ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):128-141
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.775 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_128

ВЛИЯНИЕ ОБЖИГА НА ПРОЦЕСС ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СУБМИКРОННОГО ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД

А.В. Константинова[1], Т.Г. Конарева[1], Н.А. Лаврик[1]

[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия,
e-mail: alexalavrikxx@gmail.com

Аннотация: Рассмотрено выщелачивание ультратонких частиц золота из упорной руды (углеродистые метасоматиты по диоритам) золоторудного месторождения Делькен. Аналитическими исследованиями были выявлены некоторые особенности тестируемой руды: присутствие самородного железа и меди; присутствие углеродистого вещества; нахождение золота только в тонкодисперсных и коллоиднодисперсных формах размером до 5 мкм. В технологических исследованиях были использованы 5 режимов выщелачивания на трех классах крупности: –0,2+0,074; –0,074+0,04; –0,04+0,0. В качестве экспериментальных выщелачивающих растворов были выбраны следующие: цианидный раствор; аммиачно-цианидный раствор; флотент GL3G; раствор тиомочевины; тиосульфат натрия. Исследования проводились параллельно в пробах с предварительным обжигом и без него. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности операции предварительного обжига перед выщелачиванием для упорной руды (углеродистые метасоматиты по диоритам). В результате обжига извлечение золота повысилось в среднем на 31%, а максимум на 56%. Наибольшей степени извлечения удалось добиться в режиме с предварительным обжигом пробы на фракции –0,2+0,074 с использованием следующих регентов: флотент G350 – 79,7% и тиомочевина + H_2SO_4 – 72,6%. Высокие показатели извлечения золота с применением тиокарбомидного выщелачивания, как более экологичная альтернатива цианидам, предпочтительны в качестве проведения дальнейших исследований с целью подбора наиболее эффективных технологических параметров.

Ключевые слова: тонкодисперсные частицы благородных металлов, упорные руды, ультратонкое золото, углеродистые образования, выщелачивание, предварительный обжиг, тиокарбомидный раствор, гидрометаллургия, окисленные руды, цианидное выщелачивание, золото в сульфидах.

Благодарность: Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» ХФИЦ ДВО РАН, финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2025-621.

Для цитирования: *Константинова А. В., Конарева Т. Г., Лаврик Н. А.* Влияние обжига на процесс выщелачивания субмикронного золота из упорных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 128–141. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_128.

Effect of roasting on fine gold recovery from refractory ores

A.V. Konstantinova[1], T.G. Konareva[1], N.A. Lavrik[1]

[1] Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, e-mail: alexalavrikxx@gmail.com

Abstract: The study examines leaching of gold from refractory ore (carbonaceous metasomatites in diorite) from the Delken gold deposit. The analytical tests showed the presence of native iron, copper, carbonaceous material and gold in very fine forms (up to 2 microns). Five leaching methods were tested on three particle size fractions: –0.2+0.074, –0.074+0.04 and –0.04+0.0 mm. The solutions tested were: cyanide, ammonia-cyanide, flotent GL3G, thiourea, and sodium thiosulfate. The tests were carried out both with and without pre-roasting. The test results proved high efficiency of pre-leaching roasting for refractory ore (carbonaceous metasomatites in diorite). The results showed that roasting significantly improved gold extraction, increasing recovery by an average of 31%, and up to 56% in some cases. The best results were achieved with the pre-roasted samples –0.2+0.074 mm in size and with the use of flotent G350 (79.7% recovery) and thiourea + H_2SO_4 (72.6%). Thiourea leaching proved to be a promising and more eco-friendly alternative to cyanide, making it worth further study with a view to selecting the most efficient parameters for this technological process.

Key words: fine particles of noble metals, refractory ores, fine grains of gold, carbonaceous formations, leaching, preliminary roasting, thiocarbamide solution, hydrometallurgy, oxidized ores, cyanide leaching, gold from sulfides.

Acknowledgements: The study was carried out using the resources of the Shared Use Center for Research of Mineral Raw Materials at the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch RAS, supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Contract No. 075-15-2025-621.

For citation: Konstantinova A. V., Konareva T. G., Lavrik N. A. Effect of roasting on fine gold recovery from refractory ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):128-141. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_128.

Введение

Современные методы исследований позволяют выявлять присутствие ультратонких частиц благородных металлов, содержание которых может быть весьма высоким. Как известно, субмикронные частицы золота присутствуют повсеместно в различных типах руд и пород, а также в огромных количествах накоплены в техногенных образованиях. Поэтому важной задачей золотодобывающей отрасли является вовлечение в переработку упорных руд с тонкодисперсными и коллоиднодисперсными частицами ценного компонента. Технологии эффективной переработки упорного сырья с тончайшими частицами золота необходимы как для переработки техногенных запасов, так и для применения на разведываемых месторождениях во избежание потерь подобных форм полезного ископаемого и накопления его в отходах гидрометаллургического производства [1—4].

Наличие в рудах дисперсного золота является одной из главных причин технологической упорности золоторудного сырья. При этом технологическую упорность золотых руд кроме физических причин, связанных с заключением

мельчайших частиц золота в плотной структуре минерала-носителя (углерод, пирит, арсенопирит, кремнистая матрица), обуславливают и химические причины. Присутствие сорбционно-активных компонентов (глины, углистые соединения), наличие пленок на частицах золота (оксиды Fe, хлорид Ag, соединения Sb, Mn, Pb) оказывают отрицательное влияние на гидрометаллургический процесс. Также при цианировании сильными химическими депрессорами являются минералы меди [5].

