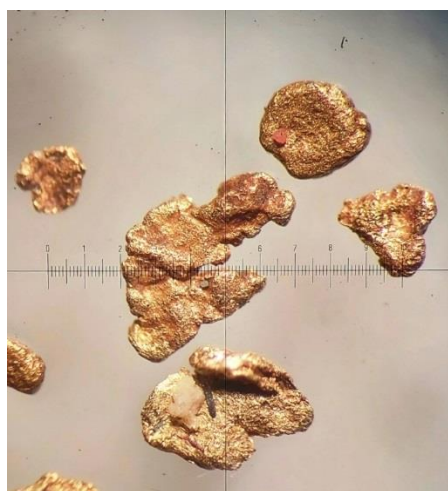
В ходе бурения и опробования керна скважин выполнялся комплекс работ, направленный на изучение аллювиальных отложений: описание и документация гранулометрического, петрографического состава

аллювия, а также минералогии тяжелой фракции аллювия.

Лабораторные работы включали в себя: 1) минералогический анализ на свободное золото с отбором монофракций под биноклем (долина р. Агенда – 12339 проб); 2) взвешивание и капсулирование золота; 3) ситовой, пробирный и минералогический анализы (долина р. Агенда – 1 групповая проба). Общий объем изученных проб для участка Агенда составил более 15000 проб.

Химический состав отдельных проб из монофракции золота (6 образцов) изучался методом растровой электронной микроскопии рентгеноспектрального микроанализа (электронный микроскоп JEOL-6380, микрозонд JNCA-250) [7, 8] в двух вариациях. В первом случае изучению подвергалась поверхность золотин (рис. 1 а), во-втором случае – поверхность среза золотин, т.е. их сердцевина (рис. 1 б).

Кроме того, авторами был выполнен комплекс работ, направленных на уточнение геологического строения района и оценки перспективности выявления коренных источников сноса, а также предпринята попытка определения генезиса россыпей с позиции отсутствия явной богатой концентрации золота на участках с проявлениями рудной минерализации.



а) поверхность золотин
[(a) the surface of the gold pieces]



б) сердцевина золотин
[(b) the core of gold pieces]

Рис. 1. Золото, подвергшееся изучению химического состава.
[Fig. 1. Chemical composition of the analyzed gold samples.]

Результаты исследований

Долина реки в верховьях пересекает гранитоиды первой и второй фаз Витимканского комплекса, в среднем и нижнем течении – вендские вулканогенно-осадочные породы суванихинской свиты (метапесчаники, метаалевролиты, сланцы с прослоями известняков, конгломераты, кислые и основные метавулканиды) и кембрийские карбонатные отложения давыкшинской свиты (мраморизованные известняки, доломиты с прослоями карбонатных конгломератов и конглобрекций) (рис. 2).

Анализ особенностей строения разреза рыхлых

отложений в различных частях долины р. Агенда показал, что, в целом, изученные аллювиальные отложения сложены двумя основными литологическими разновидностями. Верхняя пачка представлена преимущественно хорошо окатанной галькой мелкого и среднего размера в песчано-суглинистом заполнителе бурого цвета, которая в зоне развития надпойменных террас перекрывается песчано-илистыми отложениями. Нижняя пачка содержит в своем составе менее окатанную гальку и щебень в песчано-глинистом заполнителе серого или серо-зеленого цвета. Состав обломков тоже закономерно изменяется по простиранию: в нижнем

