

Изменения минерального состава пород в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» на примере золоторудного месторождения Хлебопёк (Бодайбинский район, Иркутская область)

©2024 Ю. А. Кузнецов¹✉, В. П. Грибанов¹, С. Д. Варфоломеев²,
В. Н. Калинин², А. А. Дубков³, А. А. Гулин⁴, А. В. Жабин⁵, Г. С. Золотарева⁵

¹ООО «РГ Иркутскгеофизика» ул. Клары Цеткин д. 9а, 664039, Иркутск, РФ

²ИБХФ РАН ул. Косыгина д. 4, 119334, Москва, Российская Федерация

³ФГБУ ВНИГНИ ул. Ш. Энтузиастов д. 36, 105118, Москва, Российская Федерация

⁴ФИЦ ХВ РАН ул. Вавилова д. 44, 119333, Москва, Российская Федерация

⁵ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,

Университетская пл. 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Введение: Практика золотодобычных работ показывает, что значительная часть металла остаётся в «хвостах». Это связано с двумя основными причинами. Во-первых, значительная масса золота и другие сопутствующие ему металлы находятся в породах в виде соединений с кислородом, серой, мышьяком, йодом и другими элементами. Во-вторых, частицы этих соединений встречаются в виде нано- и микро- размерностей, что исключает, или сильно затрудняет, их извлечение традиционными способами. Сочетая производственные возможности организаций и современных методов исследований, можно проследить путь преобразования благородных элементов от первичного источника до россыпи, через промежуточные зоны. Удачным примером прослеживания этого ряда преобразований может служить месторождение россыпного золота Хлебопёк, расположенного в Бодайбинском районе Иркутской области.

Геологическое строение Бодайбинского района достаточно полно охарактеризовано во многих работах. В том числе детально изучены минералого-геохимические особенности золоторудных месторождений района, типоморфные особенности рудного золота, пиритов [1–4] и пр. Исследованию особенностей изменения минерального состава россыпных месторождений района посвящено меньше работ [5–6]. В частности, по месторождению Хлебопёк – всего одна [6]. Россыпное месторождение Хлебопёк географически находится примерно в 30 км к югу от рудного гиганта Сухой Лог. Сам ручей Хлебопёк – водный поток протяжённостью около 15 км. Его притоки имеют длину не более 2–2.5 км. Они дренируют толщи углеродистых сланцев венд-рифейского возраста (углеродистые алевролиты, филлиты, песчаники с тонкими пропластками карбонатов), подвергшихся региональному метаморфизму на рубеже 520–570 млн лет.

Методика исследований: Элементные составы коренных пород, кор выветривания, россыпей и галеефельных отвалов исследовались на рентгенофлуоресцентных установках: «ARL Perform'x» (Швейцария); «Schimadzu» (Япония); «Vega 400» (Израиль). На многих десятках исследованных образцов, отобранных на большей части участка, было подтверждено (и проверено пробирным анализом и масс-спектрометрией) наличие значимых содержаний в них золота и платиноидов (более 1–5 г/т). Наличие коллоидных частиц золота в водах притоков и ручья подтверждено методами рамановской спектроскопии (прибор RamanStation 400F).



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Обсуждение результатов: Методами электронной микроскопии, рентгенофазовой дифрактометрии исследованы образцы пород кристаллических сланцев, песчано-глинистых русловых отложений притоков ручья Хлебопёк и морфология золота на одноимённом россыпном месторождении. Изучено строение, состав кристаллических фаз и элементный сектор соответствующих пород. Сделаны выводы о ведущей роли химических процессов, способствующих высвобождению минеральных фаз золота из пород и дальнейшему их преобразованию в коллоидные формы и, далее, в крупное золото «самородкового» типа.

Заключение: Основными факторами образования россыпей в притоках крупных водотоков являются химические процессы преобразования в зоне гипергенеза валентных минеральных форм золота в коллоидные формы и осаждению металлов в нольвалентной форме.

Ключевые слова: месторождение Хлебопёк, Бодайбинский район, минеральные формы Au, коллоидное золото, самородки.

Для цитирования: 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. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/32-48>

Введение

Геологическое строение Бодайбинского района достаточно полно охарактеризовано во многих работах [1–4 и др.]. В том числе детально исследованы минералого-геохимические особенности золоторудных месторождений района, типоморфные особенности рудного золота, пиритов и пр. Исследованию особенностей изменения минерального состава россыпных месторождений района посвящено меньше работ.

Россыпное месторождение Хлебопёк [6] географически находится относительно недалеко (около 30 км к югу) от рудного гиганта Сухой Лог. Сам ручей Хлебопёк – водный поток относительно небольшой протяжённости (не более 15 км). Его притоки имеют длину не более 2–2.5 км. Они дренируют толщи углеродистых сланцев венд-рифейского возраста (углеродистые алевролиты, филлиты, песчаники с тонкими пропластками карбонатов), подвергшихся региональному метаморфизму на рубеже 520–570 млн лет.

Кроме многочисленных россыпей, открытых и эксплуатируемых за более чем столетие десятилетний период времени, практически на всех известных водотоках района в непосредственной близости от Хлебопёка, кроме Сухого Лога, выявлен и эксплуатируется ряд известных золоторудных месторождений и проявлений. В их число входят: Западное, Голец Высочайший, Вернинское, Чёртово Корыто и ряд других месторождений и рудопроявлений [1–5], локализованных в верхнепротерозойских углеродистых кристаллических сланцах, детально разведанных на глубину более километра. Характерной особенностью всех рудных месторождений района является отсутствие интрузивных пород в их рудных полях или в какой-либо близости от Бодайбинского района, и незначительное проявление кварцево-жильной минерализации. Все известные рудные месторождения района относятся к золотосульфидной формации, от малосульфидного, до кварц-сульфидного её типов. Золото в рудных месторождениях Бодайбинского района относится к тонкодисперсной группе размерности. В рудных месторождениях района, со вре-

мён Н.В. Петровской [5], крупного золота, более 2–3 мм, в рудных месторождениях, за многие десятилетия добычи, не было зафиксировано [2–4].

В отличие от рудного золота, для россыпей Бодайбинского района, в том числе и для россыпей Хлебопёка характерно наличие «крупного» золота, не зафиксированного, как уже отмечено, ни на одном из рудных объектов района. Что же касается самого Сухого Лога, то он вообще не вскрыт эрозией и, даже теоретически, не может быть источником россыпей. За всю 160-ти летнюю историю добычи россыпного золота в Бодайбинском районе выходов фрагментов рудно-магматических систем, которые можно было бы трактовать как возможные источники формирования рудного золота, из которых образовались крупные россыпные месторождения, в плотиках отработанных россыпей так же не было зафиксировано.

Суммарные, достоверно установленные запасы рудных месторождений района, за исключением Сухого Лога, не вскрытого эрозийными процессами, не превышают 300 тонн. В то время как, по данным открытых источников, россыпного золота в Бодайбинском районе за весь период было добыто не менее 1200–1400 тонн, из них не менее 450 тонн, относимых к самородкам.

Можно предположить, что источником крупного россыпного золота Бодайбинского района являлись гипотетические полностью эродированные или не найденные протерозойские, палеозойские или мезозойские рудные месторождения с крупно-самородковым типом минерализации, которые потом многократно разрушались и концентрировались в более молодых отложениях. Геологических подтверждений этому нет.

Верховья гидрографической сети района прекрасно обнажены, покрыты сетью местных дорог и доступны для изучения, плотики большинства крупных и мелких рек района и их бесчисленных притоков неоднократно вскрывались. Поэтому, предполагать, что в качестве источников для месторождений россыпного золота

служили группы мелких штокерковых кварцевых прожилков, существующих в настоящее время, или полностью эродированных других источников, существовавших в более ранние периоды геологической истории, из которых бы поступал материал, образовавший россыпные месторождения района можно лишь со значительной долей скепсиса.

Исторически сложилось так, что на протяжении столетия процессы изучения образования россыпей развивались в основном на представлениях о ведущей роли механической сортировки и дезинтеграции рудного материала в процессе перемещений различной временной длительности и аккумуляции в отложениях, образующих аллювиальные, флювиогляциальные, прибрежно – морские, озёрные, склоновые, эоловые фации и пр. [7].

При этом подходе петрографический состав материала и минералогический состав находящегося в нем золота, платиноидов или других тяжелых минералов принимается исследователями как само собой разумеющееся, как нечто, сформировавшееся ранее в эндогенных условиях, и подвергающееся лишь разрушению и сортировке по размерам и плотности в процессе механической транспортировки и локализации в благоприятных геолого-геоморфологических условиях.

По крайней мере, для золота и платиноидов все гипотезы образования их россыпных форм предполагают их происхождение из самородных форм. В то же время, только для золота минералам известны более 40 минеральных форм и более 28 минеральных форм – для платиноидов. Их считают значительно реже встречающимися в природе, чем «самородные» минеральные формы, и как источник образования россыпей обычно не рассматривают [7]. Хотя, в результате химических реакций, они достаточно легко преобразуются из этих, более сложных по химическому составу соединений, в собственно золото или платиноиды.