Стандартные гидрометаллургические технологии для извлечения ультратонких форм золота в основном являются неэффективными по ряду причин, связанных с физико-химическими особенностями таких форм благородных металлов. Повысить степень выщелачивания тонкодисперсного золота из упорных руд позволяет предварительный обжиг минеральной массы [6—8]. Высокая температура, воздействуя на минеральную матрицу, вызывает структурные изменения, благодаря которым повышается эффективность последующего выщелачивания ультратонких форм ценного компонента за счет беспрепятственного доступа выщелачивающих растворов, удаления вредных примесей и увеличения реакционной способности руды [9, 10]. Если золото в руде присутствует в виде включений с сульфидами, обжиг приводит к их окислению, при этом высвобождая золото [11]. При наличии углеродистых и органических примесей в руде обжиг позволяет сжечь эти примеси, обеспечивая более чистую поверхность для контакта с выщелачивающим раствором. Также высокие температуры приводят к изменению структуры руды, что способствует повышению ее пористости и, как следствие, улучшению проникновения выщелачивающих растворов в минеральную массу [12, 13].

Целями данной работы являлись: поиск наиболее эффективного режима извлечения субмикронного золота из упорной руды (углеродистые метасоматиты по диоритам) золоторудного месторождения Делькен, оценка влияния предварительного обжига минеральной массы на выщелачивание золота с использованием различных реагентов.

Характеристика исходного сырья

Исследования проводились на упорных рудах (углеродистые метасоматиты по диоритам) золоторудного месторождения Делькен.

Золоторудное месторождение Делькен располагается в Дальневосточном федеральном округе в левобережной части р. Амур, в его нижнем течении. Площадь месторождения сложена песчаниками, алевролитами, кремнистыми, кремнисто-глинистыми породами. На месторождении выявлено 19 рудных зон и 3 отдельных рудных тела. Проявление углеродистых метасоматитов характеризует рудно-метасоматический профиль полукольцевого штокверка, представляющего один из типов рудоносных зон на месторождении [14]. В настоящее время месторождение находится в стадии разведки и уточнения запасов.

В качестве исходного сырья в работе использовали керновый материал (инженерно-геологическая скважина № 3, интервал 203—205 м). Породы дробились на классы: –0,1+0,5 мм; –0,5+0,2 мм; –0,2+0,1 мм; –0,1+0,074 мм; –0,074+ +0,04 мм; –0,04+0,0 мм для определения вещественного состава, структуры сырья и проведения технологических испытаний. В исходном материале определялось содержание Au, Ag, Fe, Cu, As и органического углерода. Содержание элементов устанавливалось путем различных анализов в образце в каждой фракции. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание элементов в исходном сырье золоторудного месторождения Делькен
Content of elements in the original material of the Delken gold deposit

№	Класс крупности	Содержание элементов					
		Au*, г/т	Ag*, г/т	Cu*, г/т	Fe*, %	Corg**, %	As***, г/т
1	1+0,5	1,38	19,8	5,50	1,98	0,53	1119
2	–0,5+0,2	1,69	9,66	6,62	2,05	0,16	434
3	–0,2+0,1	2,41	25,55	7,24	2,22	0,18	757
4	–0,1+0,074	3,09	4,39	5,38	2,07	0,17	733
5	–0,074+0,04	3,34	21,54	9,97	1,99	0,19	776
6	–0,04+0	5,22	11,39	12,09	2,71	0,49	1913

* атомно-абсорбционный анализ;
** анализ общего органического углерода;
*** рентгенофлуоресцентный анализ.

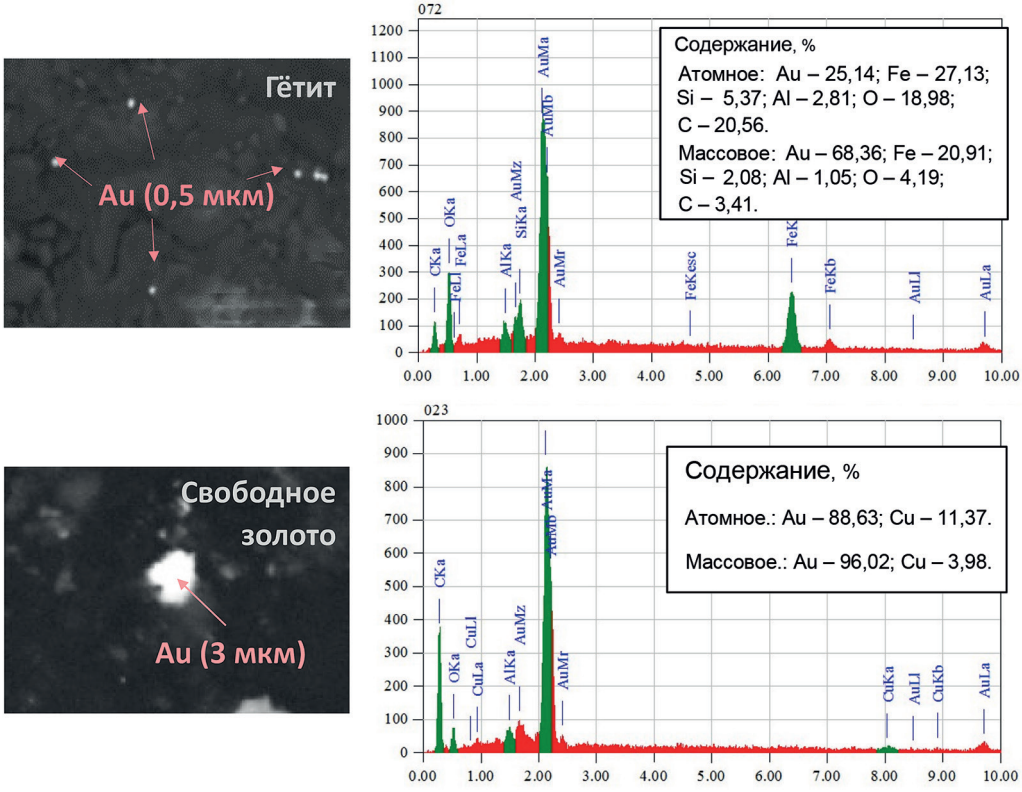

Рис. 1. Микрофотография включений золота (0,5 мкм) в гётите и свободного зерна золота 3 мкм, сделанная с использованием электронного сканирующего микроскопа Jeol-6000 Plus

