

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОТОСЕРЕБРЯНЫХ УПОРНЫХ РУД КОМПЛЕКСНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2019 г. **Н.П. Хрунина, К.В. Прохоров**

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук
(ИГД ДВО РАН), г. Хабаровск

Статья поступила в редакцию 17.05.18 г., доработана 19.10.18 г., подписана в печать 01.11.18 г.

Рассмотрены результаты исследования перспективного золотосеребряного сложного комплексного месторождения Ерикского рудного узла (Хабаровский кр.) с упорными поликомпонентными рудами. Выполнены энергодисперсионный, атомно-эмиссионный, гранулометрический и дисперсный анализы образцов пород. В пробах присутствуют микроэлементы широкого спектра, в том числе золота, серебра, висмута, кобальта, хрома, марганца, молибдена, никеля, свинца, ванадия, вольфрама, цинка, меди и др. Установлено, что поликомпонентность и дисперсность состава минерального сырья месторождения определяют его в качестве сложного объекта для извлечения ценных компонентов. Для решения вопроса извлечения благородных металлов более экологически и технологически эффективными средствами предложено использовать системы, в основе которых лежат методы, обеспечивающие снижение расхода реагентов. Это достигается путем создания условий для устойчивого процесса подготовки к выщелачиванию минеральных компонентов, содержащих золото и платину, посредством разрушения минеральной составляющей упорных поликомпонентных руд усилением полей микродезинтеграции с помощью ультразвука. Обеспечение устойчивости процесса разрушения кристаллической решетки минералов путем доизмельчения твердой фазы, образовавшейся в ходе кавитации, является основополагающим фактором при подготовке к выделению микрочастиц ценных компонентов.

Ключевые слова: благородные металлы, поликомпонентный состав, микрочастицы, кавитация, ультразвук, фотоэлектрохимическая обработка.

Хрунина Н.П. — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории освоения россыпных месторождений ИГД ДВО РАН (680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51). E-mail: npetx@mail.ru.

Прохоров К.В. — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГД ДВО РАН. E-mail: kostyan1986_ne@mail.ru.

Для цитирования: Хрунина Н.П., Прохоров К.В. Совершенствование процессов переработки золотосеребряных упорных руд комплексного месторождения благородных металлов. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 2. С. 4–12. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-4-12.

Khrunina N.P., Prokhorov K.V.

Improving processes of gold-silver refractory ores treatment at the complex deposit of precious metals

The paper considers the results obtained in the study of the prospective gold-silver complex deposit at the Eriksky ore cluster (Khabarovsk Territory) with refractory polycomponent ores. Energy dispersive, atomic emission, grain size and dispersive analysis of rock samples were carried out. Samples contained microelements of a wide range including gold, silver, bismuth, cobalt, chromium, manganese, molybdenum, nickel, lead, vanadium, tungsten, zinc, copper, etc. It was found that polycomponent and dispersed composition of mineral raw materials at the deposit defines it as a complex object to extract valuable components. It was proposed to use systems based on methods that reduce consumption of reagents to address the issue of precious metal extraction with more environmentally and technologically efficient tools. It is achieved by creating conditions for a sustainable process of preparation for leaching of mineral components containing gold and platinum through destruction of the mineral component of refractory polycomponent ores by increasing micro disintegration fields using ultrasound. Providing sustainability of mineral crystal lattice destruction by regrinding the solid phase formed during cavitation is a fundamental factor when preparing for the extraction of microparticles of valuable components.

Keywords: precious metals, polycomponent composition, microparticles, cavitation, ultrasound, photoelectrochemical processing.

Khrunina N.P. — Cand. Sci. (Tech.), Senior researcher of, Laboratory developing placer deposits, Federal State Budgetary Institution, Science Mining Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI FEB RAS) (680000, Russia, Khabarovsk, Turgenev str., 51). E-mail: npetx@mail.ru.

Prokhorov K.V. — Cand. Sci. (Tech.), Senior researcher, Laboratory of mineral processing, MI FEB RAS. E-mail: kostyan1986_ne@mail.ru.

Citation: Khrunina N.P., Prokhorov K.V. Improving processes of gold-silver refractory ores treatment at the complex deposit of precious metals. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 2. P. 4–12 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-4-12.