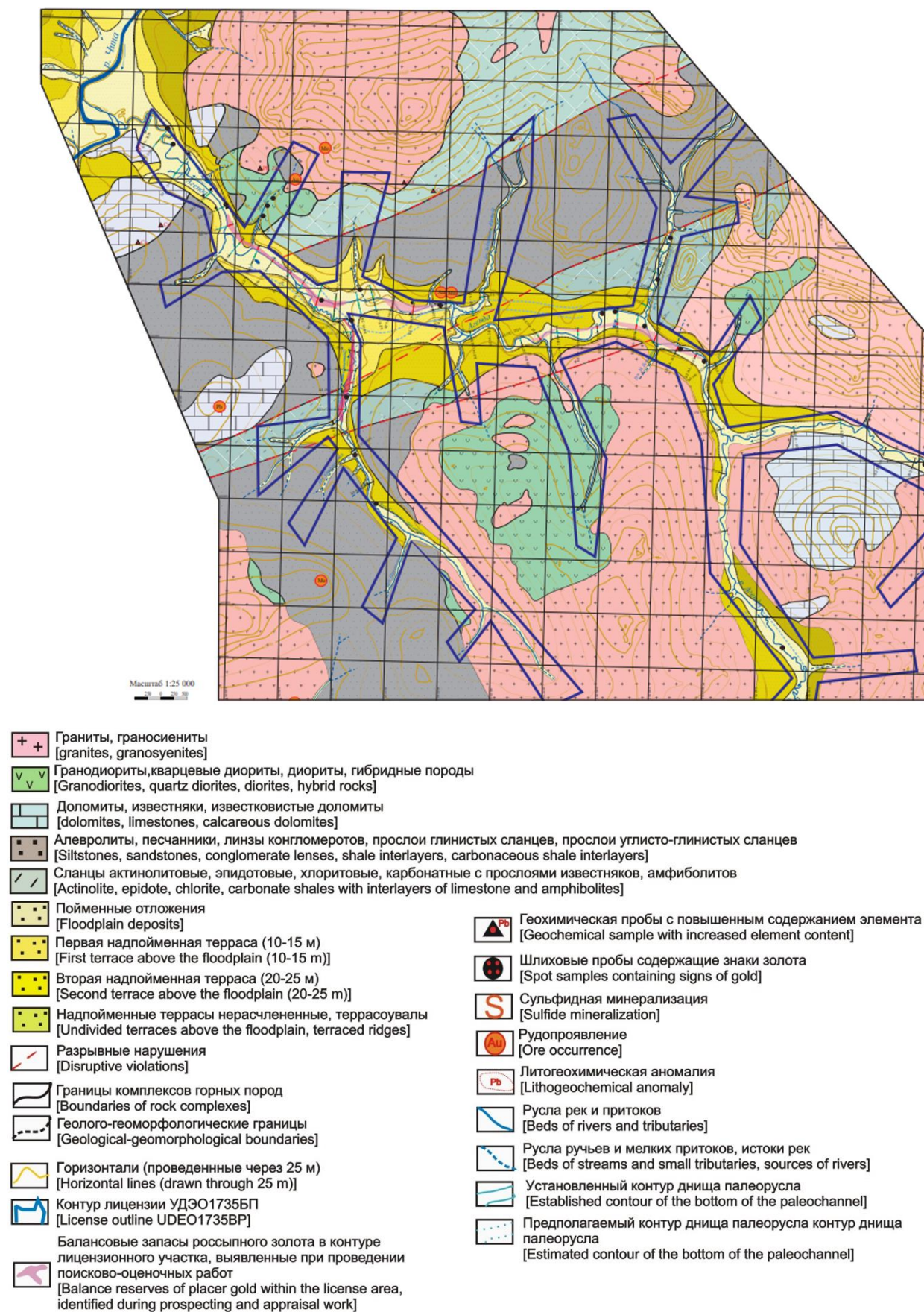


Рис. 2. Карта фактов на основе геолого-геоморфологической схемы участка работ.
[Fig. 2. A fact map based on the geological geomorphic pattern of the studied region.]

течении он достаточно пестрый – разнообразные сланцы, карбонатные и интрузивные породы, в верхнем течении преобладает всего несколько разновидностей – амфиболиты, сланцы и граниты. По гранулометрическому составу рыхлые отложения в нижнем течении представлены мелким, хорошо сортированным и окатанным материалом, в верхнем течении обломочная часть характеризуется более крупными размерами и меньшей степенью окатанности, а также преобладанием гравия и дресвы над песчаной составляющей.

Рыхлые отложения долины р. Агенда золотоносны как вдоль, так и поперек аллювиальных отложений практически на всем изученном участке.

Золотоносный пласт с балансовыми запасами россыпного золота выявлен в интервале 3.2 – 14.4 км на трех разобщенных полигонах: нижнем (БЛ 34-2019 –

БЛ 62-2019), среднем (БЛ 74-2020 – БЛ 82-2020) и верхнем (БЛ 110-2020 – БЛ 142-2021) (табл. 1). Суммарная протяженность россыпи составляет 7375 м. Ширина золотоносного пласта колеблется от 24 м до 159 м, в среднем составляя на различных полигонах от 71 до 110 м, мощность в отдельных выработках изменяется от 0.4 до 3.6 м, в подсчетных балансовых блоках – от 0.7 до 0.8 м. Средняя мощность торфов по россыпи 3.6 до 4.2 м. Содержание золота в отдельных пробах по скважинам варьирует от «зн» до 1818 мг/м³ (скв. 39, БЛ 62-2019), среднее содержание металла в контурах балансовых запасов по скважинам также изменяется в широком диапазоне – от 203 мг/м³ на мощность 3.6 м до 1733 мг/м³ на мощность 0.4 м (средние параметры по полигонам колеблются от 467 до 499 мг/м³).

Табл. 1. Параметры полигонов россыпи долины р. Агенда
[Table 1. Parameters of the Agenda river placers]

Параметры россыпи [Placer Parameters]	Нижний Полигон [Lower Polygon]	Средний Полигон [Average Polygon]	Верхний Полигон [Upper Polygon]
Протяженность, м [Length, m]	2865	1130	3380
Средняя ширина, м [Average width, m]	85	110	71
Средняя мощность торфов, м [Average peat capacity, m]	4.2	3.0	3.6
Средняя мощность песков, м [Average sand thickness, m]	0.8	0.8	0.7
Среднее содержание золота х/ч в песках, мг/м ³ [Average gold content in sands, mg/m ³]	467	496	499

Золотоносный пласт россыпи долины р. Агенда представлен аллювиальными, аллювиально-пролювиальными и элювиальными отложениями, основной объем которых составляет песчано-гравийно-галечно-щебнистый материал. Содержание фракции < 2 мм в них 30 %, гравийно-галечно-щебнистого материала (2–100 мм) – 63 %, валунов (> 100 мм) – 7 %.

Гранулометрия торфов и песков, изученная в ходе документации и опробования скважин, варьирует по разрезу и по простиранию за счет изменения в них объема гравийно-галечной и песчано-глинистой фракций (рис. 3).

В составе обломков преобладают амфиболитовые и кристаллическими сланцы (40 %), граниты (25 %), реже встречаются амфиболиты (15 %), а также углистые и глинистые сланцы (10 %), на кристаллизованные известняки (10 %). Заполнителем выступает суглинистый материал коричневого и темно-коричневого цвета в верхней части разреза золотоносной толщи, и серого и зеленовато-серого – в нижней. Суглинистый материал состоит из полимиктовых разнозернистых песков (с преобладанием в составе кварца и полевых шпатов (более 50 %)) и глинистой составляющей в соотношении приблизительно 1 к 2. Состав тяжелой фракции, выделенной из суглинистого материала, является довольно типичным и отражает процесс переотложения минералов разрушенных древних кор выветривания докемб-

рийского кристаллического фундамента и более молодых кристаллических образований региона.

Золото в россыпях участка реки Агенда характеризуется золотисто-желтым и зеленовато-желтым цветом (рис. 4). По гранулометрическому составу золото подразделяется на среднее, мелкое и весьма мелкое (табл. 2).

Среднее золото (2.0–1.0 мм) представлено комковатыми и комковато-пластинчатыми зернами неправильной формы с короткими отростками, ответвлениями, но хорошо закругленными ограничениями, с бугристо-ямчатой и мелко-ямчатой поверхностью. Степень окатанности средняя, редко встречаются знаки со светлой и темной «охрой», налетами гидроокислов железа, иногда практически полностью в «рубашке». Отмечаются зерна с бороздочками скольжения, некоторые из них с короткими, слегка занозистыми ограничениями или причудливой, пучковидной формы. Единичные знаки имеют углубления в поверхности, заполненные породой или гидроокислами железа.