Fig. 1. Micrographs of gold inclusions (0,5 mkm) in the goethit and free grain 3 mkm, taken using with Jeol-6000 Plus electron scanning microscope

В результате минералогических исследований было выявлено: углеродистые метасоматиты по диоритам имеют тонко-криптозернистую гранобластовую структуру; породы сильно метаморфизированы, большая часть подвержена вторичным изменениям. Проба представлена реликтовыми полевыми шпатами, темноцветами и вторичными минералами — кварцем, хлоритом, оксидами и гидроксидами железа, а также выделениями углеродистого вещества; отмечаются рассеянные зернышки золота размером до 1—5 мкм, которые встречаются в различных минералах, таких как гидроокислы железа, скородит и полевые шпаты; присутствует медь в виде мелких включений до 40 мкм. Содержание золота варьируется от 1,38 до 5,22 г/т в разных классах крупности.

На рис. 1 представлены фотографии микровключений золота (0,5 мкм) в гётите и свободного зерна золота 3 мкм, сделанные с помощью электронного сканирующего микроскопа Jeol-6000 Plus. Содержание меди по результатам химического анализа до 10 г/т [15, 16]. Как известно, в процессе цианирования медь является сильным цианисидом и значительно снижает извлечение золота в продуктивный раствор. Содержание органического углерода невысокое, от

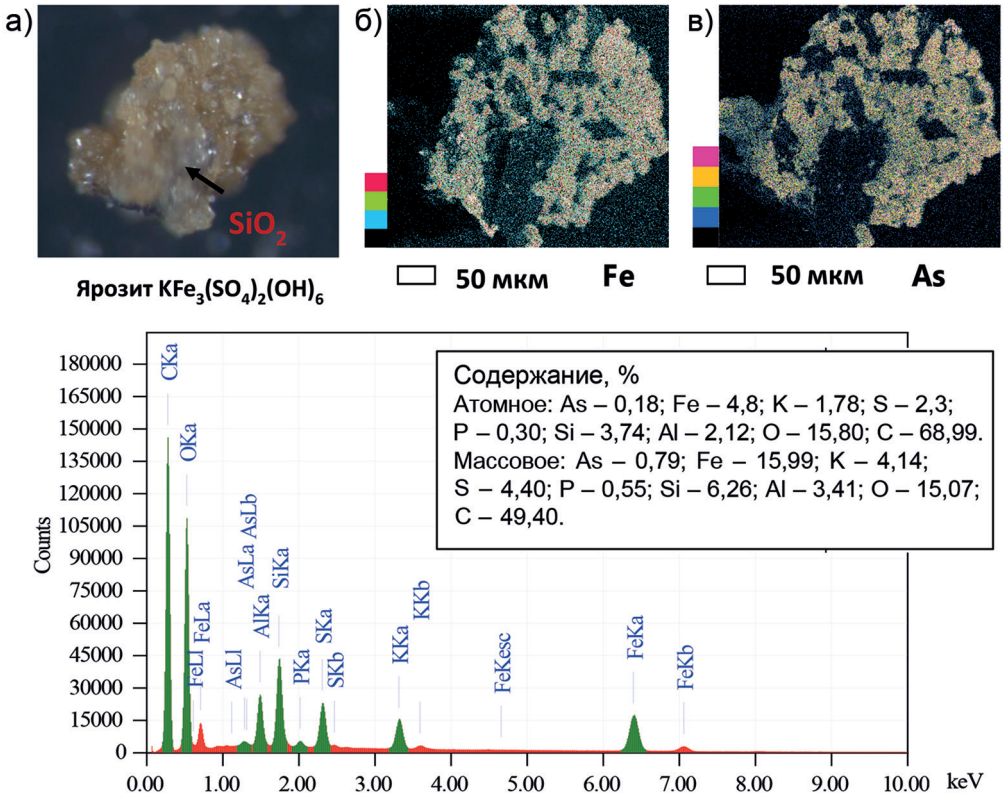

Рис. 2. Фотографии ярозита с включениями кварца: фотография, сделанная с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Discovery V8 (а); фотографии, сделанные с использованием электронного сканирующего микроскопа Jeol-6000 Plus (б, в)

Fig. 2. Photographs of jarosite with quarz inclusions. the photograph, taken using with Carl Zeiss Discovery V8 optical microscope (a); micrographs, taken using with Jeol-6000 Plus electron scanning microscope (b, v)