То, что ультра- тонкодисперсные минеральные формы благородных элементов встречаются в рудных месторождениях значительно чаще, чем «самородные», часто обсуждаются в литературных источниках [8–14]. Авторы статьи придерживаются мнения, что первичными минеральными формами драгоценных металлов, заключёнными в породах как рудных, так и россыпных золоторудных месторождений, являются их химические соединения. А самородные, «нольвалентные формы» возникают именно из них, при стечении многих, благоприятных геологических условий.

Общие представления о необходимости создания принципиально других схем образования россыпных месторождений, в Бодайбинском районе, и возможности создания на основе таких схем геолого-поисковой модели для конкретного месторождения, сформировались на основании теоретических представлений, в первую очередь, Н.В. Петровской [5], где она сформулировала мысль: «Приведенные данные свидетельствуют о широчайшем рассеянии золота в природе и показывают, что огромные его количества оказались вне сферы воздействия процессов концентрации рудогенных элементов».

Цель и методика проводимых исследований

Основной целью предлагаемой работы является создание геолого-поисковой модели, объясняющей локализацию россыпного золота в пределах лицензионной площади, с последующей проверкой эффективности такой модели на практике.

Входными параметрами модели послужили полученные данные о повышенных содержаниях золота в кристаллических сланцах района, в гале-эфельных отвалах и концентратах шлихов, получаемых после промывки на участке, подтверждаемые пробирным анализом, рентгено-флуоресцентным и другими методами.

При изучении ежедневно снимаемых концентратов, десятков штучных проб и 28 полупромышленных проб гале-эфельных отвалов месторождения Хлебопёк (вес каждой пробы составлял 850–1000 кг) было зафиксировано повышенное содержание золота в кристаллических сланцах в пределах лицензионной площади и её ближайших окрестностях. В 5 из 28 полупромышленных проб были обнаружены содержания Au более 30 г/т, (в одной – 105 г/т). Но при промывке раздробленных проб, материал которых был отмыт на различных типах доводочных приборов, никакого гравитационно извлекаемого золота не было зафиксировано. По данным электронной микроскопии, минеральные формы благородных элементов в этих гале-эфельных отвалах были представлены образованиями размером в первые микроны и менее (рис. 1). В то время как в аллювии ручья, дренирующего породы, откуда и были отобраны данные технологические пробы, были получены значительные количества не только мелкого золота, но и самородков.

Элементный состав обломочной части одной из таких проб, исследованной на электронном микроскопе «Hitachi TM – 1000», содержащих повышенные содержания Au (рис. 1), представлен в табл. 1.

Содержания элементов, в том числе и благородных, в гале-эфельных отвалах исследовался нами на рентгено флуоресцентных установках: «ARL Perform'x» (Швейцария); «Schimadzu» (Япония); «Vega 400» (Израиль). На многих десятках исследованных образцов, отобранных из гале-эфельных отвалов, на большей части участка, было получено (и подтверждено пробирным анализом и масс-спектрометрией) наличие значимых содержаний золота и платиноидов (более 1–5 г/т).

Это подтвердило то, что по каким-то геологическим причинам содержание благородных элементов в кристаллических сланцах участка действительно повышено и находится в виде микроформ.

Установленное наличие микроформ в кристаллических сланцах и гале-эфельных отвалах, состоящих из этих же сланцев, никак не объясняло наличия крупных форм «самородного» золота, получаемого при промывке из очень небольших по протяжённости притоков р. Хлебопёк, аллювий которых состоит из этих же сланцев.

При добыче россыпного золота нами иногда отмечается наличие видимого золота, вероятно, генетически связанного с рудными процессами. Но таких находок в основной массе добываемого золота немного.

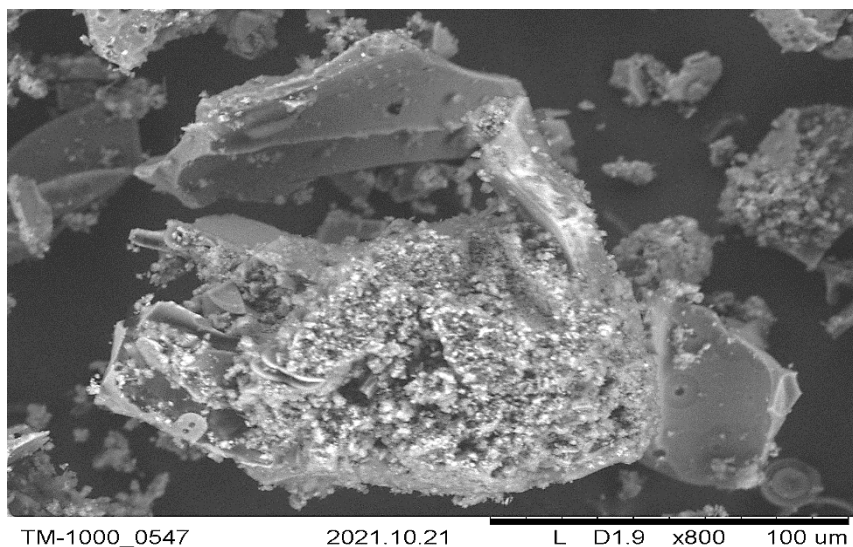


Рис. 1. Месторождение Хлебопёк. Технологическая проба № 16 с содержаниями в технологической пробе: Au – 115 г/т и платиноидов 46 г/т. В поле зрения сканирующего электронного микроскопа «Hitachi TM – 1000» видны мельчайшие рудные частицы (значительно более светлые) на поверхности более крупной частицы халькопирита (серое поле).

[Fig. 1. The Khlebopek deposit. Sample No. 16 with the sample content: 115 g/t of Au and 46 g/t of platinoids. In the field of vision of the Hitachi TM – 1000 microscope we can see the smallest ore particles (considerably lighter) on the surface of a larger particle of chalcopyrite (grey field).]

Табл. 1. Элементный состав зерна с рис. 1, по данным ЭДС «Hitachi TM – 1000 (в %)»
[Table 1. The elemental composition of grain from Fig. 1, according to EMF "Hitachi TM – 1000" (%)]

Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Hg	Fe	Cu	Se	Mo	Ru	Rh	Pd
4.6	3.0	5.3	2.4	21.7	1.0	2.6	1.6	1.3	13.1	24.1	0.6	0.0	0.0	1.2	1.1
Ag	Sn	Te	W	Os	Ir	Pt	Au	Bi							
0.6	2.1	0.3	0.0	2.6	1.7	0.0	6.2	2.9							

Часто, особенно в углублениях самородков, встречаются полуокатанные мелкие песчинки кварца и полевых шпатов, сцементированных гидроокислами железа или глинистых минералов, такие зёрна наблюдаются и внутри самородков, но относить их к первичному жильному материалу можно лишь со значительной долей скепсиса. В то же время, при промывке песчано-глинистой массы отмечается наличие частиц золота до 2 см, по нашему мнению, практически не перемещавшихся в водных потоках, и находящихся в песках «in situ» (рис. 2) и, вероятнее всего, образующихся в песчано-глинистой массе аллювия.



Рис. 2. Мелкий самородок из промытых на промприборе песков, состоящий из обособлений собственно золота, сцементированных гётитом, аморфным и раскристаллизованным кварцем. Из одного из таких углублений (левая, нижняя часть

снимка) цементирующая масса была удалена стальной иглой. 4-й приток ручья Хлебопёк.

[Fig. 2. A small nugget from sands washed on washing plant, consisting of separated gold itself, cemented by goethite and amorphous and decrystalline amorphous quartz. The cement mass was removed with a steel needle from one of such depressions (bottom left part of the image). 4th tributary of the Khlebopek stream.]

Таким образом, установлено, что в материале россыпей месторождения существуют, по крайней мере, три генетические группы форм золота: 1) мельчайшие формы его соединений, находящиеся в породах кристаллических сланцев района, 2) рудное золото, видимо связанное с когда-то существовавшими гидротермальными процессами, наложенными на кристаллические сланцы, и 3) значительно более крупное золото, находящееся в россыпях.

Для исследования минеральных форм благородных элементов, находящихся в кристаллических сланцах, кроме методов электронной и оптической микроскопии, нами использовался метод рентгенофазовой дифрактометрии. Анализ проб проводился на рентгенофазовых дифрактометрах: «ARL X'tra» (Швейцария), «Rigaku» (Япония) и «Powdix 600» (Белоруссия). В приборной базе программы анализа «Oxford Crystallographica search match» гарантированно имелись данные 125 кристаллических соединений золота и более 100 соединений платиноидов. А также, не менее 45700 кристаллографических характеристик других кристаллических фаз [11, 12].

Были исследованы большеобъёмные пробы, отоб-

ранные из водораздельных частей (табл. 2) и долинных гале-эфельных отвалов, из долин притоков (табл. 3–5), явно носящих следы преобразований русловыми процессами и хвостов тяжёлой фракции после её промывки на вибростоле (табл. 6).

В левой части таблицы – кристаллические фазы. В строках с названиями – минеральные фазы, имеющие минералогическое название. С формулами, но без наз-

вания, – зарегистрированные ММА (Международной Минералогической Ассоциацией) и имеющиеся в базе прибора. В центральном столбце – относительная частота встречаемости фаз. В правом ошибка определения фазы. Минеральные фазы благородных элементов, хорошо растворимых в воде, отмечены восклицательным знаком.