Мелкое золото (1.0–0.25 мм) характеризуется комковатой и комковато-пластинчатой неправильной, иногда причудливой формой, многие зерна с короткими отростками, ответвлениями, чаще со сглаженными ограничениями, но встречаются знаки с неровными, угловатыми краями. Кроме этого, присутствуют золотины, испытавшие деформацию, некоторые из них загнуты с одного края, другие сложены пополам и имеют форму подковы, отмечаются зерна в виде

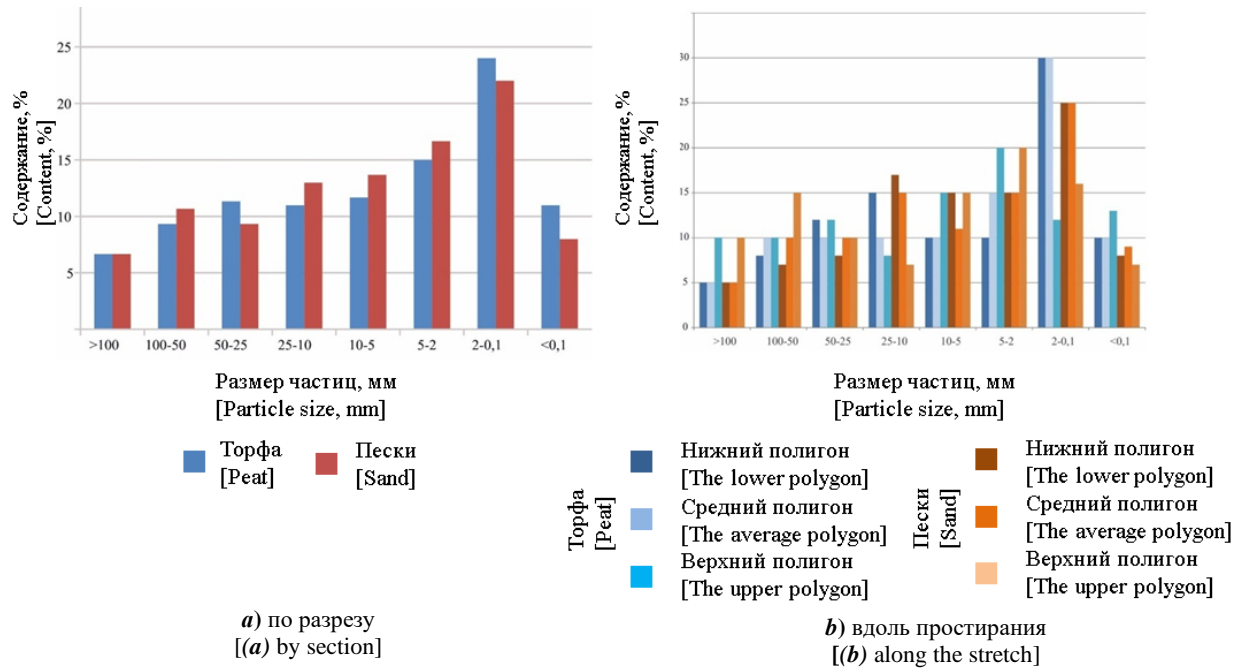


Рис. 3. Средний гранулометрический состав торфов и песков рыхлых отложений россыпи долины р. Агенда.
[Fig. 3. Average grading of sands and peat of the deposits of the Agenda river placers.]

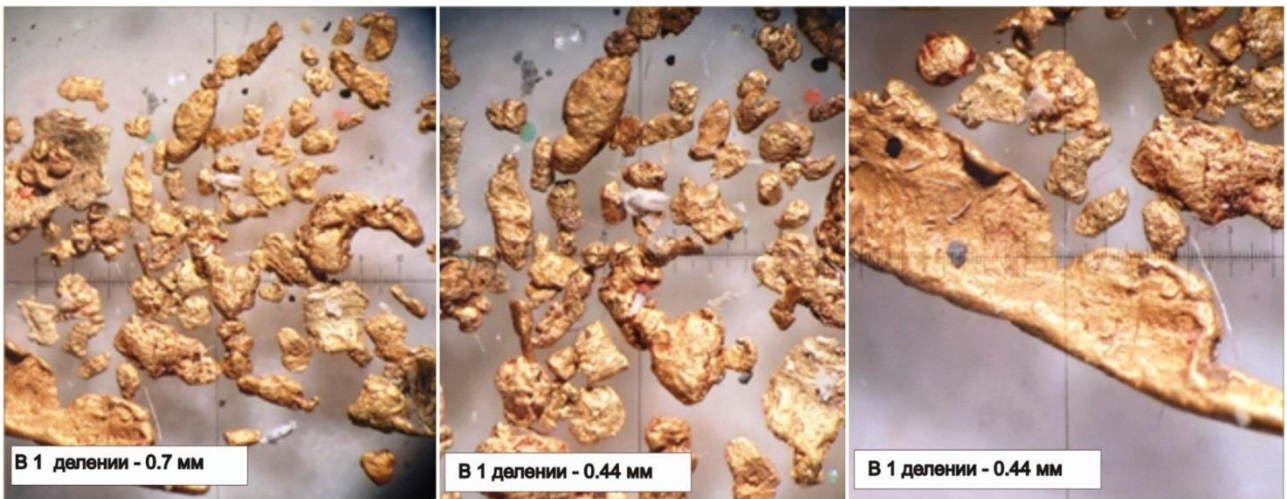


Рис. 4. Золото из россыпей участка реки Агенда.
[Fig. 4. Gold from the Agenda river placers.]