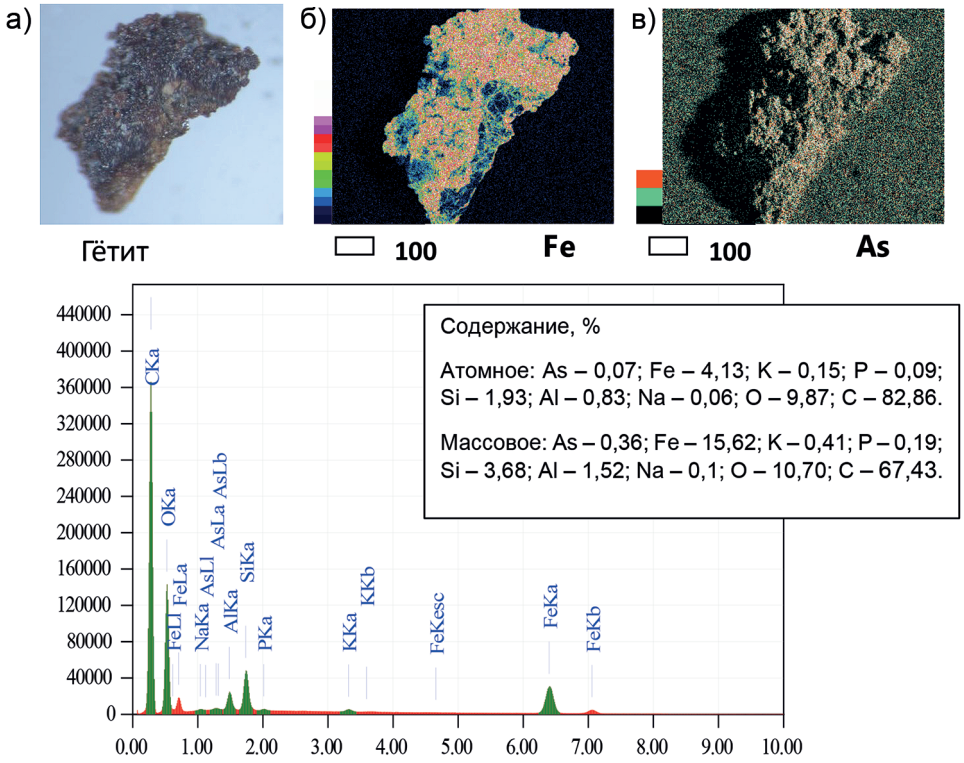

Рис. 3. Фотографии гётита: фотография, сделанная с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Discovery V8 (а); фотографии, сделанные с использованием электронного сканирующего микроскопа Jeol-6000 Plus (б, в)

Fig. 3. Photographs of goethite grain: photograph, taken using with Carl Zeiss Discovery V8 optical microscope (a); micrographs, taken using with Jeol-6000 Plus electron scanning microscope (b, v)

0,16 до 0,53 г/т, однако сорбционно активный углерод может привести к эффекту прег-роббинга. Детальное изучение отдельных зерен показало, что мышьяк в зависимости от степени окисленности перераспределяется между реликтовым мышьяковистым пиритом, ярозитом, реже реликтовым арсенопиритом и скородитом, а также во вторичных минералах в виде гетита и лимонита.

По результатам ренгенофлуоресцентного анализа содержание мышьяка — 600 г/т. Сульфид мышьяка в пробе присутствует только в выделениях микронных размеров, т.е. в виде отдельных зерен арсенопирит и мышьяковистый пирит в пробе отсутствуют, тем не менее данные результаты говорят о высоком содержании арсенопирита и пирита в исходных рудах.

В результате элементного исследования некоторых вторичных минералов (гётита, ярозита и скородита) было обнаружено, что мышьяк в качестве химической примеси присутствует во всех вторичных минералах и связан с железом. На рис. 2 и 3 представлены фотографии зерен ярозита и гётита, сделанные с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Discovery V8, и микрофотографии с распределением Fe и As в этих зернах, полученные картированием химических элементов на электронном сканирующем микроскопе Jeol 6000 Plus. На микрофотографиях картирования химических элементов хорошо прослеживается

корреляция мышьяка и железа. Известно, что золото в арсенопирите — это одна из ключевых форм нахождения золота в природе. Арсенопирит (FeAsS) часто играет роль «носителя» золота в гидротермальных и метаморфогенных золоторудных месторождениях. Связь золота с арсенопиритом проявляется в различных формах, как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровнях. Золото может существовать как в виде включений и сростков, видимых невооруженным глазом, так и в виде нановключений (1—100 нм) и атомарных примесей [17, 18].

Если арсенопирит (FeAsS) содержит золото в своей кристаллической решетке (например, в виде изоморфной примеси или тонкодисперсных включений), то при его окислении и переходе в скородит золото не встраивается в кристаллическую решетку скородита. В окисленных рудах с золотосодержащим арсенопиритом в результате образования вторичных минералов и перекристаллизации золото будет распределяться между несколькими системами-носителями: реликтовым арсенопиритом с Au, если окисление FeAsS не завершилось, часть золота останется в исходном минерале (в кристаллической решетке или в виде микровключений); вторичным золотом в «железистых шляпах» (гётит + + скородит) и самородными зернами Au по трещинам и пустотам [19—21].

Для определения форм выделения и связей золота с компонентами руды был проведен химический фазовый анализ табл. 2.

Результаты анализа подтвержают связь золота с различными компонентами руды. В среднем в пробе присутствует 76% золота, связанного вторичными минералами — ярозитом и скородитом (при перекристализации минералов частицы золота остались в пустотах и трещинах во вновь образовавшихся вторичных минералах); 8% в реликтовых арсенопирите и мышьяковистом пирите; 3% высвободились и перешли в гидроокислы железа; свободное золото и золото, связанное с силикатами, составляет соответственно 5 и 8%. Также можно отметить, что в тонких классах

Таблица 2

Результаты химического фазового анализа на золото
Results of phase analysis of Au

№	Формы нахождения золота в пробе	Класс крупности						
		–0,040 +0	–0,071+ 0,040	–0,1+ 0,071	–0,2+ 0,1	–0,5+ 0,2	–1+ 0,5	среднее значение
		Содержание форм нахождения золота, %						
1	Au в виде сростков с рудными компонентами	61	62	80	86	77	87	76
2	Au в виде свободных металических зерен	6	5	2	4	9	6	5
3	Au тонковкрапленное покрытое пленкой окислов железа	3	5	8	3	0	0	3
4	Au тонковкрапленное в сульфидах	13	18	8	3	3	4	8
5	Au тонковкрапленное в кварце, алюмосиликатах	17	11	2	4	11	3	8
Всего		100	100	100	100	100	100	100

(ниже 0,071 мм) содержится больше сложноизвлекаемых форм золота: Au тонковкрапленное в сульфидах составляет 13—18%, Au тонковкрапленное в кварце, алюмосиликатах 11—17%.

А в классах крупности выше 0,071 мм эти значения варьируются — 3—8% и 2—11%, что в среднем в 3—3,5 раза ниже. Золото, связанное с рудными копонентами (т.е. в форме частиц, лучше поддающихся выщелачиванию), в классах выше 0,071 превышают аналогичные значения в тонких классах в среднем на 20%.