Табл. 2 Минеральный состав кристаллических сланцев водораздельной зоны
[Table 2. Mineral composition of crystalline schists from the watershed area]

Кристаллическая фаза [Crystalline phase]	Относительная весовая доля фаз, в % [Relative weight fraction of phases, %]	Погрешность измерения, δ [Measurement error, δ]
Quartz	53.4	0.69
Muscovite	19.3	0.48
Albite(low)	11.5	0.39
Chlorite	4.8	0.4
Ag Au F4 !	1.7	0.38
Au Zn3	1.5	0.5
Au Sb3	1.5	0.17
Illite	1.3	0.45
Au Cu Zn2	1.1	0.39
Krennerite AuTe2	1	0.29
Au Cu Se4	1	0.22
Pyrite	0.8	0.1
Acanthite (Silver Sulphide, low)	0.3	0.09
Au0.75 Hg0.25	0.2	0.07
Au Cu F5 !	0.2	0.05
Chalkopyrite	0.2	0.03
Silver fluoride !	0.2	0.03

Табл. 3, 4 Минеральный состав кристаллических сланцев из русловых отложений притоков
[Tables. 3, 4 Mineral composition of crystalline schists from the stream deposits of tributaries]

2-й приток [2nd tributary]			4-й приток [4th tributary]		
Кристаллическая фаза [Crystalline phase]	Относительная весовая доля фаз, в % [Relative weight fraction of phases, %]	Погрешность измерения, δ [Measurement error, δ]	Кристаллическая фаза [Crystalline phase]	Относительная весовая доля фаз, в % [Relative weight fraction of phases, %]	Погрешность измерения, δ [Measurement error, δ]
1	2	3	4	5	6
Quartz	45.5	0.7	Quartz	51.9	0.59
Muscovite	17.8	0.64	Muscovite	19.3	0.57
Albite, low	11.5	0.5	Albite(low)	12.4	0.35
Biotite	4.6	0.32	Chlorite	7.1	0.49
Orthoclase	4.5	0.38	Kaolin	4.5	0.37
Chlorite	4.1	0.49	Ag Au F4 !	1.4	0.32

Продолжение Табл. 3, 4
[Continued Table 3, 4]

1	2	3	4	5	6
Kaolin	3.1	0.31	Au Cu	1.2	0.44
Goethite	2.6	0.38	Au Cu Zn ₂	0.9	0.57
Ag Au F ₄ !	1.9	0.46	Pyrite	0.4	0.13
Au Cu Se ₄	1.1	0.24	Ag Au Te ₂	0.3	0.06
Au Cu	0.8	0.14	Argentite (Silver sulphide beta 186°)	0.3	0.17
Krennerite AuTe ₂	0.7	0.15	Okartite Ag ₂ FeSnS ₄	0.3	0.04
Au Sb ₃	0.5	0.2			
Pyrite	0.5	0.12			
Argentite (Silver sulphide beta 186°)	0.3	0.15			
Silver oxide	0.3	0.03			
Silver fluoride !	0.2	0.03			

Табл. 5, 6. Минеральный состав тяжелой фракции из русловых отложений притоков промытый на старательском лотке и вибростоле

[Tables 5, 6. Mineral composition of the heavy fraction from the stream deposits of tributaries washed on a wash pan and a shaking table]

Таблица 5
[Table 5]Таблица 6
[Table 6]

Кристаллическая фаза [Crystalline phase]	Относительная весовая доля фаз, в % [Relative weight fraction of phases, %]	Погрешность измерения, δ [Measurement error, δ]
Goethite	57.2	0.22
Quartz	11.4	0.32
Pyrite	9.8	0.56
Albite, low	4.4	0.25
Magnetite	2.9	0.15
Pyrrhotite	2.6	0.13
Lepidocrocite	2.4	0.11
Zircon	1.5	0.13
Rutile	1.4	0.21
Au Cu	1.2	0.24
Ag ₃ O ₄	1	0.12
Adulyar	0.8	0.21
Almandin	0.7	0.16
Magnetite, titanian	0.7	0.18
Ag Au Te ₂	0.5	0.09
Silver sesquioxide	0.5	0.13
Kaolin	0.4	0.05
Au Cu Se ₄	0.3	0.1
Au _{0.75} Hg _{0.25}	0.3	0.13

Кристаллическая фаза [Crystalline phase]	Относительная весовая доля фаз, в % [Relative weight fraction of phases, %]	Погрешность измерения, δ [Measurement error, δ]
Quartz	39	0.88
Muscovite	15.1	0.98
Goethite	12.5	0.45
Wolframite	9	0.35
Iron	7	1.25
Au Cu	3.4	0.58
Zircon	3	0.13
Pyrite	2.8	0.18
Ilmenite, natural, -Ti,Mg	2.6	0.2
Albite, low	2.4	0.54
Au Zn ₃	1.3	0.75
Chlorite	1	0.4
Rutile	0.5	0.18
Gold antimonide	0.2	0.06
Galena	0.2	0.03

Из данных, приведённых в таблицах 2–4 и работе [6], следует, что основными минеральными формами золотосеребряной и золоторудной минерализации в исследованных образцах кристаллических сланцев, как на водораздельных частях, так и в долинах притоков являются не «самородные, нольвалентные» их формы, которые в исследованных семи десятках образцов были установлены лишь в единичных случаях, причем только для минеральных форм, размеры которых превышали 20 микрон. Основная часть минеральных форм золота представлена тонкодисперсными теллуридными, селенидными, ртутистыми, оксидными и фторауратными формами, соединениями, легко и активно вступающими в обменные реакции. Кроме того, фтораураты серебра и меди, вообще, растворимы в воде. Некоторые из этих форм зафиксированы разными независимыми физическими методами: оптической, электронной микроскопией и рентгенофазовой дифрактометрией. Также было установлено, что в гале-эфельных отвалах (аллювии притоков) появляются явно вторичные минералы: гётит,

каолин, иллит и др. по мере возрастания содержания гётита и каолина, количество этих фаз начинает уменьшаться, а количество «нольвалентного» золота начинают возрастать и, даже, превалировать.

Это ещё более заметно при анализе минеральных фаз тяжёлой фракции, получаемых при промывке на лотках (табл. 5, 2-й приток) или хвостов, получаемых при промывке концентратов на вибросстолах (табл. 6, 3-й приток). В которых «нольвалентные» формы начинают превалировать и отчётливо видны или в виде знаков (табл. 5) или «плывущего золота» (табл. 6).

Ещё более заметно превалирование «нольвалентных» форм золота в зоне развития сплошной гётитизации современного аллювия в верховьях ручья Хлебобёк, где гётит образует базальный тип цемента. Эта зона имеет линейную форму, занимая долину ручья, как бы «запирая» устья притоков, и протягивается вниз по течению не менее чем на 3–4 км, прекрасно видимую на космических снимках. Минеральный состав пород зоны гётитизации приведён в табл. 7.

Табл. 7. Минеральный состав сцементированных пород современного аллювия из зоны сплошной гётитизации (устье 4-го притока).
[Table. 7. Mineral composition of the cemented rocks of modern alluvium from the zone of total goethitisation (mouth of the 4th tributary)]

Кристаллическая фаза [Crystalline phase]	Относительная весовая доля фаз, в % [Relative weight fraction of phases, %]	Погрешность измерения, δ [Measurement error, δ]
Goethite	74.5	1.37
Quartz	14.1	0.41
Muscovite	5.5	0.96
Au Cu	1.7	0.54
Au Zn ₃	1.5	0.49
Coquimbite Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·9H ₂ O	0.9	0.29
Silver sulphide beta 186°	0.5	0.35
Au _{0.75} Hg _{0.25}	0.4	0.18
Pyrrhotite	0.7	0.12
Pyrite	0.2	0.07

Анализ полученных данных, предполагает, что основным источником золота, поступившего в аллювий местных водотоков, являлись их более сложные, чем «нольвалентное золото» по составу минеральные формы, находящиеся в виде микроформ в самих кристаллических сланцах, которые дренирует ручей Хлебобёк и его притоки преобразуются природными процессами, в аллювии в «нольвалентные» его формы. Кроме того, установлено, что содержания благородных элементов в пиритах (за редким исключением) были ещё менее значительными, чем в сланцах. И сами по себе кристаллические сланцы и пириты источником поступления крупного золота не могли быть, поскольку, даже когда оно в них есть, имеет субмикрон-

ные размеры.

Источником крупного россыпного золота не могли быть и редкие кварц-полевошпатовые прожилки в сланцах, которые действительно встречаются, на водораздельных и склоновых частях сопков. Они были детально исследованы на содержания золота многократно, начиная с 60-х годов. Содержания золота в них оказались ничтожны, и наличия в них крупного золота, также, как и во всех рудных месторождениях района, отмечено не было.