Табл. 2. Результаты ситового анализа золота россыпей лицензионного участка реки Агенда
[Table 2. Results of the sieve analysis of the gold from the placers in the licensed area of the Agenda river]

Показатели [Indicators]	Единица измерения [unit of measurement]	Среднее [Average]	Мелкое [Small]		Весьма мелкое [Very small]	Тонкое [Thin]	Всего [Total]
		2.0–1.0	1.0–0.5	0.5–0.25	0.25–0.125	<0.125	
Масса золота [Weight of gold]	Мг [mg]	115.44	92.47	79.85	3.78	-	291.54
Количество золотин [Number of gold coins]	Шт [pieces]	22	85	375	72	-	554
% от массы [% by weight]	%	39.60	31.72	27.39	1.29	-	100
% от количества [% of the number]	%	3.97	15.34	67.69	13.00	-	100
Ср. вес золотин [Wed. weight of gold coins]	Мг [mg]	5.25	1.09	0.21	0.05		

«закатанных трубочек». Практически все золотины, являются сростками множества выделений двух типов – «лентовидного» (изогнутого) и «дендритовидного». В углублениях некоторых зерен присутствует серая, бурая, реже рыжая охра.

Весьма мелкое золото (0.25–0.125 мм) образует преимущественно комковатые и комковато-пластинчатые зерна средней, реже плохой окатанности, некоторые из них имеют вид «закатанных трубочек». Единичные знаки тонкого золота представлены слабоокатанными комковато-пластинчатыми зернами.

В целом, морфологические особенности золота во всех фракциях и россыпях участка Агенда близки. Основная масса золотин имеет комковато-пластинчатую и комковатую, неправильную и причудливую форму, зерна в виде «закатанных трубочек», с углублениями посередине, деформированные. Окатанность зерен в большинстве случаев средняя, реже слабая. На поверхности золотин часто наблюдаются следы штриховки.

Гранулометрические характеристики золота свидетельствуют о том, что в россыпях участка Агенда преобладает золото среднее, весьма уплощенное, средней степени сортированности, «рудные» зерна в них отсутствуют.

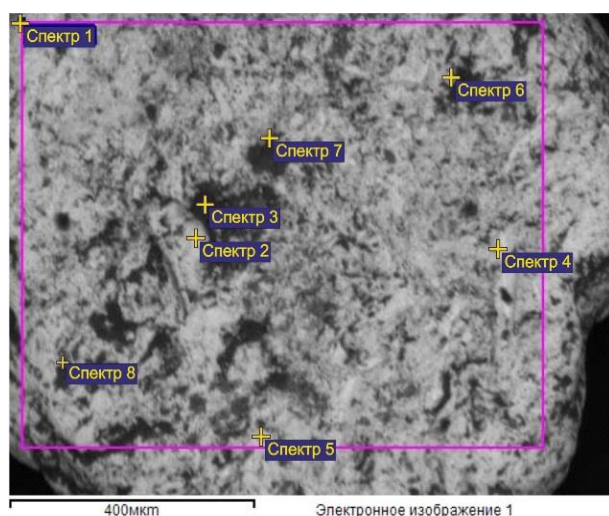
Химический состав отдельных проб из монофракции золота (6 образцов) был изучен методом растровой электронной микроскопии [9, 10] в двух вариациях.

В первом случае изучению подвергалась поверхность золотин. Поверхность золотин нередко покрыта охрой окислов и гидроокислов железа, имеет ямочки и каверны, заполненные силикатами или глинистыми минералами, в редких случаях – сульфидами (пирит), в единичных случаях – ильменитом. Это подтверждается изучением химического состава поверхности золотин. На поверхности выявлены следы кислорода, железа, кремния, алюминия, в редких случаях – серы, натрия, магния, калия, титана. Результаты химического анализа по одному из образцов представлены в таблице 3.

Химическому анализу также подверглись предварительно отполированные образцы, что позволило изучить химический состав сердцевин золотин. Результаты указывают на то, что все золото россыпей участка реки Агенда представляет собой устойчивый твердый раствор золота и серебра в соотношении от 85:15 до 95:5. Какая-либо химическая зональность, отражающая тенденцию роста или «самоочищения» золота не была зафиксирована. Так же, не было отмечено наличие в качестве примесей других химических элементов. Результаты химического анализа по сердцевине одного из образцов золота представлены в таблице 4.

Параллельно с выявлением и изучением россыпи реки Агенда, была проведена работа по поиску и заверке уже известных потенциальных источников сноса золота. По материалам предшественников, взятым из фондовой литературы (Шелковников М. Ф. 1975, Корниенко О. Н. 1992, Кошкин В. В. 2015), на участке реки Агенда выявлено лишь одно проявление рудной минерализации (рудопоявление Агендинское), в котором содержание золота по отдельным бороздовым пробам, в единичных случаях), доходило до 10.8 г/т. В пределах проявления скважинами были вскрыты минерализованные зоны мощностью от 4 до 28 м. Опробование керн скважин не дало ожидаемых положительных результатов. Проявлению Агендинское было дано отрицательное заключение из-за малых масштабов оруденения.

Помимо рудопоявления Агендинского, авторами были заверены два участка с явной, небогатой сульфидной минерализацией, в которых были выявлены отдельные знаки золота, но не было обнаружено признаков промышленного содержания. Один из таких участков расположен по бортам реки Агенда, другой в левом борту ручья Волчий. Оба проявления незначительны по локализации связаны с границами структурных этажей, где проявлены вторичные изменения метасоматического характера (рис. 5-7).



Спектр 1 [Spektrum 1]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Mg	0.21	0.67	0.35	MgO
Al	2.45	7.02	4.62	Al ₂ O ₃
Si	4.46	12.29	9.54	SiO ₂
K	0.5	0.98	0.6	K ₂ O
Ca	0.6	1.15	0.83	CaO
Fe	2.33	3.23	3.33	Fe ₂ O ₃
Ag	0.67	0.48	0.77	AgO
Au	79.96	31.44	0	
O	8.83	42.74		
Итого	100			

Рис. 5. Результаты спектрального химического анализа поверхности золотин.
[Fig. 5. Results of the spectral analysis of the surfaces of the gold grains.]