При обогащении упорных руд с «невидимыми» частицами золота требуется искать нестандартные методики, которые были бы эффективны для данного сырья. Учитывая неоднородность форм выделения благородного металла и его распределение в руде, необходимо исследовать различные методы и реагентные режимы.

Оборудование и методы исследований

Электронно-микроскопические исследования проводилась с использованием растрового электронного микроскопа «JEOL» (Япония), оснащенного энергодисперсионным анализатором «JCM-6000 PLUS». Для количественной оценки содержания золота применялся атомно-абсорбционный спектрофотометр AAC-7000, AAC-6200. Исследование исходного материала на содержание общего углерода выполнялось высокотемпературным каталитическим методом ИК-детектирования с использованием анализатора общего углерода TOC-V (SHIMADZU).

В ходе приготовления выщелачивающих растворов использовались фотоэлектрохимические реакторы: электролизер «САНЕР-5-30-01», ультрафиолетовая лампа с длиной волны 400 нм. Предварительный обжиг пробы проводился в муфельной печи при 600 °С. Технологический процесс выщелачивания сопровождался режимом механоактивации пульпы в агитационной установке, собранной на базе лаборатории.

Результаты исследований

Ранее проведенные гидрометаллургические исследования по выщелачиванию невидимого золота с использованием 5 различных реагентов: гипохлоритный раствор; цианирование с предокислением карбонатным раствором; цианидно-аммиачный раствор; аммиачно-хлористый раствор; контрольное цианирование — показали неудовлетворительные результаты.

Применение цианидов оказалось неэффективно для данной руды (извлечение Au составило 52,1%). Данный факт, возможно, обусловлен наличием Cu в качестве примеси в частицах золота, что осложнило процесс цианирования. Низкие показатели извлечения хлоридными растворами, которые, как известно, являются эффективными для выщелачивания золота из упорных сульфидных и углеродистых сорбционно активных руд, также могут быть связаны с присутствием меди и образованием $CuCl_2$ (хлорида меди), которые покрывают поверхность золотин пленками, блокирующими дальнейшее взаимодействие ионов хлора с золотом, и препятствуют их переводу в раствор. Наибольший результат был получен для аммиачно-цианидного раствора — 56,7%.

Для дальнейших технологических экспериментов было выбрано несколько растворов, на основании вещественных характеристик, имеющих научные исследования и практическое применение в области гидрометаллургии золотосодержащих руд [22]. Перед выщелачиванием пробы подвергались предварительному обжигу в муфельной печи при 600 °С в течение 2 ч. Для сравнения

Таблица 3

Методика приготовления выщелачивающих растворов и проведения технологических испытаний
Methodology for the preparation of leaching solutions and conducting technological tests

№	Схема выщелачивания	Методика
1	Цианидная	Т:Ж = 1:2, NaCN (0,16% CN) агитация 4 ч. Слив через 24 ч
2	Аммиачно-цианидная	Т:Ж = 1:2, NaCN (0,05%) + 0,2 мл аммиака агитация 4 ч. Слив сразу
3	Флотент G350	Т:Ж = 1:2, Флотент GL3G (0,16% CN) агитация 4 ч. Слив через 24 ч
4	Тиомочевина + H_2SO_4	Т:Ж = 1:2, Тиомочевина (2%) + H_2SO_4 до pH = 2.0, агитация 2 ч. Слив сразу
5	Тиосульфат Na + NH_4OH	Т:Ж = 1:2, Тиосульфат (3%) + NH_4OH до pH = 10.0, агитация 4 ч. Слив через 24 ч

влияния температурного воздействия параллельно проводились эксперименты с теми же растворами, но без предварительного обжига. Для исследований были взяты фракции –0,2+0,074; –0,074+0,04; –0,04+0. В качестве экспериментальных выщелачивающих растворов были выбраны следующие: циа-

Таблица 4

Результаты извлечения золота и меди пятью различными выщелачивающими реагентами по классам крупности, с предварительным обжигом и без обжига
Results of gold and copper extraction by five leaching solutions from different size with and without pre-firing

Схема выщелачивания	Au, % извлечения			Cu, % извлечения		
	Класс крупности, мм					
	–0,04+0,0	–0,074+0,04	–0,2+0,074	–0,04+0,0	–0,074+0,04	–0,2+0,074
1. Цианидная						
без обжига	37,9	43,6	24,3	17,2	5,4	6,4
с обжигом	53,3	65,6	50,7	8,8	4,8	6,9
2. Аммиачно-цианидная						
без обжига	32,6	29,9	25,5	17,4	6,9	10,2
с обжигом	55,5	59,9	68,3	10,1	4,4	6,2
3. Флотент G350						
без обжига	36,1	33,0	23,3	18,1	4,7	5,6
с обжигом	52,8	53,8	79,7	13,2	4,0	9,2
4. Тиомочевина + H_2SO_4						
без обжига	17,3	21,4	21,0	20,3	7,5	7,7
с обжигом	58,0	59,9	72,6	19,1	8,1	12,4
5. Тиосульфат натрия +NH_4OH						
без обжига	24,3	16,7	20,5	18,4	1,3	74,3
с обжигом	38,0	40,9	57,8	0,9	0,4	1,4

нидный раствор; аммиачно-цианидный раствор; флотент GL3G; раствор тиомочевины (2%) + H_2SO_4; тиосульфат натрия (3%) + NH_4OH. В табл. 3 указана методика приготовления для каждого выщелачивающего раствора и основные стадии технологических испытаний. Результаты извлечения золота и меди представлены в табл. 4.

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы.

1. Повышение извлечения с предварительным обжигом проб в среднем на 31%, а максимум на 56 и 52% для флотента G350 и тиомочевины в классе –0,2+0,074 мм. Вероятно, воздействие высокой температуры приводит к разрушению структуры минералов и повышению пористости, что увеличивает площадь поверхности для взаимодействия с химическими реагентами в процессе выщелачивания.