Кроме того, учитывалось, что в водах как притоков, так и самого ручья, методами «рамановской» спектроскопии, постоянно фиксируется наличие частиц «нольвалентного» золота, имеющего размеры от

20 до 200 нанометров. Исследования проводились на приборе ФТ-803 с приставкой однократного нарушенного полного внутреннего отражения с алмазным кристаллом производства «Симекс» (г. Новосибирск). КР-спектры снимались при помощи КР-спектрометра RamanStation 400F, оснащенного лазером с длиной волны 785 нм (пр-во Perkin Elmer). Мощность лазера при съемке КР-спектроскопии 90 мВт, длительность съемки 30 с. Обработку спектров проводили в программе Bruker OPUS 7.2.

Невыясненными оставались перечисляемые ниже вопросы:

1) какие процессы заставили мигрировать из кристаллических сланцев частицы соединений благородных металлов, а затем и преобразовываться их в другие формы?

2) каким образом произошла «самосборка» из ультрадисперсных частиц, в большинстве своём (селениды, теллуриды, фториды золота) имеющих степень окисления +3, в макро-образования в виде пылинок и самородков с нулевой степенью окисления?

3) почему в приустьевых частях притоков концентрируются самородки, а выше по их течению начинает преобладать более мелкое золото?

4) почему все видимые невооружённым глазом выделения золота, полученные из очень небольших по протяжённости притоков, в большинстве случаев, имеют уплощённые и сглаженные формы, хотя путь их транспортировки от любого (пусть, даже не найденного нами) рудного источника крайне мал?

Ключевым моментом для понимания генезиса россыпных месторождений района в целом, и Хлебопёка в частности, является, как мы предположили, процесс трансформации минеральных составляющих кристаллических сланцев района, несомненно, содержащих золото и самого золота в зоне криогенного гипергенеза, в приповерхностном слое над коренными породами. Именно здесь породы, содержащие концентрации благородных элементов, сформированные в эндогенных условиях, и длительный период геологического времени пребывавшие в состоянии термодинамического и геохимического равновесия, оказываются в условиях гипергенной зоны с резко отличающейся термодинамикой и геохимией.

Своеобразными подсказками по решению невыясненных вопросов послужило то, что:

1) геологической съёмкой, поисково-оценочными работами на водораздельных и склоновых участках Хлебопёка были установлены зоны развития площадной коры выветривания, визуально воспринимаемые как области интенсивного поверхностного окисления сульфидов в кристаллических сланцах;

2) в гале-эфельных отвалах кристаллических сланцев, были зафиксированы вторичные минералы, абсолютно не характерные для неизменённых кристаллических сланцев: гётит и глинистая масса, представленная каолином, гидрослюдами и иллитом. Пирит, постоянно присутствующий в кристаллических сланцах и в промываемых на промприборах дезинтегрированных до

песчано-глинистой массы их производных, в количествах 0.4–0.6 %, в той или иной степени был изменён процессами окисления;

3) все «нольвалентные» соединения золота, зафиксированные в гале-эфельных отвалах ручья «Хлебопёк», по многочисленным данным электронной микроскопии, имели микронные и субмикронные размеры и признаки метакolloидов, в понимании М.И. Новгородовой [15];

4) методами «рамановской» спектроскопии в водах притоков и самого ручья Хлебопёк выявлено наличие наноразмерного (15–20 нм) «нольвалентного» золота, то есть – его коллоидных частиц;

5) в верховьях русла самого ручья Хлебопёк выявлена линейная зона гётитизации, протяжённостью в несколько км, как бы «запирающая» устья притоков.

По результатам поисково-оценочных и добычных работ на участке было установлено, что вынос железа и серы (в основном из сульфидов железа) тесно связан с движением над- и межмерзлотных вод в склоновых и аллювиальных отложениях. Эти воды фиксируются в виде повышенных притоков воды в мерзлотных породах при бурении и горных работах, а также наличие в этих горизонтах гидроокислов железа и наночастиц золота. Кроме того, эти водные горизонты часто выходят на поверхность, в виде незамерзающих ключей в устьях притоков, где они пропитывают песчано-гравийные современные отложения.

Было установлено, что эти зоны вторичных изменений на месторождении Хлебопёк приурочены к областям развития площадной коры выветривания в верховьях долины самого ручья Хлебопёк и линейной зоны гётитизации, в образование которых существенный импульс внесло наличие сульфат-ионов, образовавшихся при окислении пиритов. В целом для верховьев водотоков Хлебопёка концентрация сульфат-ионов действительно повышенная и находится в пределах 18–30 мг/дм³, повышаясь, как минимум на порядок в пределах границы коры выветривания и россыпи.

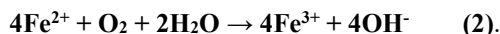
В наших рассуждениях о процессах, приводящих к образованию золота, мы отталкивались от фактов его несомненного наличия в различных минеральных формах, а также от установленных нами фактов перехода пирита в другие формы. Общеизвестно, что реакция окисления пирита в природных условиях с его переходом в сульфатные и окисные формы требует наличия свободного кислорода и воды и, как правило, описывается следующими химическими уравнениями, характеризующими две стадии процесса: начальную (1) и конечную (2):

- реакция окисления дисульфида железа (пирита) в его тиосульфат при воздействии кислорода воздуха является классической реакцией окисления полисульфидов [15],



- в свою очередь ион Fe^{2+} окисляется кислородом до Fe^{3+} , который в зависимости от pH может осаждаться в виде окислов железа: гётита (в кислой среде) или

лепидокрокита (в среде, близкой к нейтральной)



Наличие этих двух стадий процесса перехода пирита под воздействием кислорода и воды по схемам 1 и 2 в промежуточные и конечные минеральные формы в виде пирротина, мелантерита, кокимбита, гематита, магнетита нами было зафиксировано при минералогическом анализе геологических образцов Хлебопёка (табл. 2–6):

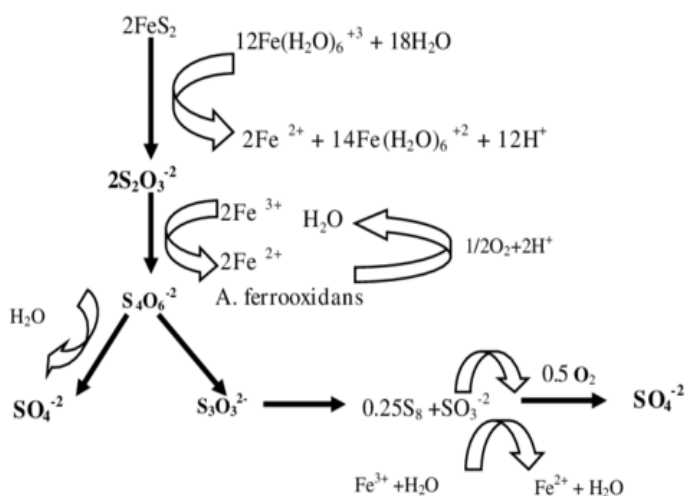
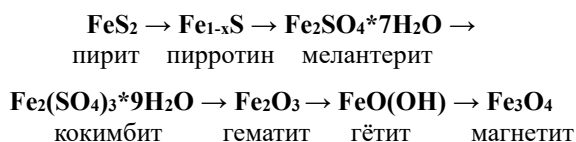


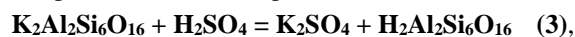
Рис. 3. Схема окисления пирита в природе кислородом воздуха в водной среде.
[Fig. 3. Diagram of pyrite oxidation in nature by atmospheric oxygen in an aqueous environment.]

Образование тиосульфата железа (FeSO_3S) представляется ключевым моментом в цепи превращений соединений золота. С его образованием начинается природное выщелачивание золота, причём, как его поливалентных форм, так и нольвалентной формы. Общеизвестно, что в присутствии тиосульфатных ионов и кислорода воздуха из химических соединений золота и его мелких самородных частичек образуются растворимые в воде тиосульфатные комплексы золота, покидающие разрушаемую механическим дроблением матрицу горной породы. Ещё более интенсивно этот процесс (в десятки раз быстрее) растворения происходит при наличии сульфата меди CuSO_4 , служащего хорошим катализатором [17]. Наличие минерала халькантита $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ на Хлебопёке нами установлено.

Однако деградация пирита на этом не останавливается. Освободившийся при гидролизе тиосульфата железа ион двухвалентного железа, как и продукты дальнейшего окисления серы (сульфиты), являются восстановителями для солей золота. Образующийся **сульфит-ион** SO_3^{2-} является очень сильным восстановителем. Он восстанавливает золото в водных растворах из любых его соединений [17, 18] и приводит к выпадению золота, уже в виде коллоидных форм. А в виде коллоидных частиц, когда их возможная концентрация на много

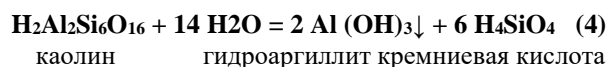
порядков превышает концентрацию ионных форм, золото может транспортироваться на значительные расстояния, вплоть до достижения благоприятных условий, в которых возможна их сверхвысокая концентрация и дальнейшая их флокуляция. Или уйти в Мировой океан, в виде «коллоидной пыли», или даже намного более крупного, чем коллоидные частицы - «плывущего золота», при недостаточной массе осаждающих коллоиды реагентов и ёмкости природных ловушек.