Спектр 2 [Spektrum 2]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Al K	0.53	3.56	1	Al ₂ O ₃
Au M	99	91.09	0	
O	0.47	5.35		
Итого	100			

Спектр 3 [Spektrum 3]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Al K	0.17	0.13	0.33	Al ₂ O ₃
Si K	44.67	32.69	95.55	SiO ₂
S K	0.87	0.56	0	
Fe K	0.93	0.34	1.33	Fe ₂ O ₃
Au M	1.92	0.2	0	
O	51.44	66.08		
Итого	100			

Спектр 4 [Spektrum 4]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Al K	0.35	2.3	0.65	Al ₂ O ₃
Ag L	1.68	2.8	1.93	AgO
Au M	97.41	88.65	0	
O	0.56	6.25		
Итого	100			

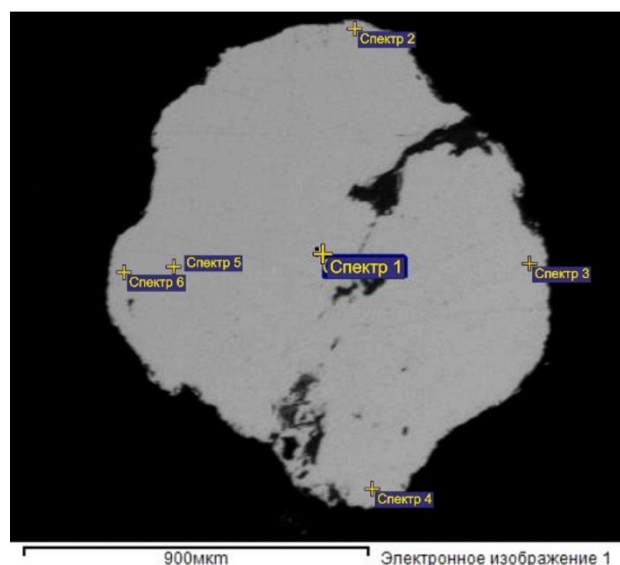
Спектр 5 [Spektrum 5]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Al K	0.35	2.2	0.67	Al ₂ O ₃
Fe K	0.62	1.88	0.89	Fe ₂ O ₃
Ag L	2.52	3.94	2.89	AgO
Au M	95.55	81.9	0	
O	0.95	10.07		
Итого	100			

Спектр 6 [Spektrum 6]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Na K	0.55	0.64	0.74	Na ₂ O
Mg K	1.22	1.34	2.02	MgO
Al K	11.25	11.09	21.26	Al ₂ O ₃
Si K	19.24	18.23	41.17	SiO ₂
K K	2.52	1.72	3.04	K ₂ O
Ca K	0.53	0.35	0.74	CaO
Ti K	0.72	0.4	1.19	TiO ₂
Fe K	5.47	2.6	7.81	Fe ₂ O ₃
Au M	22.01	2.97	0	
O	36.48	60.66		
Итого	100			

Спектр 7 [Spektrum 7]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Mg K	0.3	0.3	0.5	MgO
Al K	6.24	5.55	11.8	Al ₂ O ₃
Si K	18.03	15.39	38.56	SiO ₂
S K	0.48	0.36	0	
Ca K	22.7	13.57	31.76	CaO
Ti K	0.41	0.21	0.69	TiO ₂
Mn K	0.26	0.11	0.33	MnO
Fe K	10.07	4.32	14.4	Fe ₂ O ₃
Ag L	0.15	0.03	0.18	AgO
Au M	1.31	0.16	0	
O	40.05	60		
Итого	100			

Спектр 8 [Spektrum 8]				
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]	Соед.% [compound %]	Формула [formula]
Na K	0.71	0.79	0.96	Na ₂ O
Mg K	0.99	1.04	1.64	MgO
Al K	11.86	11.28	22.41	Al ₂ O ₃
Si K	16.63	15.19	35.57	SiO ₂
K K	1.68	1.1	2.03	K ₂ O
Ca K	0.62	0.39	0.86	CaO
Ti K	0.73	0.39	1.22	TiO ₂
Fe K	15.34	7.05	21.93	Fe ₂ O ₃
Au M	13.4	1.74	0	
O	38.05	61.02		
Итого	100			

Продолжение Рис. 5. Результаты спектрального химического анализа поверхности золотин.
[Continued Fig. 5. Results of the spectral analysis of the surfaces of the gold grains.]



Спектр 1 [Spektrum 1]		
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]
Ag L	6.69	11.57
Au M	93.31	88.43
Итого	100	

Спектр 2 [Spektrum 2]		
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]
Ag L	6.9	11.92
Au M	93.1	88.08
Итого	100	

Спектр 3 [Spektrum 3]		
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]
Ag L	6,81	11,77
Au M	93,19	88,23
Итого	100	

Спектр 4 [Spektrum 4]		
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]
Ag L	6,51	11,28
Au M	93,49	88,72
Итого	100	

Спектр 5 [Spektrum 5]		
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]
Ag L	7,07	12,2
Au M	92,93	87,8
Итого	100	

Спектр 6 [Spektrum 6]		
Элемент [Element]	Весовой % [weight %]	Атомный % [atomic %]
Ag L	6.91	11.93
Au M	93.09	88.07
Итого	100	

Рис. 6. Результаты спектрального химического анализа сердцевин золотин.
[Fig. 6. Results of the spectral analysis of the cores of the gold grains.]



Рис. 7. Сульфидная минерализация на поверхности скола метасоматита, увеличение в 2 раза.
[Fig. 7. Sulphide mineralization on the surface of the metasomate cleavage, 2x increase.]