Также можно предположить, что обжиг хоть и удаляет органические примеси, присутствующие в руде, проявляющие сорбционную активность, в данном случае прег-роббинговый органический углерод и глинистые вещества не влияют или несущественно влияют при выщелачивании. Содержание органического углерода в более тонкой фракции –0,04+0,0 мм в 2,5 раза выше, чем в других классах крупности, при этом без обжига извлечение выше, чем в крупных классах. В случае прег-роббинга, в режиме с обжигом в тонком классе наблюдался бы рост извлечения по сравнению с крупными классами по причине удаления вредных примесей. Этого не происходит, значит, причина упорности заключается в других минералогических особенностях руды.

2. Ранее отмечалось, что в пробе присутствует медь, ее содержания в целом невысокие, от 5 до 12 г/т в различных фракциях. Результаты извлечения меди очень низкие для всех схем и режимов выщелачивания, что свидетельствует об отсутствии образования комплексов с медью в процессе выщелачивания. При сравнении результатов извлечения меди в режиме с предварительным обжигом и без него для фракций выше 0,04 мм какая-либо динамика не наблюдается. Для фракции ниже 0,04 мм извлечение меди с предварительным обжигом в два раза выше, чем без обжига, но также имеет невысокие значения — не более 25%. Отрицательные свойства меди, проявляющиеся в большинстве химических процессов при выщелачивании золота, в данном случае на процессы извлечения не оказывают существенного влияния.

3. Наибольшей степени извлечения золота удалось добиться в режиме с предварительным обжигом пробы фракции –0,2+0,074 мм с использованием флотента G350 — 79,7% и тиомочевины + H_2SO_4 — 72,6%.

Интересен факт того, что извлечение тонкодисперсного и коллоиднодисперсного золота выше в более крупной фракции для вышеупомянутых реагентов. Для классов –0,04+0,0 мм и –0,074+0,04 мм извлечение золота меняется незначительно для режимов без предварительного обжига и с обжигом, и более резкий скачок наблюдается с увеличением крупности материала. При этом без обжига в более крупном классе –0,2+0,074 степень извлечения падает, а с обжигом, наоборот, растет. Степень извлечения по всем другим схемам идет с увеличением % извлечения золота с уменьшением класса крупности в режиме без обжига. А в режиме с обжигом наблюдается обратная зависисмость по всем схемам выщелачивания, кроме цианидной: чем крупнее фракция, тем лучше идет извлечение.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать выводы об эф-

фективности условий выщелачивания золота из углеродистых метасоматитов по диоритам месторождения Делькен с применением растворов: 1) тиомочевины + H_2SO_4 (извлечение золота 72,6%) в режиме: предварительный обжиг минеральной массы фракции –0,2+0,074 мм при температуре 600 °С в течение 2 ч; концентрация тиомочевины 2%, серной кислоты 1,8%, соотношение Т:Ж = 1:2; продолжительность агитационного выщелачивания 2 ч; 2) флотента G350 (извлечение золота 79,7%) в режиме: предварительный обжиг минеральной массы фракции –0,2+0,074 мм при температуре 600 °С в течение 2 ч, механоактивация 4 ч и выдержка в течение 24 ч. Тиокарбамидное выщелачивание — более экологичная альтернатива цианидам, поэтому применение данного реагента предпочтительно в дальнейших исследованиях.

Предварительный обжиг упорной руды (углеродистые метасоматиты по диоритам) позволяют в значительной степени повысить извлечение золота в раствор, на 56 и 52% для реагентов флотента G350 и тиомочевины соответственно. Данный факт подтверждает нахождение благородного металла в ультрадисперсных формах, которые сложнодоступны для проникновения выщелачивающего раствора, и выявляет эффективность обжига в разрушении микроструктуры минералов, что способствует повышению извлечения.

Менее эффективное извлечение при уменьшении класса крупности может объясняться несколькими причинами. Одна из них, возможно, связана с тем, что при сверхтонком измельчении может повышаться плотность и агрегация частиц (мелкие зерна слипаются в комки или флокулы, снижая доступ реагента и ухудшая фильтрацию, а также доступ выщелачивающего раствора к золоту). Также во время сверхтонкого измельчения возможно образование поверхностных оксидов или вторичных фаз, а также частичное покрытие активной поверхности тонкопленочными образованиями (например, гелями железа или кремнезема), которые затрудняют реакцию.

Кроме того, причинами могут быть минералогические различия между классами. Фазовый анализ показал, что в крупном классе (–0,2+0,074) содержится больше золота в формах, лучше поддающихся выщелачиванию, а в тонких классах — напротив, больше сложноизвлекаемых форм золота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майорова Т. П.*, *Ефанова Л. И.* Типоморфные особенности самородного золота золото-мышьяково-сульфидных проявлений манитанырдского района (полярный Урал): сопоставление с аналогичными типами золотого оруденения северо-востока России / Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024: Материалы XIV Международной научно-практической конференции. — Якутск–Новосибирск: СО РАН, 2024. — С. 150—154. DOI: 10.53954/9785604990100_150.

2. *Savva N. E.*, *Kravtsova R. G.*, *Anisimova G. S.*, *Palyanova G. A.* Typomorphism of native gold (geological-industrial types of gold deposits in the North-East of Russia) // Minerals. 2022, vol. 12, no. 5, article 561. DOI: 10.3390/min12050561.

3. *Volkov A. V.*, *Savva N. E.*, *Sidorov A. A.*, *Prokofiev V. Y.*, *Goryachev N. A.*, *Voznesensky S. D.*, *Al'shevsky A. V.*, *Chernova A. D.* The Shkolnoe gold deposit in the North-East of Russia // Geology of Ore Deposits. 2011, vol. 53, no. 1, pp. 1—26.