Введение

На территории Дальневосточного региона выявлено более 110 золотосеребряных месторождений, из которых 65 имеют ресурсы более 10 т. Основу золоторудной базы составляют 15 месторождений с общими ресурсами более 100 т в каждом, в том числе Наталка, Майское, Нежданинское, Куранах, Гросс, Албазинское и др. Разведанные запасы коренного и россыпного золота составляют до 5,5 тыс. т, прогнозные ресурсы — 16÷19 тыс. т. Коренное золото в общих запасах и в прогнозных ресурсах составляет более 80 %, россыпное — около 10 %, а золото комплексных месторождений — примерно 5 %. Наиболее значительные золотосеребряные месторождения Хабаровского края содержат Au/Ag, т: Авляканское — 8,18/100; Хаканжинское — 50/2098,3; Дурминское — (7÷9)/80; Многовершинное — 50/115,3; Нони — 7/31,78; Озерное — 10,48/45,85; Светлое — 170/16,92; Чачика — 3,936/160; Юрьевское — 13,4/13,13. К ним также можно отнести Киранкан, Скарновое, Тас-Юрях и Тукчи [1].

Одной из наиболее сложных задач при освоении рудных месторождений различных типов является извлечение тонкого, пластинчатого и пылевидного золота, которого, по оценке специалистов, в процессе эксплуатации теряется до 70—80 %. Потери золота обусловлены формой частиц, повышенным содержанием мелких и тонких фракций, а также характеристикой вмещающих пород, величиной глинистой составляющей и режимом работы промывочных агрегатов. Новые знания о трансформации физико-химических свойств ценных компонентов, их морфологических показателях позволили научно обосновать последствия этих процессов для возобновления ресурсного потенциала [2]. Известно, что в литосфере размеры частиц золота крупностью 0,9—0,01 мм составляют 75 %, поэтому предполагается, что основные резервы добычи связаны с мелким и тонким золотом. В первичных рудах золото представлено частицами менее 0,01 мм, при этом более половины из них имеют величину 1—5 мкм. Анализ руд канадских месторождений показал, что 85 % золотин имеют размер менее 10 мкм [3].

На перерабатывающих предприятиях России, Канады, Австралии и США широко применяется прямое выщелачивание золота и серебра из рудных концентратов цианированием при избыточном давлении кислорода и повышенном содержании

цианидов в системе. Золото и серебро, накапливающиеся в цианистых растворах, извлекают цементацией цинковой пылью, а также сорбцией на активированные угли или синтетические сорбенты с последующей десорбцией в водные среды и выделением металлов из растворов электрохимическим восстановлением [4—21].

Существенным фактором при подготовке руды к выщелачиванию является измельчение. В работе [8] приводятся результаты исследования процессов выщелачивания золота и серебра из упорных пиритных и арсенопиритных продуктов после активационной подготовки руды в дробильных агрегатах и перемешивания в мельницах с измельчением 80 % объема частиц размером до 15, 10 и 5 мкм.

В настоящее время широкое развитие получают исследования процессов разрушения минеральной составляющей путем резонансных, электротермических, акустических, теплофизических, оптических, гидродинамических эффектов, моделируемых с помощью взрывной автоэмиссии с катода в сильных электрических полях мощных ускорителей, а также посредством ультразвуковых, электроразрядных, электромагнитных (СВЧ), лазерных, вибрационных, гидродинамических воздействий, в том числе с использованием струйной генерации акустических потоков для активной кавитационно-струйной диспергации [22—25].

Одним из перспективных методов энергетического воздействия является лазерная обработка материалов, которая обеспечивает создание на ограниченном участке поверхности теплового потока высокой плотности, достаточной для укрупнения наноразмерных частиц ценных компонентов, в том числе золота, за счет термокапиллярной конвекции. Сотрудниками лаборатории геотехнологии и горной теплофизики ИГД ДВО РАН установлены оптимальные режимы лазерного воздействия на золотосодержащие минеральные среды, разработана методика идентификации субмикронных и наномасштабных минералогических объектов [24, 25].

Физико-химические изменения перерабатываемой горной массы комплексных рудных золотосеребряных месторождений тесно связаны с процессами активации, обеспечивающими достаточно полное окисление вмещающей минеральной матрицы, и разрыва связей кластерных включений металлов с окружающими их атомами матрицы.