Обсуждение

На основании вышеизложенного, очевидно отсутствие на территории участка реки Агенда рудопроявлений и зон минерализации, которые могли бы служить источником золота для формирования выявленных россыпей. Подобная ситуация описана в работе [3]. Можно предположить, что коренные источники россыпи реки Агенда существовали, но были полностью эродированы. Однако, эта гипотеза вызывает скепсис, так как геологические комплексы участка хорошо обнажены и изучены на водоразделах и останцах хребтов, на склонах и в пределах седловин, а также по плотик в процессе поискового бурения.

Ситуация с отсутствием источников сноса золото-содержащего материала на участке реки Агенда не является уникальной, напротив, на площади в пределах бассейнов рек Витимкан и Чина (р. Агенда является

левым притоком Чины в ее среднем течении) расположены 72 россыпных месторождения золота. Основная часть из них отработана или отрабатывается в настоящее время. Это, преимущественно, мелкозалегающие позднечетвертичные и современные россыпи. Вместе с тем известны россыпи неогенового возраста (Чинакан), реже – россыпи карстовых полостей (Увал Сайвани). При этом в пределах этой территории известно лишь одно коренное месторождение золота («Рудная горка»), которое разрабатывается в настоящее время. По ряду причин, таких как удаленность от россыпных месторождений и проявлений, морфология, гранулометрические характеристики золота коренного месторождения, «Рудная горка» могла служить источником для формирования ряда россыпей района, но далеко не всех. Например, в непосредственной близости от «Рудной Горки», в устье ручья Сивокон (левый приток реки Чинакан) авторами было заверено в современном аллювии наличие золота (верхние современные отложения аллювиального и аллювиально-пролювиального генезиса мощностью не более 1.5 м), которое характеризуется своей пылевой, тонкой размерностью и преимущественно равномерным распределением по пласту породы, и такое проявление находится более чем в 10 км от источника сноса. Авторы считают, что подобная картина формирования молодой россыпи из коренного источника является наглядной и отражает классическую модель россыпеобразования.

В долине реки Агенда ничего подобного не наблюдается, напротив, коренного источника золота нет, а россыпь вполне сформирована. Стоит отметить то, что протяженность реки Агенда чуть больше 20 км, а первые проявления наличия золота отмечены в 14 км от устья и, приблизительно, в 6 км от истока.

Геоморфология же, и химический (минеральный) состав поверхности золотин указывают на то, что золото в условиях гипергенеза находится длительное время, что позволило сформироваться россыпному месторождению (которое имеет промышленный интерес) и оставило свой типичный отпечаток в облике самих золотин.

Химический состав сердцевин золотин также указывает на то, что формирование устойчивого твердого раствора с равномерным распределением золота и серебра не может являться продуктом разрушения коренного источника, переноса и интеграции. Подобный твердый раствор вряд ли мог быть результатом пребывания в активных и динамичных гипергенных условиях.

Важно отметить, что первые внушительные знаки золота в долине реки Агенда появляются на участке гидросети, где меняется речной режим, профиль долины от V-образного переходит в U-образный, а «работа» самой реки переходит от стадии разрушения к стадии аккумуляции. Естественно, что этот переход по течению постепенен.

Таким образом, золото россыпей участка реки Агенда вряд ли могло образоваться путем размыва коренного источника с относительно богатой золото-

рудной минерализацией. Это позволяет предположить наличие другого механизма формирования золотоносной россыпи, отличной от классической модели разрушения, переноса и аккумуляции вещества, и процессы эти гораздо более сложные в химическом плане, чем так называемое естественное обогащение материала в зоне гипергенеза под действием экзогенных факторов.

На основе вышеизложенного авторы делают ряд выводов:

1. В долине реки Агенда выявлена и поставлена на баланс промышленная россыпь золота. На изучаемой территории отсутствуют коренные источники золота с золоторудной минерализацией, однако первые признаки сформированной россыпи появляются на участке за счет многократного, циклического процесса смены режима гидросети и облика продольного профиля речной долины. Режим меняется с денудационного на денудационно-аккумулятивный. Источником россыпи реки Агенда послужили комплексы горных пород, распространенные на этой территории, а также локальные небогатые участки рудной минерализации и кварцевого прожилкования.

2. Золото из россыпи представляет собой твердый раствор с равномерным распределением золота и серебра от 85:15 до 95:5. По морфологическим характеристикам золото средней размерности, комковатое, пластинчатое, причудливой формы, со следами деформации. Поверхность золотин покрыта окислами и гидроокислами железа, имеет сростания с кварцем, в кавернах и ямках присутствуют следы различных пород и минералов.

Заключение

Главным источником золота могли служить комплексы горных пород, распространенных на изучаемой территории, которые не содержат богатой рудной минерализации, как и не содержат золото в макроформе. Источником золота для данной территории служили небогатые жилы, узлы рудной минерализации, локальные зоны кварцевого прожилкования, которые не могли обеспечить реальные ресурсы россыпей. Существенный вклад в ресурсный потенциал, по-видимому, принадлежит золоту, находящемуся в них в виде наночастиц, которое в условиях гипергенеза и слабой гидродинамике способно переходить в состояние самосборки. При активной динамике условий внешней среды и при повышенной подвижности золота в наночастичной форме [4], значительная его часть беспрепятственно мигрировала вниз по течению до конечного бассейна стока. В нашем случае россыпь была сформирована в условиях относительно молодой долины, которая находится на верхних уровнях базиса эрозии, поэтому следует предположить, что для формирования россыпи в условиях гипергенеза крайне необходима спокойная обстановка для концентрации химически свободного золота.

После разрушения источника и высвобождения химически свободного золота в наночастичной форме, оно должно попасть в относительно спокойную динами-

ческую обстановку, где, в процессе формирования коры выветривания (даже с неполным профилем) при наличии матрицы, в качестве которой могут служить скопления коллоидов кремния, железа, происходит концентрация золота с переходом его уже в макросостояние, т.е. самосборка. Этот процесс детально описан в [3]. В пользу подобного вывода может говорить тот факт, что многие старичные или карстовые озера, в пределах речных долин или заболоченных верховых тундр, в своих рыхлых отложениях содержат знаки золота (в качестве примера можно привести озера Тилимской степи, которые расположены на правой террасе Витима в его среднем течении). Сменяемость этих условий, как и движение этих процессов, может быть многократным.