4. *Хасанов И.*, *Михалицына Т.*, *Макарова Д.* Геолого-геофизическая характеристика золоторудного оруденения дайкового типа (на примере месторождения Шахтное) / Геология и мине-

рально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Якутск — Новосибирск: СО РАН, 2024. — С. 258—262. DOI: 10.53954/9785604990100_258.

5. *Фазлуллин М. И.* Кучное выщелачивание благородных металлов. — М.: Издательство Академии горных наук, 2001. — 647 с.

6. *Habashi F.* Principles of extractive metallurgy: Pyrometallurgy, 1st ed. Routledge, 1986, 494 p. DOI: 10.1201/9780203742112.

7. *Ng W. S., Liu Y., Wang Q., Chen M.* The fate of the arsenic species in the pressure oxidation of refractory gold ores: Practical and modelling aspects // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 1—33. DOI: 10.1080/08827508.2022.2030326.

8. *Hong Qin, Xueyi Guo, Qinghua Tian, Dawei Yu, Lei Zhang* Recovery of gold from sulfide refractory gold ore: Oxidation roasting pretreatment and gold extraction // Minerals Engineering. 2021, vol. 164, article 106822. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106822.

9. *Meng Y., Wu M.* Pretreatment process on refractory gold ores with arsenic // Journal of Minerals & Materials Processing. 2020, vol. 45, pp. 112—118.

10. *Marsden J., House C.* The chemistry of gold extraction, 2nd ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006, pp. 451—473. DOI: 10.1007/BF03215543.

11. *Dunn J. G.*, *Hewitt D.* Improving gold recovery through modern roasting practices in refractory ores // Minerals Engineering. 2020, vol. 148, article 106215. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.02.008.

12. *Gupta C. K.*, *Mukherjee T. K.* Hydrometallurgy in extraction processes. CRC Press, 1990, vol. 2, pp. 167—180. DOI: 10.1201/9780203751404.

13. *Крюков В. Г.* Особенности рудолокализации на месторождении золота Делькен (Приамурье) / Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: X Косыгинские чтения: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. — Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2019. — С. 168—170.

14. *Лаврик А. В.*, *Копылова А. Е.* Ультрадисперсные формы золота месторождения Делькен // Вестник Забайкальского горного колледжа. — 2021. — № 14. — С. 111—114.

15. *Лаврик А. В.*, *Рассказова А. В.* Обоснование эффективной технологии переработки золотоносной руды месторождения Делькен по минералого-технологическим характеристикам / Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: 5-я конференция Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. — М., 2022. — С. 32—35. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.017.

16. *Hui Li, Wei Xiao, Jianping Jin, Yuexin Han* Oxidation roasting of fine-grained carbonaceous gold ore: The effect of aeration rate // Minerals. 2021, vol. 11, no. 6, pp. 543—558. DOI: 10.3390/min11060558.

17. *Sazonov A. M., Silyanov S. A., Bayukov O. A., Knyazev Yu.V., Zvyagina E. A., Tishin P. A.* Composition and ligand microstructure of arsenopyrite from gold ore deposits of the Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia) // Minerals. 2019, vol. 9, no. 12, pp. 736—755. DOI: 10.3390/min9120737.

18. *Vilor N. V.*, *Pavlova L. A.*, *Kaz'min L. A.* Aresenopyrite—pyrite paragenesis in gold deposits (thermodynamic modeling) // Russian Geology and Geophysics. 2014, vol. 55, pp. 824—841. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.06.003.

19. *Trigub A. L.*, *Tagirov B. R.*, *Kvashnina K. O.*, *Chareev D. A.*, *Nickolsky M. S.*, *Shiryaev A. A.*, *Baranova N. N.*, *Kovalchuk E. V.*, *Mokhov A. V.* X-ray spectroscopy study of the chemical state of «invisible» Au in synthetic minerals in the Fe-As-S system // American Mineralogist. 2017, vol. 102, pp. 1057—1065. DOI: 10.2138/am-2017-5832.

20. *Pokrovski G. S.*, *Kara S.*, *Roux J.* Stability and solubility of arsenopyrite, FeAsS, in crustal fluids // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002, vol. 66, pp. 2361—2378. DOI: 10.1016/S0016-7037(02)00836-0.

21. *Rogozhnikov D., Karimov K., Shoppert A., Dizer O., Naboichenko S.* Kinetics and mechanism of arsenopyrite leaching in nitric acid solutions in the presence of pyrite and Fe(III) ions // Hydrometallurgy. 2021, vol. 199, article 105525. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105525.

22. *Дементьев В. Е.*, *Дружина Г. Я.*, *Гудков С. С.* Кучное выщелачивание золота и серебра. — Иркутск: ОАО Иргиредмет, 2004. — 352 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Mayorova T. P., Efanova L. I. Typomorphic features of native gold from gold-arsenic-sulfide occurrences in the Manitanyrd region (Polar Urals): comparison with similar types of gold mineralization in northeastern Russia. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii 2024. Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and mineral resources of the North-East of Russia 2024: Proceedings of the XIV International scientific and practical conference dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences and the 100th anniversary of the gold mining industry of the Republic of Sakha (Yakutia)], Yakutsk–Novosibirsk, 2024, pp. 150 — 154. [In Russ]. DOI: 10.53954/9785604990100_150.

2. Savva N. E., Kravtsova R. G., Anisimova G. S., Palyanova G. A. Typomorphism of native gold (geological-industrial types of gold deposits in the North-East of Russia). *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 5, article 561. DOI: 10.3390/min12050561.

3. Volkov A. V., Savva N. E., Sidorov A. A., Prokofiev V. Y., Goryachev N. A., Voznesensky S. D., Al'shevsky A. V., Chernova A. D. The Shkolnoe gold deposit in the North-East of Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2011, vol. 53, no. 1, pp. 1 — 26.