Поэтому совершенствование данных процессов может развиваться на основе применения новых интенсифицирующих воздействий, способных разрушать связи между частицами малых размеров, активизируя физико-химические изменения в среде водно-газовой эмульсии при извлечении ценных компонентов.

Для оценки и прогнозирования процессов интенсификации переработки упорного рудного сырья с преимущественно тонкими частицами золота и серебра в условиях резонансных акустических явлений в гидротоке первостепенное значение приобретает исследование физико-химических, структурно-механических свойств вмещающих пород природных объектов месторождений благородных металлов.

Целью настоящей работы было изучение структурно-механических свойств и состава вмещающих пород для обоснования рекомендаций по переработке комплексного месторождения Ерикского рудного узла (Хабаровский кр.) с высокими прочностными характеристиками и повышенным содержанием мелких фракций ценных компонентов.

Методика исследований

Посредством электронного микроскопа JCM-6000 Plus Neoscope (JEOL, Япония) и комплекса атомно-эмиссионного спектрального анализа с анализатором МАЭС («Оптоэлектроника», Россия, Новосибирск) в Центре исследования минерального сырья ИГД ДВО РАН получены изображения поверхности материала с большим разрешением, а с помощью фрагментарного сканирования выделенных минеральных включений осуществлен энергодисперсионный микроанализ проб, отобранных на участках месторождения Ерикского рудного узла (рис. 1).



Рис. 1. Проба (150×100×100 мм) Ерикского рудного узла

Гранулометрический анализ выполнен ситовым способом по ГОСТ 12536-2014 путем размола общей пробы, сушки в сушильном шкафу SNOL (АО «Умега», Литва) каждой из проб после рассева на наборе сит и взвешивания анализируемого материала на весах Мидл-МТЗВ1ЖА-8 10 (Московский весовой завод «Мидл») с погрешностью 0,1–0,2 г, так как исходная масса выборки образцов составляла $1048,0 \pm 4$ г. Влажность проб определялась по ГОСТ 5180-84 с использованием лабораторных электронных весов OHAUS Scout ProSPU202 («Mettler Toledo», Китай) с систематической погрешностью $\pm 0,001$. Дисперсность фракции менее 500 мкм оценивалась с помощью лазерного дифракционного микроанализатора Laser Particle Sizer Analysette 22 («FRITSCH», Германия), работающего на основе сходящегося лазерного луча, использующего физический принцип рассеяния электромагнитных волн для определения распределения частиц по размерам.

В эксперименте полученный раствор после выщелачивания в течение 4 ч был проанализирован на атомно-абсорбционном анализаторе AA-7000 («Shimadzu», Япония). Доля золота в растворе (%) от исходного рассчитывалась по формуле

$$\gamma_{p-p} = C_{исх} - C_{p-p},$$

где $C_{исх}$ — содержание золота в исходном образце, г/т; C_{p-p} — доля золота в растворе, пересчитанная в г/т.

Результаты и их обсуждение

При зондировании поверхности исследуемого образца сфокусированным электронным пучком растрового электронного микроскопа JEOL (Япония), оснащенного энергодисперсионным анализатором JCM-6000 Plus Neoscope, возникает вторичное излучение с характерным спектром, соответствующим набору элементов, присутствующих в образце. Один из результатов энергодисперсионного микроанализа вторичного квантового излучения представлен в виде спектрограммы, по интенсивности линии спектра которой определены концентрации элементов (рис. 2 и 3).

Атомно-эмиссионным методом посредством комплекса Гранд-Поток (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Новосибирск, Россия) установлена массовая доля элементов. Кроме углерода, кислорода, алюминия, магния, серы, железа, кремния и золота основными элементами, входящими в со-

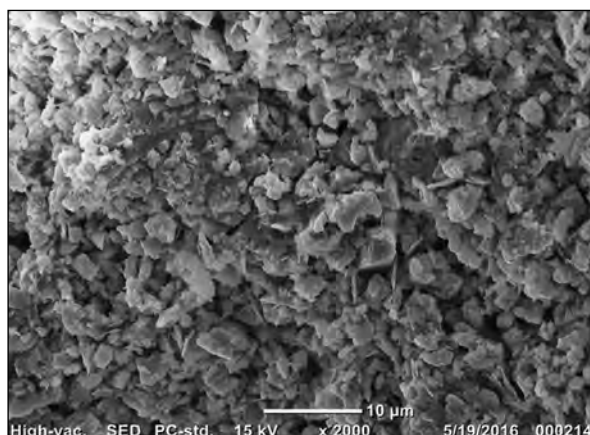


Рис. 2. Изображение сканируемой поверхности исследуемой пробы

став более 500 исследованных образцов, являются, г/т:

Серебро.....	0,04—8,0
Висмут	1—25
Кобальт.....	13—40
Хром.....	25—250
Марганец	60—1800
Молибден	0,4—3,0
Никель.....	18—130
Свинец.....	6—130
Ванадий.....	25—300
Вольфрам	10—300
Цинк	10—80
Медь.....	18—1800
Литий.....	10—60
Фосфор	180—1300
Олово	1,0—2,5
Мышьяк	
часто	<10
редко.....	18; 300; 400
однократно	1800
Сурьма	
часто	<10
однократно	30

Таким образом, элементный состав образцов является сложным поликомпонентным.

Для всех исследуемых проб с естественной влажностью от 0,26 до 0,72 % гранулометрическим анализом установлено повышенное (в сред-

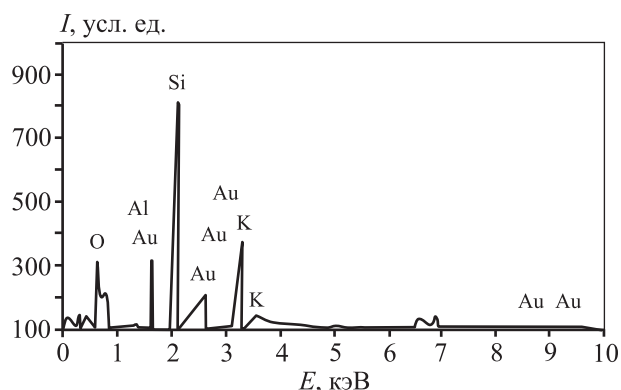


Рис. 3. Спектрограмма микроэлементов исследуемого образца комплексного месторождения Ерикского рудного узла

Элемент	Содержание	
	мас.%	ат.%
O	31,28	51,57
Al	10,88	10,64
Si	25,70	24,14
K	17,30	11,67
Au	14,84	1,99

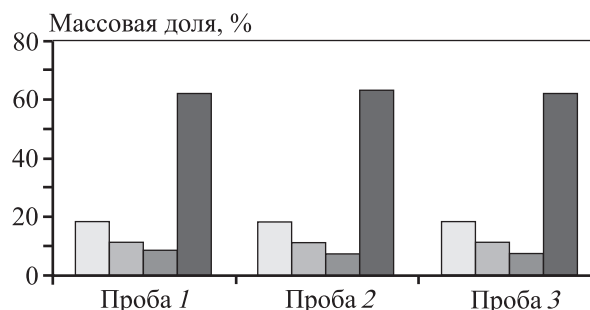


Рис. 4. Гистограмма распределения фракций материала по массе

Фракции (слева направо), мм: +2; -2+1; -1+0,5; -0,5

нем 62,6 % от общей массы образцов) содержание фракций размером $d < 0,5$ мм, более 70,0 % — менее 1,0 мм (рис. 4).

Дисперсность фракции менее 0,5 мм, определенная с помощью лазерного дифракционного микроанализатора Laser Particle Sizer Analysette 22, показала максимальный объем частиц размером менее 233,4 мкм (99 %), 90 % из этого количества составляют частицы с $d < 90,6$ мкм и 50 % — с $d < 5,3$ мкм (рис. 5).

Предварительная подготовка концентратов к выщелачиванию основана на механической активации окислительных превращений с участием