В целом, целесообразно применить подход, согласно которому следует рассматривать бедные золотом коренные породы как источник золота, которое в процессе ряда химических преобразований в гипергенезе способно дать россыпное месторождение за счет так называемой самосборки.

Подход по рассмотрению пород с небогатой золоторудной минерализацией или пород с отсутствием макроскопического золота в качестве потенциального источника для формирования россыпных месторождений и проявлений золота в республике Бурятия еще не применялся. Подобный подход позволяет по-новому взглянуть на процессы, в результате которых золото проходит путь от химического валентного-элемента (как правило нано-размерного) до видимой частицы благородного металла (ноль-валентного состояния) вблизи коренного источника в обстановке слабой динамики среды и внести коррективы в модели формирования и технологии разработки подобных месторождений.

В связи с тем, что при формировании месторождений и проявлений часть золота (очень часто – подавляющая) остается в микроскопическом виде, применение новых технологий по обнаружению и извлечению подобных форм металла поможет внести существенный вклад в сферу золотодобычи. Месторождения с низкими содержаниями вполне могут стать экономически

пригодны для разработки, а технологические отвалы уже извлеченных запасов будет целесообразно подвергать процессам повторного извлечения этого благородного металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ненахова Е. В., Сахно В. Г., Калашников Ю. Д., Ненахов В. М., Кузнецов Ю. А. Самосборка нанодисперсных форм платиноидов как метод их извлечения на примере золотосеребряных руд Милоградовского проявления (Приморский край) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 4. С. 102–106
2. Дубков А. А., Жабин А. В., Кузнецов Ю. А., Грибанов В. Н., Калинин В. Н., Гулин А. А. Исследования минерального состава россыпного месторождения Хлебопёк (Бодайбинский район Иркутской области) // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2023. Вып. 109. С. 20–29
3. Кузнецов Ю. А., Грибанов В. П., Варфоломеев С. Д., Калинин В. Н., Дубков А. А., Гулин А. А., Жабин А. В., Золотарева Г. С. Изменения минерального состава пород в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» на примере золоторудного месторождения Хлебопёк (Бодайбинский район, Иркутская область) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 1. С. 32–48
4. Ненахов В. М., Золотарева Г. С., Дубков А. А. Черные сланцы сухоложского типа и их благороднометалльный потенциал: современное состояние изученности, технологические реалии и перспективы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 1. С. 53–64
5. Ненахов В. М., Жабин А. В., Золотарева Г. С. Перспективы освоения благородно-металльного потенциала черносланцевого комплекса // *Разведка и охрана недр*. 2022. № 3. С. 32–37
6. Васильченко В. В. Геология и металлогения центральной части Витимского плоскогорья (Ципикан-Икат-Большое Амалатское междуречье): дис. ... канд. геол. мин. наук. Иркутск: ГИН СО АН СССР. 2010. 19 с.
7. Петровская Н. В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 332 с.
8. Новгородова М. И. Метаколлоидное золото // *Новые данные о минералах*. 2005. Вып. № 40. С. 106–114
9. Агапов Б. Л., Куликова Т. В. Рентгеноспектральный микроанализ. Учеб.-метод. пособие. Воронеж: ВГУ, 2018. 23 с.
10. Агапов Б. Л., Куликова Т. В. Растровая электронная микроскопия. Учеб.-метод. пособие. Воронеж: ВГУ, 2018. 29 с.

Features of the formation of placer gold in the Agenda river section (Bauntovsky Evenki district of the Republic of Buryatia)

©2024 V. I. Spitsyn^{1✉}, S. V. Dobrosotsky², G. S. Zolotareva¹

¹*Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1,
Voronezh, 394018, Voronezh, Russian Federation*

²*LLC "Andreevsky Kochey", Lenina, 93, 672000,
Transbaikalian region, Chita, Russian Federation*

Abstract

Introduction: It is a common view that the most important factor for the formation of placer gold deposits is the destruction of mineralized bedrocks and the transfer of the goldbearing material followed by its sedimentation. Recently, several studies have appeared focusing on “covert” nanosized gold. Following changes in geological, geochemical, and geomorphic conditions and factors, nanosized gold tends to self-assemble into macroscopic particles and then into kernels, flakes, intergrowths, and even nuggets [1–5]. It is important to investigate such processes in order to complement or reconsider the existing models of formation of placer gold deposits.

The geological structure of the region: From the point of view of orography, the Agenda licensed area is located in the North-West part of the Vitim Plateau. The territory has a complicated landscape and is located in the junction between the fold rim of southern Siberian platform, the Aldanian bend, and the Zabaykalsky region of Late Paleozoic-Mesozoic activation.

The purpose of the study was to investigate the goldbearing potential of the Agenda river valley and to determine and assess potential sources of gold. While doing this, it was important to consider various viewpoints with regard to the formation of placer gold deposits in the studied region and the general mechanism of the formation of placer gold deposits with indefinite primary sources.

Methodology: In our study, we performed a mineralogical analysis of the free gold content in the heavy fraction under binoculars and studied the chemical composition of gold by means of scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis using a JEOL-6380 scanning electron microscope and a JNCA-250 microprobe.

Results: The appearance of the analyzed gold particles and their chemical composition indicate that all the gold in the Agenda river is a stable solid solution of gold and silver in a ratio from 85:15 to 95:5. Chemical zoning and the presence of impurities of other chemical elements indicating growth or self-purification of gold were not registered. The geomorphology and chemical (mineral) composition of the surface of the gold grains indicate that the material has been in the hypergenesis zone long enough to form the placer deposit.