4. Khasanov I., Mikhalitsyna T., Makarova D. Geological and geophysical characteristics of dike-type gold mineralization (using the Shakhtnoye deposit as an example). *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii 2024: Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and mineral resources of the North-East of Russia 2024: Proceedings of the XIV International scientific and practical conference dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences and the 100th anniversary of the gold mining industry of the Republic of Sakha (Yakutia)], Yakutsk–Novosibirsk, 2024, pp. 258 — 262. [In Russ]. DOI: 10.53954/9785604990100_258.

5. Fazlullin M. I. *Kuchnoe vyshchelachivanie blagorodnykh metallov* [Heap leaching of noble metals], Moscow, 2001, 647 p.

6. Habashi F. *Principles of extractive metallurgy: Pyrometallurgy*, 1st ed. Routledge, 1986, 494 p. DOI: 10.1201/9780203742112.

7. Ng W. S., Liu Y., Wang Q., Chen M. The fate of the arsenic species in the pressure oxidation of refractory gold ores: Practical and modelling aspects. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 1 — 33. DOI: 10.1080/08827508.2022.2030326.

8. Hong Qin, Xueyi Guo, Qinghua Tian, Dawei Yu, Lei Zhang Recovery of gold from sulfide refractory gold ore: Oxidation roasting pretreatment and gold extraction. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 164, article 106822. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106822.

9. Meng Y., Wu M. Pretreatment process on refractory gold ores with arsenic. *Journal of Minerals & Materials Processing*. 2020, vol. 45, pp. 112 — 118.

10. Marsden J., House C. *The chemistry of gold extraction*, 2nd ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006, pp. 451 — 473. DOI: 10.1007/BF03215543.

11. Dunn J. G., Hewitt D. Improving gold recovery through modern roasting practices in refractory ores. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 148, article 106215. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.02.008.

12. Gupta C. K., Mukherjee T. K. *Hydrometallurgy in extraction processes*. CRC Press, 1990, vol. 2, pp. 167 — 180. DOI: 10.1201/9780203751404.

13. Kryukov V. G. Specific features of ore localization at the Delken gold deposit (Priamurye). *Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya Vostoka Azii: X Kosyginskie chteniya: Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Tectonics, Deep Structure and Mineralization of East Asia: X Kosygin Readings. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation], Khabarovsk, 2019, pp. 168 — 170. [In Russ].

14. Lavrik A. V., Kopylova A. E. Ultrafine forms of gold at the Delken deposit. *Vestnik Zabaykal'skogo gornogo kolledzha*. 2021, no. 14, pp. 111 — 114. [In Russ].

15. Lavrik A. V., Rasskazova A. V. Justification of an effective technology for processing Delken gold ore based on mineralogical and technological characteristics. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh nedr: 5-ya konferentsiya Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly akademika RAN K.N. Trubetskogo* [Problems and Prospects of Complex Development and Conservation of the Earth's Subsoil: Proceedings of the 5th Conference of the International Scientific School of Academician K. N. Trubetskoy], Moscow, 2022, pp. 32 — 35. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.017.

16. Hui Li, Wei Xiao, Jianping Jin, Yuexin Han Oxidation roasting of fine-grained carbonaceous gold ore: The effect of aeration rate. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 6, pp. 543—558. DOI: 10.3390/min11060558.

17. Sazonov A. M., Silyanov S. A., Bayukov O. A., Knyazev Yu.V., Zvyagina E. A., Tishin P. A. Composition and ligand microstructure of arsenopyrite from gold ore deposits of the Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia). *Minerals*. 2019, vol. 9, no. 12, pp. 736—755. DOI: 10.3390/min9120737.

18. Vilor N. V., Pavlova L. A., Kaz'min L. A. Aresenopyrite—pyrite paragenesis in gold deposits (thermodynamic modeling). *Russian Geology and Geophysics*. 2014, vol. 55, pp. 824—841. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.06.003.

19. Trigub A. L., Tagirov B. R., Kvashnina K. O., Chareev D. A., Nickolsky M. S., Shiryaev A. A., Baranova N. N., Kovalchuk E. V., Mokhov A. V. X-ray spectroscopy study of the chemical state of «invisible» Au in synthetic minerals in the Fe-As-S system. *American Mineralogist*. 2017, vol. 102, pp. 1057—1065. DOI: 10.2138/am-2017-5832.

20. Pokrovski G. S., Kara S., Roux J. Stability and solubility of arsenopyrite, FeAsS, in crustal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002, vol. 66, pp. 2361—2378. DOI: 10.1016/S0016-7037(02)00836-0.

21. Rogozhnikov D., Karimov K., Shoppert A., Dizer O., Naboichenko S. Kinetics and mechanism of arsenopyrite leaching in nitric acid solutions in the presence of pyrite and Fe(III) ions. *Hydrometallurgy*. 2021, vol. 199, article 105525. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105525.

22. Dement'ev V. E., Druzhina G. Ya., Gudkov S. S. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolota i serebra* [Heap leaching of gold and silver], Irkutsk, 2004, 352 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Константинова Александра Викторовна[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: alexalavrikxx@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-8406-1016,
Конарева Татьяна Геннадьевна[1] — аспирант ХФИЦ ДВО РАН, научный сотрудник, e-mail: konar_tat@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9889-3721,
Лаврик Наталья Анатольевна[1] — старший научный сотрудник,
e-mail: lavrik@igd.khv.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0808-6115,
[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.
Для контактов: Константинова А.В., e-mail: alexalavrikxx@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Konstantinova[1], Junior Researcher,
e-mail: alexalavrikxx@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-8406-1016,
T.G. Konareva[1], Graduate Student, Researcher, e-mail: konar_tat@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9889-3721,
N.A. Lavrik[1], Senior Researcher,
e-mail: lavrik@igd.khv.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0808-6115,
[1] Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia.
Corresponding author: A.V. Konstantinova, e-mail: alexalavrikxx@gmail.com.

Получена редакцией 27.05.2025; получена после рецензии 05.11.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 27.05.2025; received after the review 05.11.2025; accepted for printing 10.01.2026.