Кроме того, сам процесс выделения серной кислоты при окислении пирита запускает процесс образования и других сильных и слабых кислот (см ниже – реакции (3) и (4)), а также – образование растворимых щелочных соединений серной кислоты, кремниевой и других кислот. И, как следствие – возникновение кислотно-щелочных барьеров, способствующих как осаждению, так и растворению, и миграции большого количества металлов. Например, процесс преобразования ортоклаза в каолин, наличие которого практически всегда отмечается в составе кристаллических сланцев из гале-эфельных отвалов, происходит по такой схеме:

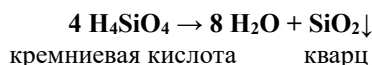


а каолина в минеральные формы гидроокиси алюминия (бёмит, гидроаргиллит, диаспор), водные растворы которых представляют собой студенистые гели,

состоящие из листоватых коллоидных частиц, которые могут задерживать коллоидные частицы золота, совместно с другими минералами, в природных ловушках:



Гели кремниевой кислоты, теряя воду, становятся более концентрированными и, наконец, разлагаются по схеме:



в виде сфероидов, или аморфных масс. При их повышенной концентрации в природных ловушках они способны улавливать коллоидные частицы золота. Ещё Н. В. Петровская [6, на стр.13] ссылаясь на успешные эксперименты сорбции золота гелями кремниевой кислоты.

Содержания кремния в водах водотоков Хлебопёка колеблются от 2.991 мг/л до 3.311 мг/л, повышаясь до 9.856 мг/л в озерах «мёртвой зоны», вплотную подходя к нижнему уровню ПДК его в воде. Поэтому мы предполагаем, что на поверхностных слоях кварцевых галек образуется плёнка геля кремниевой кислоты, и к этому слою прилипают коллоидные частицы золота, что ошибочно, в большинстве случаев, принималось за доказательство наличия «рудного» золота как источника образования россыпей, по крайней мере, на Хлебопёке. На самом деле, сростки золота с кварцем, часто имеют такой характер срастания друг с другом, что при малейшей транспортировке такого агрегата в водном потоке кварц и золото отделились бы друг от друга. Иначе бы золото не образовывало бы длинные, остроконечные образования, далеко выступающие за пределы кварцевых частиц (рис. 4).



Рис. 4. Месторождение Хлебопёк. Самородок «Рождение дракончика». Гравийная частица скрытокристаллического кварца со слоем наростшего на неё золота. 4-й приток.

[Fig. 4. The Khlebopek deposit. "Birth of a little dragon" nugget. The gravel particle of hidden crystalline quartz with a layer of gold grown on it. 4th tributary.]

Наличие мельчайших частиц золота, постоянно наблюдаемое в бинокулярный и электронный микроскопы, и ещё более мелких наночастиц фиксируемых

рамановским методом на поверхности значительно более крупных частиц золота, также хорошо объясняется разобранным выше химизмом реакций. Растворение частичек Au, происходящее при окислительном процессе, при изменении его на восстановительный режим вновь заставляет переходить Au в ионные формы и, вновь, в «нольвалентные» формы в виде золей и гелей. Таким образом, запускается процесс укрупнения самородного золота, поскольку скорость процесса растворения и осаждения золота пропорциональна площади контакта его частичек со средой, а удельная поверхность малых частичек золота больше, чем крупных, и с каждым актом растворения эта поверхность уменьшается значительно быстрее, чем у крупных частиц. Осаждение золота на маленьких частицах с каждым актом происходит на всё более малых площадях. Происходит перераспределение золота и осаждение малых коллоидных частичек Au на крупные частицы. Исходя из приведённых представлений, даже такой химически стойкий металл, как золото, и куда менее стойкие его соединения, попадая в зону окисления пирита, не только могут, но и будут преобразовываться из его химических соединений, осаждаться в виде коллоидных растворов и укрупняться при наличии благоприятных условий.

Возможно, этому процессу также способствует повышенное содержание ртути в породах, фиксируемое по наличию фаз Au 0.75 Hg 0.25 (табл. 2, 5, 7).

Одним из необходимых условий прохождения химических реакций не только для окисления пирита, но и для выпадения золота, на которое мы обратили внимание, стало обязательное наличие воды. От её наличия, хотя бы в стехиометрических количествах, зависит скорость прохождения химических реакций. Очевидно, что насыщенность водой русловых отложений выше, чем в склоновых фациях коры выветривания. Условия осаждения коллоидных частиц золота в русловых фациях в целом будут благоприятнее, чем в менее обводнённых склоновых фациях кор выветривания.

Естественно, в более дезинтегрированных породах в руслах водотоков, многие химические процессы начинают протекать быстрее. Не только из-за того, что увеличивается площадь контактирующих поверхностей раздела фаз, но и из-за того, что мельчайшие фракции пирита, а это нами установлено, в промываемой песчано-глинистой смеси, отбираемой из русел, начинают превалировать в количественном отношении над крупными его разностями. А они окисляются намного быстрее крупных его фракций. Процессы изменения концентрации растворённых в воде химических соединений интенсифицируются не только процессами химического выветривания, но и так называемыми морозобойными явлениями, активно протекающими в районе в течение всего голоцена. Так как даже в течение суток может происходить многократное изменение давления и концентраций любых солей, в том числе и золота. В результате сочетания процессов химического и физического выветривания, и возникающих при этом наложенных процессов преобразования кристалличес-

ких сланцев, содержащих в своём составе минеральные формы золота, возникает образование обломочно-песчано-глинистой смеси склоновых фаций кор выветривания. Ещё более убыстряются эти процессы после поступления материала кор выветривания в речные долины, где они начинают перерабатываться в русловые фации. И становится очевидным, что в русловых фациях могут возникнуть совсем уже благоприятные условия и для начала формирования «ноль-валентного» золота из других коллоидных его минеральных форм, вплоть до роста самородков. Так как в коренных породах условия для роста до размеров самородков просто отсутствуют [19, 20].

После анализа полученных данных модель образования крупного россыпного золота на Хлебопёке приобрела некие граничные контуры. Первоначально существовавшие представления о генетической связи триады мельчайших форм его минеральных соединений, находящиеся в породах кристаллических сланцев, рудного золота из каких-то не обнаруженных источников, и значительно более крупного золота россыпей не подтвердились. Стало очевидным, что на россыпном месторождении Хлебопёк одновременно существуют следующие формы золота:

Многовалентные, химически связанные кристаллические фазы Au в кристаллических сланцах → золи и гели «нольвалентного» Au в корах выветривания и аллювии → плывущее золото в аллювии → самородное золото в аллювии.

Сформировалось представление, что именно в корах выветривания на склонах сопков, дренируемых водотоками, начинают возникать условия для начальных преобразований минеральных (многовалентных) форм золота в его «нольвалентные» золи и гели. Кору выветривания, в этом случае, служат в качестве своеобразного родильных домов, в которых, в основном, зарождаются и формируются «зародышевые формы» для последующего формирования уже других по составу и размерностям форм золота при переработке коры выветривания в аллювиальные фации. В аллювиальных фациях уже и происходят основные преобразования субмикронных форм золота. Золото, при сочетании комплекса благоприятных условий, может концентрироваться в локальных ловушках, особенно с концентрацией в тыловых частях этих ловушек гидрогелей Fe, Al, Si на отдельных участках, даже небольших по протяжённости водотоков, где возможен и рост самородков.

Таким образом, определилась зона зарождения «нольвалентного» золота, представленная поверхностным слоем площадной коры выветривания, и зона его возможного дальнейшего роста в условиях переработки кор выветривания аллювиальными процессами. По сути, обе эти зоны составляют две части единого и неделимого минералого-геохимического, чётко отлаженного природой механизма образования «самородного» золота в экзогенных условиях.

Граничные условия работы такого механизма «кора

выветривания – аллювий» определены верхними частями водотоков, где количество аллювия для добычи ничтожно (верхняя граница), и зоной сплошной цементации аллювия гётитом (нижняя граница), выше которой и концентрируется основная масса добываемого промывкой золота, в том числе и крупных самородков, сменяемых выше по течению притоков более мелким золотом.

В зоне сплошной цементации пород крупного видимого золота ни при разведке, ни при эксплуатации никогда не было отмечено, несмотря на то что все минеральные формы золота представлены его «нольвалентными формами». Это и понятно, так как наличие гётитового цемента базального типа, хотя и свидетельствовало о том, что реакция осаждения «нольвалентного» золота уже прошла, но при этом поры пород стали хуже проницаемыми для прохождения водных растворов, содержащих коллоидные и более крупные частицы золота. Да и возможности роста в порах, заполненных базальным цементом, ограничены, хотя и существуют, но уже сильно стеснены.

Промежуточные области в граничных условиях, где происходила максимальная концентрация наиболее удобно извлекаемого гравитационным способом золота были определены уже при первичной разведке и эксплуатации.