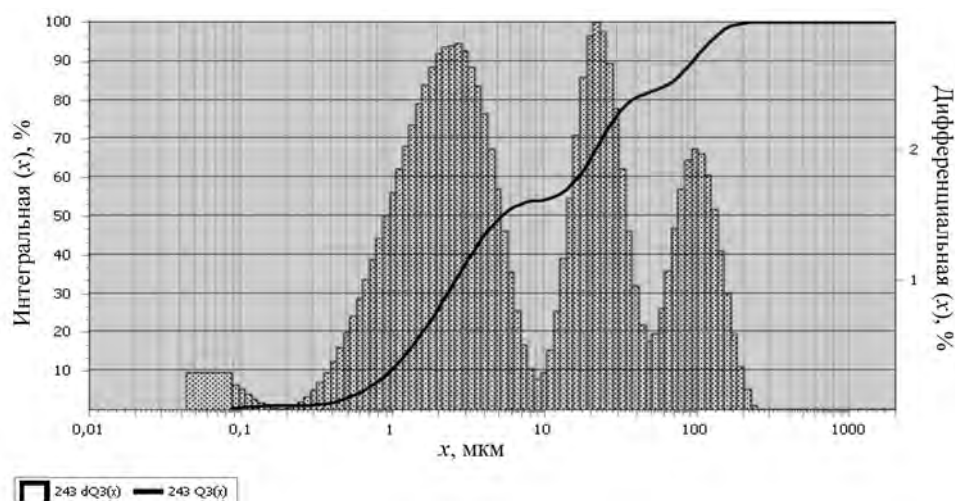


Рис. 5. Дифференциальная гистограмма распределения частиц по размерам ($d < 500$ мкм)

кислорода воздуха и других вводимых реагентов [26—28]. Механоактивация сопровождается деформациями кристаллических структур минеральных зерен с одновременным воздействием на них окислителей, в том числе кислорода воздуха. Немногие экспериментальные данные, полученные до сих пор, дают достаточно ограниченные представления о возникающих физико-химических превращениях в процессах кавитации, струйных и вихревых течениях в многокомпонентных минеральных средах.

Для решения проблемы извлечения мелкого и тонкого золота более экологически и технологически эффективными средствами, позволяющими сократить объемы применяемых выщелачивающих реагентов, нами предлагается технология, способная обеспечить устойчивость процесса подготовки минеральной составляющей пульпы на основе усиления полей кавитации ультразвуком, в том числе его воздействием на водно-газовую эмульсию (ВГЭ) кислородсодержащих реагентов, полученных путем обработки раствора электролизом и ультрафиолетовым облучением. Схема реактора с системами подготовки ВГЭ и активации пульпы представлена на рис. 5.

Начальным этапом работы реактора является процесс получения ВГЭ путем электрохимической обработки раствора кислородсодержащих реагентов электролизом с продуцированием в нем мелких пузырьков водорода и кислорода. Последующее диспергирование газовых пузырьков водорода, подвергаемых ультразвуковому воздействию (УЗВ) католита, проводится в поле УЗ-излучате-

лей. Из зоны ультразвуковых излучателей происходит отделение части католита путем подачи его напрямую в пульповод. Затем в системе подготовки ВГЭ с помощью устройства фотоэлектрохимической обработки (дуговая разрядная ртутная лампа высокого давления ДРТ-400, $\lambda = 240\div 320$ нм и $P = 400$ Вт) осуществляется ультрафиолетовое облучение эмульсии в объеме газовых кислородсодержащих пузырьков анолита — его более реакционно-активных аллотропных форм (атомарной и озона), последующее смешивание части католита и анолита и диспергирование в сформированной смеси газовых пузырьков водорода и кислорода ультразвуковой обработкой посредством УЗ-излучателя с изменением гидродинамических параметров потока. Подготовленная эмульсия подается в пульпу.

Обработка пульпы после ввода в нее ВГЭ проводится путем формирования периодически возникающих градиентных областей повышенного и пониженного давлений в пульповоде, обусловленного УЗВ, а также изменения гидродинамических параметров потока в смесителе путем подачи пульпы через конфузор по касательной к внутренней поверхности смесителя с кавитирующими элементами. Главным фактором интенсификации процесса кавитации, способствующим микродезинтеграции, является не столько частота ультразвука, хотя она и влияет на длину волны, а излучаемая интенсивность УЗВ, которая должна достигать, в зависимости от соотношения $T : Ж$ в случае гидросмеси с минеральными частицами, значений до 2 Вт/см^2 .