Conclusion: The source of gold in the studied region were poor veins, ore mineralization clusters, and localised areas of quartz veining, which could provide for the actual sources of placers. Apparently, the source is largely contributed to by nanosized gold, which under hypergenesis and low hydrodynamics is capable of self-assembly. Due to the dynamic environment and increased mobility of gold nanoparticles [4], most of the gold easily migrated down the river to the terminal basin. The study presents a new approach to the transition from a valent chemical element (usually nanosized) to a visible gold particle (zero-valent gold) in the vicinity of a definite source and in a stable environment. It can help to elaborate the existing models of formation and adjust the extraction techniques used in such deposits.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Vasily I. Spitsyn, e-mail: vspitsyn-vsu@mail.ru

Keywords: nanogold, placer, Bauntovsky Evenki district of the Republic of Buryatia, self-assembly.

For citation: Spitsyn V. I., Dobrosotsky S. V., Zolotareva G. S. Features of the formation of placer gold in the Agenda River section (Bauntovsky Evenki district of the Republic of Buryatia) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 2, pp. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/29-41>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Nenakhova E. V., Sakhno V. G., Kalashnikov Yu. D., Nenakhov V. M., Kuznetsov Yu. A. Samosborka nanodispersnykh form platinoidov kak metod ih izvlecheniya na primere zolotoserebryanykh rud Milogradovskogo proyavleniya (Primorskiy kraj) [Self-assembly of nanodispersed forms of platinumoids as a method of their extraction using the example of gold-silver ores of the Milogradovsky occurrence (Primorsky Territory)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 4, pp. 102–106 (In Russ.).
2. Dubkov A. A., Zhabin A. V., Kuznetsov Yu. A., Gribanov V. N., Kalinichenko V. N., Gulin A. A. Issledovaniya mineral'nogo sostava rossypnogo mestorozhdeniya Hlebopyok (Bodaybinskiy rayon irkutskoj oblasti) [Studies of the mineral composition of the Khlebopek placer deposit (Bodaybinsky district of the Irkutsk region)]. *Nedra Povolzh'ya i Prikaspiya – Subsoil of the Volga and Caspian regions*, 2023, no. 109, pp. 20–29 (In Russ.).
3. Kuznetsov Y. A., Gribanov V. P., Varfolomeev S. D., Kalinichenko V. N., Dubkov A. A., Gulin A. A., Zhabin A. V., Zolotareva G. S. Izmeneniya mineral'nogo sostava porod v ryadu «korennoy istochnik – kora vyvetrivaniya – rossyp» na primere zolotorudnogo mestorozhdeniya Khlebopek (Bodaybinskiy rayon, Irkutskaya oblast) [Changes in the mineral composition of rocks in the series “root source – weathering crust – placer” using the example of the Khlebopek gold deposit (Bodaybinsky district, Irkutsk region)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 32–48 (In Russ.).
4. Nenakhov V. M., Zolotareva G. S., Dubkov A. A. Chernye slancy suholozhskogo tipa i ih blagorodnometal'nyj potencial: sovremennoe sostoyanie izuchennosti, tekhnologicheskie realii i perspektivy [Black shales of the Sukhoi Log type and their noble metal potential: current state of knowledge, technological realities and prospects]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 1, pp. 53–64 (In Russ.).
5. Nenakhov V. M., Zhabin A. V., Zolotareva G. S. Perspektivy osvoeniya blagorodno-metall'nogo potenciala chernoslancevogo kompleksa [Prospects for the development of the noble metal potential of the black shale complex]. *Razvedka i ohrana nedr – Exploration and protection of subsurface resources*, 2022, no. 3, pp. 32–37 (In Russ.).
6. Vasilchenko V. V. *Geologiya i metallogeniya tsentralnoy chasti Vitimskogo ploskogorya (Tsipikan-Ikat-Bolshoe Amalatskoe mezhdurechye)*: diss. ... kand. geol. min. nauk [Geology and metallogeny of the central part of the Vitim Plateau (Tsipikan-Ikat-Great Amalat interfluvium). PhD diss.]. Novosibirsk, GIN SO AN USSR publ., 1973, 170 p. (In Russ.).
7. Petrovskaya N. V. *Samorodnoe zoloto* [Native gold]. Moscow, Nauka publ., 1973, 332 p. (In Russ.).
8. Novgorodova M. I. *Metakolloidnoe zoloto* [Metacolloidal gold]. *Novye dannye o mineralakh – New data on minerals*, 2005, no. 40, pp. 106–114 (In Russ.).
9. Agapov B. L., Kulikova T. V. *Rentgenospektralnyy mikroanaliz* [X-ray microanalysis. Educational and methodological manual for universities]. Voronezh, VSU publ., 2018, 23 p. (In Russ.).
10. Agapov B. L., Kulikova T. V. *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya* [Scanning electron microscopy. Educational and methodological manual for universities]. Voronezh, VSU publ., 2018, 29 p. (In Russ.).

Спицын Василий Иванович, аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; зам. гл. геолога ГРП, АО «Базовые металлы», Кекура, Чукотский АО, Российская Федерация e-mail: vspitsyn-vsu@mail.ru; ORCID 0009-0003-1723-353X

Добросотский Сергей Викторович, гл. геолог, ООО «Андреевский кочей», Чита, Забайкальский край, Российская Федерация; e-mail: sergey-imgre@yandex.ru; ORCID 0009-0001-1830-1202

Золотарева Галина Сергеевна, к.г.м.н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: akcessoriy@mail.ru; ORCID 0000-0003-2542-4558

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Vasily I. Spitsyn, Postgraduate Student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; Deputy Chief Geologist of Geological Exploration, JSC "Base Metals", Kekura, Chukotsky AO, Russian Federation, e-mail: vspitsyn-vsu@mail.ru; ORCID 0009-0003-1723-353X

Sergey V. Dobrosotskiy, Chief Geologist, Andreevsky Kochey LLC, Chita, Zabaykalsky kr., Russian Federation; e-mail: sergey-imgre@yandex.ru; ORCID 0009-0001-1830-1202

Galina S. Zolotareva, PhD in Geol.-Min., Associate professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: akcessoriy@mail.ru; ORCID 0000-0003-2542-4558

Authors have read and approved the final manuscript.