Действительно, наиболее крупное золото в притоках Хлебопёка чаще всего концентрируется в относительной близости (не более 200–300 метров), вверх по течению, от границы с зоной сплошной цементации аллювия ручья Хлебопёка гидроокислами железа и аморфного кварца (своеобразной плотины), затрудняющей вынос частиц коллоидного золота. Выше по течению от этого барьера, в зонах ещё достаточно проницаемых для прохождения не только коллоидных частиц, но и их коагулянтов и происходит основная концентрация уже «видимого» золота, в локальных участках этих зон, благоприятных для «улавливания» таких частиц в природных ловушках (второго порядка). Эти проницаемые для растворов породы должны быть хотя бы снизу ограничены непроницаемыми для растворов породами, иначе произойдёт растаскивание коллоидных частиц по объёму пород, и их агрегация замедлится. Как правило, такими ограничителями служат горизонты глинистых пород. В эти глинистые горизонты никогда не наблюдалась глубокая «просадка» крупного и среднего золота. В этом отношении они являются пустыми для промприборов. А вот области контактов вблизи располагающихся выше по течению от зоны сплошной гётитовой цементации, в зонах частичной (пятнистой) гётитизации, дают наибольшее количество крупных самородков. Выше по течению от зоны «концентрации самородков» размерность частиц золота, в целом, уменьшается и частота находок самородков резко падает. Всё это происходит на относительно небольшом расстоянии (не более 1–1.5 км), ограниченном длиной притока.

Зоны различной повышенной проницаемости и ложные плотины, которых в приустьевых частях может

быть несколько, легко диагностируются в боковых частях горных выработок и прослеживаются по бортовым частям нарезаемых блоков.

Наиболее благоприятные участки для осаждения золота легко фиксируются в разрезе по наличию крупных пятен окислов железа в пористых породах, указывающих на то, что реакция осаждения золота хотя и произошла, но ещё не закупорила поры песков, превратив их в песчаник, который в ручье Хлебопёк образует для притоков ловушку первого порядка. И эта ловушка и различные типы геологических ловушек более высоких порядков, во множестве создаваемые природой, формируют некую градиентную зону, в которой приток воды стабилизируется до некоего оптимального уровня, способствующего концентрации и флокуляции

в этих ловушках коллоидных частиц золота.

Последующий механизм преобразования сгустков рыхлых коллоидных частиц Au в ловушках с преобразованием их в привычное нам золото давно известно в коллоидной химии по схеме: истинный раствор – золь – гель – ксерогель (метаколлоид) (рис. 5).

Процесс этот может быть очень быстрым. Согласно нашим исследованиям, процесс «самосборки» коллоидных частиц Au, в водонасыщенной среде, в уже гравитационно извлекаемые формы, занимает часы, или первые десятки часов, а не годы, а, тем более, миллионы лет. Один из таких примеров резкого увеличения наноразмерных частиц в сотни тысяч раз за несколько циклов замораживания-размораживания демонстрируется, в проведённом нами опыте на рис. 6.

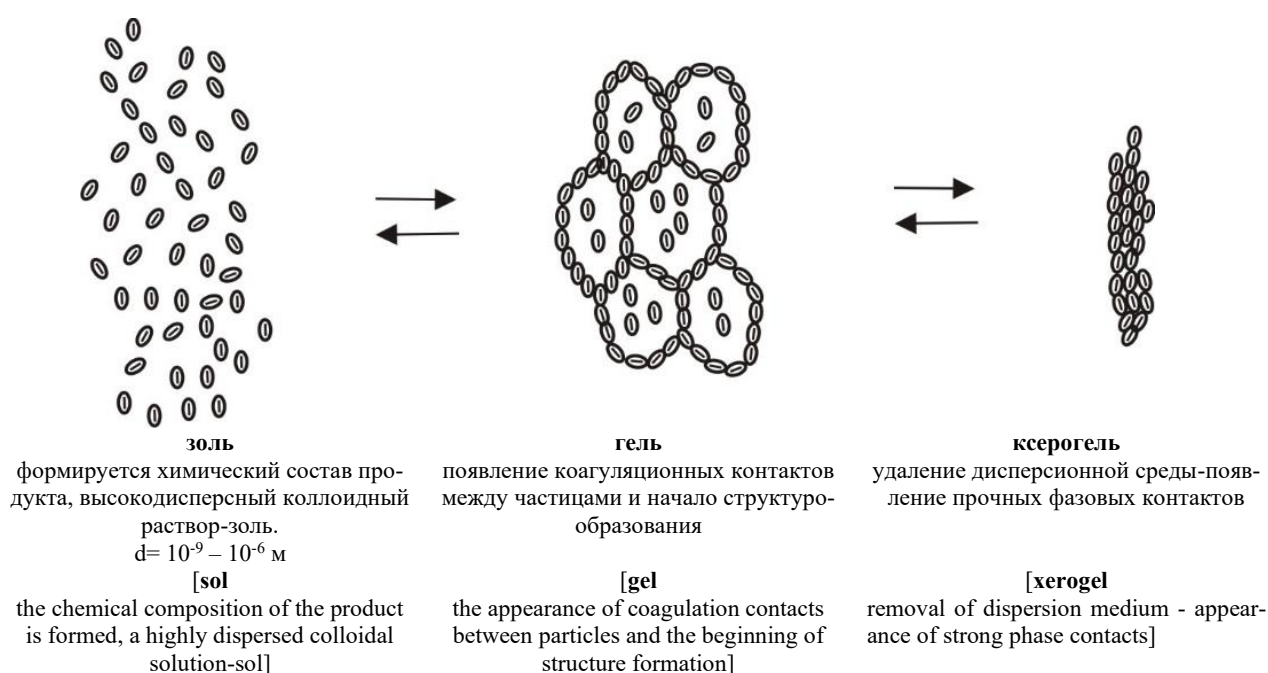


Рис. 5. Стадии перехода золь-гелевых структур в пластинчатые формы ксерогеля, реализующиеся в природе, например, в зонах развития криогенных процессов, или аридных и субаридных климатических зонах.

[Fig. 5. Transition stages of sol-gel structures into lamellar forms of xerogel, occurring in nature, for example, in the zones of development of cryogenic processes or in arid and subarid climatic zones.]

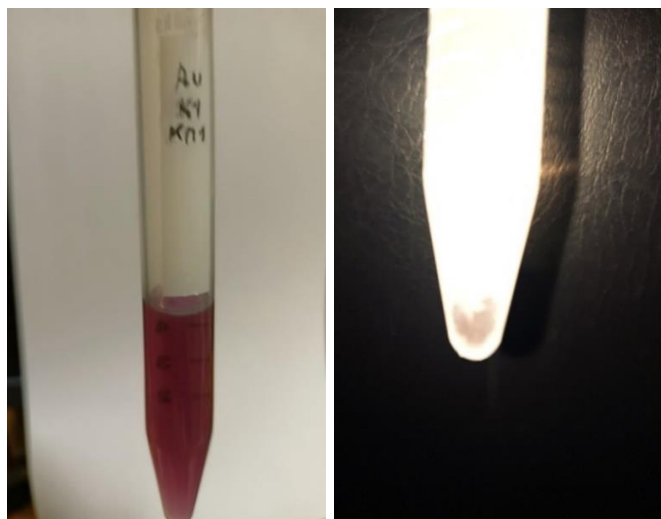


Рис. 6. Слева-пробирка с коллоидным золотом (размеры частиц 15–20 нанометров). Справа – та же пробирка после её заморозки и образования мелкого уплотнённого самородка размером 4–5 мм.

[Fig. 6. On the left is a test tube with colloidal gold (particle sizes 15–20 nanometers). On the right is the same test tube after its freezing and the formation of a small flattened nugget of 4–5 mm in size.]

Рудная ловушка первого порядка, представленная протяжённой линейной зоной базальной гётитизации современного аллювия, не обязательно должна быть представлена зоной сплошной цементации песков водотоков этим минералом. Например, для россыпей Карийского рудно-россыпного района [12] её успешно заменяет зона сплошной или частично смешанной с гётитом цементации песчано-глинистой массы современных водотоков аморфным кварцем. На Хлебопёке развития таких зон сплошной цементации современного аллювия только аморфным кварцем отмечено не было. Развитие таких зон цементации русловых отложений аморфным кварцем отмечено лишь на локальных участках и только совместно с гётитом, гидроокислами железа и (реже) баритом и флюоритом, которые являются минералами-спутниками процесса «самосборки» Au.

Ёмкость ловушек первого и более высокого порядка не безгранична, так как золото является не основным материалом, попадающим в них. Туда попадает и множество других минералов из состава разрушаемых кристаллических сланцев, имеющих повышенную плотность (пирит, циркон, вольфрамит, ильменит и пр.). Там же могут возникать и вторичные минералы: гематит, барит и пр., неоднократно фиксируемых нами в ходе изучения различного рода концентратов. При переполнении ловушек и коллоидные частицы и, даже, «плавучее золото», не смогут в них задерживаться и будут мигрировать далее вниз по течению.

Выводы

В ходе проведённых исследований, было обосновано, что существующие представления, о ведущей роли в образовании россыпей механической сортировки при перемещении «рудного» золота в водных потоках, достоверные формы которого, так и не были найдены, для притоков рек Бодайбинского района, где и в настоящее время и ведётся основная добыча россыпного золота, считаем сильно преувеличенными и, по сути, процессами вторичными.