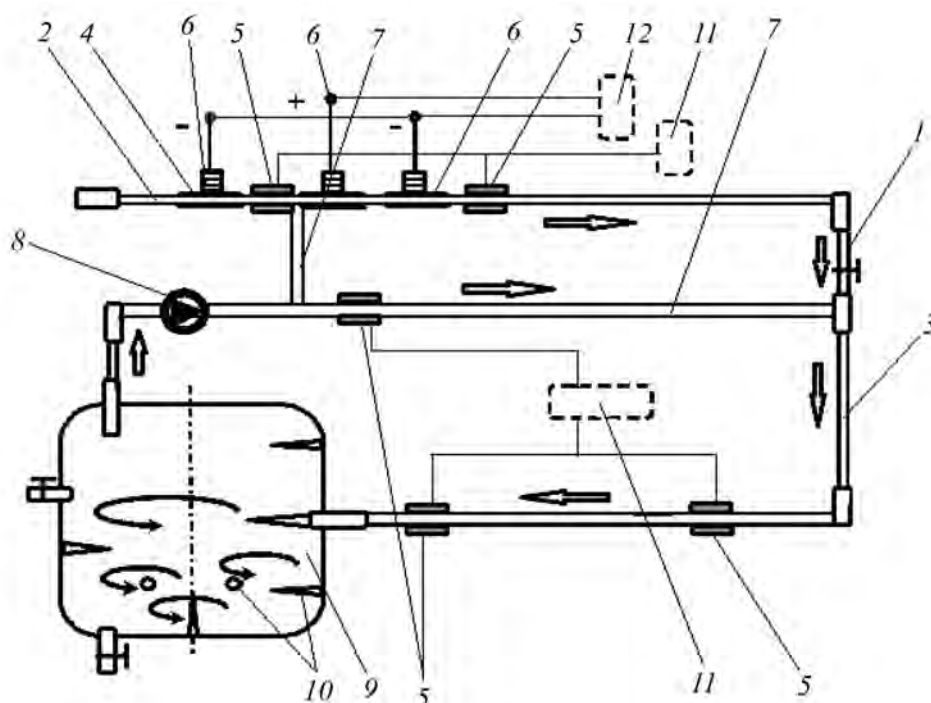


Рис. 6. Схема реактора с системами подготовки водно-газовой эмульсии и активации пульпы

1 — реактор; 2 — система подготовки ВГЭ; 3 — система активации пульпы после смешения с ВГЭ; 4 — система электрохимической обработки; 5 — система ультразвукового излучения; 6 — устройство фотоэлектрохимической обработки; 7 — пульповод системы активации пульпы; 8 — насосная система; 9 — смеситель; 10 — кавитирующие элементы; 11 — блок управления системами ультразвукового излучения; 12 — блок управления системой электрохимической обработки

Смеситель снабжен патрубками для подачи исходного материала пульпы и выхода готового активированного раствора. Контроль параметров УЗ-обработки пульпы происходит в автоматическом режиме в зависимости от скорости потока и концентрации пульпы. Активация процесса подготовки к выщелачиванию ценных компонентов в водном растворе реактора, содержащем окислители и комплексообразователи, с циркуляцией пульпы с активным кислородом осуществляется с помощью насосной системы при гидродинамическом воздействии, обеспечивающем режим кавитации при закручивании потока суспензии минерального сырья.

В области пониженного давления будет расти количество пузырьков газов и увеличиваться их объем за счет ослабления связей между молекулами жидкости и растворенных в ней газов и диффузии последних в имеющиеся микропузырьки. В области повышенного давления будет происходить схлопывание пузырьков газов, сопровождающееся генерацией в прилегающих объемах жидкости ударных микроволн. Находящиеся на

фронте ударной микроволны гидратированные гидроксил- и ион-радикалы теряют свои гидратные оболочки и могут внедряться в кристаллическую решетку минералов, содержащих дисперсное золото и платину. Таким образом будут осуществляться интенсивное окисление кристаллической решетки этих минералов и нарушение химических связей между металлической, ядерной частью кластера и непосредственно связанными с ним атомами, формирующими его оболочку. После окислительной подготовки минеральных матриц, содержащих золото и платину, пульпа направляется в емкость для выщелачивания и последующей сорбции.

Эксперимент проводился с использованием образцов исследуемого месторождения при средней температуре воздуха 21 °С и относительной влажности 60 %. Оценка случайных погрешностей выполнялась на основе метода Стьюдента при величине надежности 0,95 и количестве измерений $n = 5$, а исключение грубых ошибок статистического ряда — по правилу 3 сигм. Вычислялись действительные значения изучаемых величин для

малой выборки. По правилу 3 сигм разброс случайных величин от среднего значения не должен превышать $x_{\max/\min} = \bar{x} \pm 3\sigma$, что позволяет установить наличие или отсутствие грубых ошибок. Выполненная проверка не выявила значимых нарушений статистического ряда экспериментальных данных.

Проведено гипохлоритное выщелачивание без дополнительных воздействий (способ 1), с предварительной ультразвуковой обработкой пульпы (2) и с предварительно обработанным ультразвуком хлорит-гипохлоритного раствора (3). Извлечение золота в первом случае составило 23 %, во втором — 36,71 % и в третьем — 66,53 %.

Атомно-эмиссионным методом посредством комплекса Гранд-Поток в исходной пробе определено содержание золота на уровне 0,8—0,95 г/т. С использованием растрового электронного микроскопа JEOL, оснащенного энергодисперсионным анализатором JCM-6000 Plus Neoscope, по интенсивности линии спектра в исходной пробе определена относительная концентрация золота — 14,84 мас.%. Соотношение в пульпе твердого к жидкому было 1 : 4, хлорит-гипохлоритный раствор во всех экспериментах добавлялся в соотношении 1 : 4. Ультразвуковое воздействие в обоих случаях осуществлялось как на пульпу, так и на хлорит-гипохлоритный раствор в течение 10 мин посредством ультразвуковой установки УЗДН-2Т (Россия).

Отмечено положительное влияние УЗВ на извлечение золота в жидкой фазе при 4-часовом выщелачивании при обработке пульпы (способ 2), которое выросло на 13,71 % (с 23 до 36,71%), а при обработке исходного хлорид-гипохлоритного раствора (способ 3) — на 43,53 % (с 23 до 66,53%).

Предварительное инициирование перед выщелачиванием отдельно пульпы и хлорит-гипохлоритного раствора ультразвуком позволило значительно увеличить долю золота в растворе по сравнению со стандартным способом без дополнительной УЗ-активации.

Заключение

Учитывая сложность объекта изучения, а также комплексность элементного состава проб месторождения Ерикского рудного узла, предпринята попытка совершенствования процесса переработки золотосеребряной руды. В результате проведенных экспериментов по инициированию ультра-

звуком пульпы и хлорид-гипохлоритного раствора перед выщелачиванием руды получены положительные результаты, которые могут послужить основанием для дальнейших исследований в данном направлении.

Для решения проблемы извлечения мелкого и тонкого золота более экологически и технологически эффективными средствами, позволяющими сократить объемы применяемых выщелачивающих реагентов, а также время выщелачивания, могут быть использованы системы, обеспечивающие создание условий для устойчивости процесса подготовки к выщелачиванию путем разрушения минеральной составляющей проб на основе усиления полей микродезинтеграции, в том числе обработкой ультразвуком.

Литература/References

1. *Архипов Г.И.* Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Стратегическая оценка возможностей освоения. Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН, 2017.
Arhipov G.I. Mineral resources mining industry of the Far East. Strategic evaluation of capacity development. Khabarovsk: Institut gornogo dela DVO RAN, 2017 (In Russ.).
2. *Хрунина Н.П., Чебан А.Ю.* Совершенствование процессов микродезинтеграции песков комплексного месторождения благородных металлов с высокими прочностными характеристиками. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2017. No. 3. С. 4—10.
Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Improving mikrodintegration processes of sands of an integrated deposit of precious metals with high strength characteristics. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 4. P. 330—334.
3. *Чекушин В.С., Олейникова Н.В.* Переработка золото-содержащих рудных концентратов (обзор методов). *Изв. Челябинского научного центра.* 2005. No. 4 (30). С. 94—110.
Chekushin V.S., Olejnikova N.V. Processing gold ore concentrates (review). *Izv. Chelyabinskogo nauchnogo tsentra.* 2005. No. 4 (30). P. 94—110 (In Russ.).
4. *Стрижко Л.С.* Металлургия золота и серебра. М.: МИСиС, 2001.
Strizhko L.S. Metallurgy of gold and silver. Moscow: MISIS. 2001 (In Russ.).
5. *Schoeman E., Bradshaw S.M., Akdogan G., Snyders C.A., Eksteen J.J.* The extraction of platinum and palladium