Основным же фактором образования россыпей в притоках являются химические процессы, способствующие растворению химически связанных минеральных форм Au и последующему осаждению его коллоидных форм, и наличию природных ловушек различной ёмкости. И лишь в руслах больших водотоков механические процессы перемещения материалов россыпей могут начать превалировать над химическими. Так как концентрации тиосульфатов и сульфитов, способствующих растворению соединений золота и его осаждению в «нольвалентных» формах, в более крупных водотоках неизбежно начнут понижаться. Превалирующее значение в образовании россыпей уже начнут приобретать геолого-геоморфологические факторы. Тем не менее, основная часть золота, Петровская Н.В. [5, стр. 300–301] будет поступать в Мировой океан. Повышение КПД извлечения золота из золотосодержащих материнских пород

очевидно лежит не в области совершенствования цианидных схем выщелачивания, которые, как и амальгамные, морально устарели, а в области совершенствования конструкций природных ловушек.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавёров А. П., Дистлер В. В., Прокофьев В. Ю., Юдовская М. А. Новые данные об условиях рудообразования флюидов золотоплатинового месторождения Сухой Лог // *Доклады РАН*. 2000. Т. 371. № 1. С. 86–92
2. Иванов А. И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014. 215 с.
3. Онищенко С. А., Сокина Н. В. Особенности формирования золоторудного черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // *Записки Российского Минералогического Общества*. 2021. Ч. CL. № 1. С. 63–73
4. Таусон В. Л., Немеров В. К., Развозжаева Э. А., Спиридонов А. М., Липко С. В., Будяк А. Е. Парагенетические отношения пирита углерода и золота на месторождении Сухой Лог и типоморфизации поверхности пирита // *ДАН*. 2009. Т. 426. № 4. С. 529–532
5. Петровская Н. В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 332 с.
6. 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
7. Шилов Н. А. Учение о россыпях. Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. Москва, 1981. 383 с.
8. Сахно В. Г., Кузнецов Ю. А. Платиноиды золотосеребряных месторождений и рудопроявлений Охотско-Чукотского и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенно-плутонических комплексов. «Геология минеральные ресурсы северо-востока России»: материалы X Всероссийской конференции Якутск, 2020. С. 285–290
9. Жабин А. В., Кузнецов Ю. А., Дубков А. А. К вопросу о применении рентгеноструктурного и энерго-дисперсионного анализов для обнаружения платиноидной и ренийевой минерализации на золоторудных проявлениях (на примере золото-сульфидных месторождений Центрального Сихотэ-Алия Приморского края) // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2021. Вып. 104. С. 30–38
10. Сахно В. Г., Жабин А. В., Кузнецов Ю. А., Дубков А. А. О находках элементов платиновой группы, драгоценных и редких металлов в породах баженновской свиты (Западная Сибирь), и сравнение их с известными рудными объектами Северо-востока РФ // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2020. Вып. 101. С. 79–89
11. Жабин А. В., Золотарева Г. С., Кузнецов Ю. А., Дубков А. А. Импациты в четвертичных отложениях Воронежской антеклизы // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2020. Вып. 102. С. 39–52
12. Дубков А. А., Жабин А. В., Калинин В. Н., Кузнецов Ю. А. Исследование благороднометалльной минерализации пород кор выветривания Карийского рудного поля методами рентгенофазовой дифракции и электронной микроскопии (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ) // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2023. Вып. 110. С. 12–24
13. Кузнецов Ю. А., Дубков А. А., Калинин В. Н., Жабин А. В., Варфоломеев С. Д. Исследования микроформ кристал-

лических соединений благородных металлов в золоторудных месторождениях Евразии // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2023. Вып. 111. С. 27–37

14. 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

15. Новгородова М. И. Метаколлоидное золото // *Новые данные о минералах*. 2005. Вып № 40. С. 106–114

16. Нургил Балчи, Уэйн С. Nurgul B., Bernhard M., Wayne C., Shanks I., Kevin W. Oxygen and sulfur isotope systematics of sulfate produced during abiotic and bacterial oxidation of sphalerite and elemental sulfur Author links open overlay panel // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. Vol. 7. P. 3297–3311

17. Гудков А. С. Извлечение золота из упорного сульфидного сырья с применением автоклавного окисления серосодержащих растворителей: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Иркутск: 2010. 19 с.

18. Золото. Осаждение золота сернистым ангидридом. Справочник химика. Химия и химическая технология. С. 392, 419.

19. 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

20. 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

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)

©2024 Yu. A. Kuznetsov^{1✉}, V. P. Griбанov¹, S. D. Varfolomeev²,
V. N. Kalinichenko², A. A. Dubkov³, A. A. Gulin⁴, A. V. Zhabin⁵, G. S. Zolotareva⁵

¹ *ООО "RG Irkutskgeofizika" 9a Klary Zetkin ul., 664039, Irkutsk, Russian Federation*

² *IBHF RAS 4 Kosygina ul., 119334, Moscow, Russian Federation*

³ *FGBU VNIGNI 36 Sh. Entuziastov str., 105118, Moscow, Russian Federation*

⁴ *FIC XV RAS, 36 Sh. Entuziastov, 105118 Moscow, Russian Federation*

⁵ *FGBOU VO "Voronezh State University", 1 Universitetskaya pl.,*

394 018, Voronezh, Russian Federation

Abstract

Introduction: The practice of gold mining operations shows that a significant part of metal is left in tails. There are two main reasons for that. First of all, a considerable mass of gold and other accompanying metals are found in the rocks in the form of compounds with oxygen, sulphur, arsenic, iodine, and other elements. Second, the particles of these compounds are found in the form of nano and micro-dimensions, which excludes or significantly hinders their extraction using traditional methods. However, if needed, it is possible to track the transformation paths of noble elements from the source of initial position to placers through intermediate areas, combining production and financial capabilities of production organisations and modern hardware research methods. The Khlebopek placer gold deposit, located in the Bodaibo district of the Irkutsk region, can serve as the most successful example of considering this series of transformations.

The geological structure of the Bodaibo district has been sufficiently described in many works. In particular, the mineralogical and geochemical features of the gold deposits in the district and the typomorphic features of ore gold, pyrites [1–4], etc., were described in detail. Fewer works have been devoted to studying the specific features of changes in the mineral composition of placer deposits in the district [5–6]. In particular, only one work was dedicated to the Khlebopek deposit [6]. The Khlebopek placer deposit is geographically located about 30 km to the south of the giant ore deposit Sukhoy Log. The Khlebopek stream is a stream of water of about 15 km long. Its tributaries are no longer than 2–2.5 km. They drain strata of carbonaceous shales of Vendian-Riphean age (carbonaceous siltstones, phyllites, sandstones with thin carbonate sublayers), which were subject to regional metamorphism between 520–570 million years.

Research methodology: The elemental compositions of bedrock, weathering crusts, placers and gale-lixiviation dumps were studied using X-ray fluorescent units: ARL Perform'x (Switzerland); Shimadzu (Japan); Vega 400 (Israel). The presence of significant contents of gold and platinoids (more than 1–5 g/t) was confirmed (and verified by an assay test and mass spectrometry) for dozens of studied samples selected from the larger part of the site. The presence of colloid particles of gold in the water of the tributaries and the stream was proved by Raman spectroscopy (RamanStation 400F).

Discussion of results: Using electron microscopy and X-ray diffractometry, we studied samples of crystalline schists, sand-clay stream deposits of tributaries of the Khlebopek stream, and the morphology of gold at the placer deposit of the same name. The detailed structure, elemental composition, and



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Yuri A. Kuznetsov, e-mail: tundra49@mail.ru

composition of the crystalline phases of the corresponding rocks were examined. We came to the conclusion on the leading role of chemical processes that contribute to the release of mineral phases of gold from rocks and their further transformation into colloidal forms and, subsequently, into coarse nugget-type gold.

Conclusion: processes of transformation of mineral forms of gold in the hypergenesis zone, contributing to their transition to colloidal forms and the deposition of metals in zero valence form.

Keywords: Bakery deposit, Bodaibinsky district, mineral forms of Au, colloidal gold, nuggets.

For citation: Kuznetsov Yu. A., Gribanov V. P., Varfolomeev S. D., Kalinichenko V. N., Dubkov A. A., Gulina A. A., Zhabin A. V., Zolotareva G. S. 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. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/32-48>

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

REFERENCES

1. Laverov A. P., Distler V. V., Prokofiev V. Yu., Yudovskaya M. A. Novye dannye ob usloviyakh rudoobrazovaniya flyuidov zolotoplatinovogo mestorozhdeniya Suhoj Log [New data on the conditions of ore formation of fluids of the Sukhoi Log gold-platinum deposit]. *Doklady RAN – Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2000, vol. 371, no. 1, pp. 86–92 (In Russ.)
2. Ivanov A. I. *Zoloto Bajkalo-Patoma (geologiya, orudenenie, perspektivy)* [Gold of Baikal-Patom (geology, mineralization, prospects)]. Moscow, FSUE TsNIGRI publ., 2014, 215 p. (In Russ.)
3. Onishchenko S. A., Sokerina N. V. Osobennosti formirovaniya zolotorudnogo chernoslanecovogo mestorozhdeniya Golec Vysochajshij (Vostochnaya Sibir') [Features of the formation of the gold ore black shale deposit Golets Vysochaishy (Eastern Siberia)]. *Zapiski Rossijskogo Mineralogicheskogo Obshchestva – Notes of the Russian Mineralogical Society*, 2021, vol. CL, no. 1, pp. 63–73 (In Russ.)
4. Tauson V. L., Nemerov V. K., Razvozhayeva E. A., Spiridonov A. M., Lipko S. V., Budyak A. E. Parageneticheskie otnosheniya pirita ugleroda i zolota na mestorozhdenii Suhoj Log i tipomorfizatsii poverhnosti pirita [Paragenetic relationships of pyrite carbon and gold at the Sukhoi Log deposit and surface typomorphization pyrite]. *Doklady RAN – Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 426, no. 4, pp. 529–532 (In Russ.)
5. Petrovskaya N. V. *Samorodnoe zoloto* [Native gold]. Moscow, Nauka publ., 1973, 332 p. (In Russ.)
6. Dubkov A. A., Zhabin A. V., Kuznetsov Yu. A., Gribanov V. N., Kalinichenko V. N., Gulina A. A. Issledovaniya mineral'nogo sostava rossypnogo mestorozhdeniya Hlebopyok (Bodajbinskij rajon irkutskoj oblasti) [Studies of the mineral composition of the Khlebopek placer deposit (Bodaybinsky district of the Irkutsk region)]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian regions*, 2023, no. 109, pp. 20–29 (In Russ.)
7. Shilo N. A. *Uchenie o rossypyah. Teoriya rossy-peobrazuyushchih rudnyh formacij i rossypej* [The doctrine of placers. Theory of placer-forming ore formations and placers]. Moscow publ., 1981, 383 p. (In Russ.)
8. Sakhno V. G., Kuznecov Ju. A. Platinoidy zolotoserebrjanyh mestorozhdenij i rudoprojavlenij Ohotsko-Chukotskogo i Vostochno-Sihotje-Alinskogo vulkanogenno-plutonicheskikh kompleksov [Platinoids of gold-silver deposits and ore occurrences of the Okhotsk-Chukotka and East Sikhote-Alin volcanogenic-plutonic complexes]. *Geologija mineral'nye resursy severo-vostoka Rossii: materialy H Vserossijskoj konferencii Jakutsk*, [Geology and mineral resources of the northeast of Russia: materials of the X All-Russian conference]. Yakutsk publ., 2020, pp. 285–290 (In Russ.)
9. Zhabin A. V., Kuznetsov Yu. A., Dubkov A. A. K voprosu o primenении rentgenostrukturnogo i energo-dispersionnogo analizov dlya obnaruzheniya platinoidnoj i renievoj mineralizatsii na zolotorudnyh proyavleniyah (na primere zolotosul'fidnyh mestorozhdenij Central'nogo Sihote-Alinya Primorskogo kraja) [On the issue of using X-ray diffraction and energy dispersive analyzes to detect platinum and rhenium mineralization in gold ore occurrences (on the example of gold sulfide deposits of the Central Sikhote-Alin, Primorsky Krai)]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian regions*, 2021, no. 104, pp. 30–38 (In Russ.)
10. Sakhno V. G., Zhabin A. V., Kuznetsov Yu. A., Dubkov A. A. O nahodkah elementov platinovoj gruppy, dragocennyh i redkih metallov v porodah bazhenovskoj svity (Zapadnaya Sibir'), i sravnenie ih s izvestnymi rudnymi ob'ektami Severo-vostoka RF [On the finds of platinum group elements, precious and rare metals in the rocks of the Bazhenov Formation (Western Siberia), and their comparison with known ore deposits objects of the North-East of the Russian Federation]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian regions*, 2020, no. 101, pp. 79–89 (In Russ.)
11. Zhabin A. V., Zolotareva G. S., Kuznetsov Yu. A., Dubkov A. A. Impaktity v chetvertichnyh otlozheniyah Voronezhskoj anteklizy [Impactites in Quaternary deposits of the Voronezh antecline]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian regions*, 2020, no. 102, pp. 39–52 (In Russ.)
12. Dubkov A. A., Zhabin A. V., Kalinichenko V. N., Kuznetsov Yu. A. Issledovanie blagorodnometal'noj mineralizatsii porod kor vyvetrivanija Karijskogo rudnogo polya metodami rentgenofazovoj difrakcii i elektronnoj mikroskopii (VOSTOCHNOE ZABAJKAL'E) [Study of noble metal mineralization of weathering crust rocks of the Carian ore field using X-ray diffraction and electron microscopy (EASTERN TRANSBAIKALIA)]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian regions*, 2023, no. 110, pp. 12–24 (In Russ.)
13. Kuznetsov Yu. A., Dubkov A. A., Kalinichenko V. N., Zhabin A. V., Varfolomeev S. D. Issledovaniya mikroform kristallicheskikh soedinenij blagorodnyh metallov v zolotorudnyh mestorozhdeniyah Evrazii [Studies of microforms of crystalline compounds of noble metals in gold deposits of Eurasia]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian regions*, 2023, no. 111, pp. 27–37 (In Russ.)
14. Nenakhova E. V., Sakhno V. G., Kalashnikov Yu. D., Nenakhov V. M., Kuznetsov Yu. A. Samosborka nanodispersnyh form platinoidov kak metod ih izvlecheniya na primere

zolotoserebryanyh rud Milogradovskogo proyavleniya (Primorskij kraj) [Self-assembly of nanodispersed forms of platinoids 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*, 2018, no. 4, pp. 102–106 (In Russ.)

15. Novgorodova M. I. Metakolloidnoe zoloto [Metacolloidal gold]. *Novye dannye o mineralah – New data on minerals*, 2005, no. 40, pp. 106–114 (In Russ.)

16. Nurgul B., Bernhard M., Wayne C., Shanks I., Kevin W. Oxygen and sulfur isotope systematics of sulfate produced during abiotic and bacterial oxidation of sphalerite and elemental sulfur. Author links open overlay panel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, vol. 7, pp. 3297–3311

17. Gudkov A. S. *Izvlechenie zolota iz upornogo sul'fidnogo syr'ya s primeneniem avtoklavnoho okisleniya serosoderzhashchih rastvoritelej*: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Extraction of gold from refractory sulfide raw materials using autoclave oxidation of sulfur-containing solvents. Abstract of PhD diss.].

Irkutsk publ., 2010, 19 p. (In Russ.)

18. *Zoloto. Osazhdenie zolota sernistym angidridom* [Gold. Precipitation of gold by sulfur dioxide]. *Spravochnik himika. Himiya i himicheskaja tehnologija* [Chemist's Handbook. Chemistry and chemical technology]. 392 p., 419p. (In Russ.)

19. 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.)

20. 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.)

Кузнецов Юрий Александрович, ген. директор ООО РГ «Иркутскгеофизика», Иркутск, Российская Федерация; e-mail: tundra49@mail.ru; ORCID 0000-0003-1162-1024

Грибанов Виктор Петрович, участ. геолог ООО РГ «Иркутскгеофизика», Иркутск, Российская Федерация; e-mail: wik@yandex.ru; ORCID 0009-0003-4790-8702

Дубков Александр Алексеевич, ст. специалист ФГБУ «ВНИИГНИ», Москва, Российская Федерация; e-mail: dubston@mail.ru; ORCID 0000-0002-1871-9713

Калининченко Валерий Николаевич, зав. лабораторией ИБХН РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: kalinval47@mail.ru; ORCID 00000002-5440-8648

Варфоломеев Сергей Дмитриевич, науч. руководитель ИБХФ РАН, член-корр. РАН, профессор, ИБХФ РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: ibcp@sky.chph.ras.ru, golan@sky.chph.ras.ru, ORCID 0000-0003-2793-0710

Гулин Александр Алексеевич, ст. специалист ФИЦ ХФ РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: aleksandr.gulin@phystech.edu, ORCID 0000-0001-7117-4276

Жабин Александр Васильевич, к.г.м.н., доцент Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: zhabin@geol.vsu.ru, ORCID 0000-0002-4690-676X

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.

Yuri A. Kuznetsov General Director of RG Irkutskgeofizika LLC, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: tundra49@mail.ru; ORCID 0000-0003-1162-1024

Viktor P. Gribov, Local geologist of RG Irkutskgeofizika LLC, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: wik@yandex.ru; ORCID 0009-0003-4790-8702

Alexander A. Dubkov, Senior specialist of the Federal State Budgetary Institution "VNIIGNI", Moscow, Russian Federation; e-mail: dubston@mail.ru; ORCID 0000-0002-1871-9713

Valery N. Kalinichenko, Head of the laboratory of the Institute of Biochemical Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: kalinval47@mail.ru; ORCID 00000002-5440-8648

Sergey D. Varfolomeev, Scientific director of the Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor, Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: ibcp@sky.chph.ras.ru, golan@sky.chph.ras.ru, ORCID 0000-0003-2793-0710

Alexander A. Gulin, Senior specialist of the Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: aleksandr.gulin@phystech.edu, ORCID 0000-0001-7117-4276

Alexandr V. Zhabin, PhD in Geol.-Min., Associate professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: zhabin@geol.vsu.ru, ORCID 0000-0002-4690-676X

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.