- from a synthetic cyanide heap leach solution with strong base anion exchange resins. *Int. J. Miner. Process.* 2017. Vol. 162. P. 27–35.
6. *Nguyen A.V., An-Vo D.-A., Tran-Cong T., Evans G.M.* A review of stochastic description of the turbulence effect on bubble-particle interactions in flotation. *Int. J. Miner. Process.* 2016. Vol. 156. P. 75–86.
 7. *Palaniandy S.* Impact of mechanochemical effect on chalcopyrite leaching. *Int. J. Miner. Process.* 2015. Vol. 136. P. 56–65.
 8. *Celep O., Alp İ., Deveci H.* Improved gold and silver extraction from a refractory antimony ore by pretreatment with alkaline sulphide leach. *Hydrometallurgy journal*. URL: https://www.researchgate.net/publication/251562421_Improved_gold_and_silver_extraction_from_a_refractory_antimony_ore_by_pretreatment_with_alkaline_sulphide_leach (accessed: 03.10.2017).
 9. *Oberthuer T., Melcher F., Weiser Th.W.* Detrital platinum-group minerals and gold in placers of southeastern samar island, Philippines. *Canadian mineralogist*. 2017. Vol. 55 (3). P. 45–62.
 10. *Mota-E-Silva Jonas, Prichard Hazel M., Suarez Saioa, Ferreira Filho S., Fisher P.C.* Supergene alteration of platinum-group minerals and the formation of Pd—Cu—O and Pd—I—O compounds in the limoeiro Ni—Cu—(PGE) deposit, Brazil. *Canadian mineralogist*. 2016. Vol. 54 (3). P. 755–778.
 11. *Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Serova A.A., Kulikova I.M., Korotaeva N.N., Sereda E.V., Tushencova I.N., Belyakov S.N., Beetles N.N.* Genetic Pd, Pt, Au, Ag, and Rh mineralogy in Noril'sk sulfide ores. *Geology of Ore Deposits*. 2015. Vol. 57 (5). P. 402–432.
 12. *Nie Yanhe, Chi Heng, Zi Futing, Xianzhi Hu, Hong Yu, Suqiong He.* The effect of cobalt and nickel ions on gold dissolution in a thiosulfate-ethylenediamine (en)-Cu²⁺ system. *Miner. Eng.* 2015. Vol. 83. P. 205–210.
 13. *Snyders C.A., Bradshaw S.M., Akdogan G., Jekstin J.J.* Factors affecting the elution of Pt, Pd and Au cyanide from activated carbon. *Miner. Eng.* 2015. Vol. 80. P. 14–24.
 14. *Snyders C.A., Bradshaw S.M., Akdogan G., Jekstin J.J.* Determination of the equilibrium and film diffusion constants of the platinum cyanide anions during the elution from activated carbon. *Miner. Eng.* 2015. Vol. 80. P. 57–68.
 15. *Zalupski P.R., McDowell R., Dutech G.* The adsorption of gold, palladium, and platinum from acidic chloride solutions on mesoporous carbons. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2014. Vol. 32 (7). P. 737–748.
 16. *Snyders C.A., Bradshaw S.M., Akdogan G., Jekstin J.J.* The effect of temperature, cyanide and base metals on the adsorption of Pt, Pd and Au onto activated carbon. *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 149. P. 132–142.
 17. *Morcali M.H., Zeytuncu B., Akman S., Onuralp Yucel.* Sorption of gold from electronic waste solutions by a commercial sorbent. *Chem. Eng. Commun.* 2014. Vol. 201 (8). P. 1041–1053.
 18. *Flytzani-Stephanopoulos M.* Gold atoms stabilized on various supports catalyze the water-gas shift reaction. *Accounts Chem. Res.* 2014. Vol. 47 (3). P. 783–792.
 19. *Mpinga C.N., Bradshaw S.M., Akdogan G., Jekstin J.J.* Evaluation of the Merrill-Crowe process for the simultaneous removal of platinum, palladium and gold from cyanide leach solutions. *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 142. P. 36–46.
 20. *Хрунина Н.П., Мамаев Ю.А., Пуляевский А.М., Страте-чук О.В.* Новые аспекты научных основ ультразвуковой дезинтеграции высокоглинистых золото-содержащих песков россыпей Приамурья. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. *Khrunina N.P., Mamaev YU.A., Pulyaevskij A.M., Stratechuk O.V.* New aspects of scientific bases of ultrasonic disintegration of highly clayey sands gold placers of the Amur region. Khabarovsk: Tihookeanskij gos. universitet, 2011 (In Russ.).
 21. *Секисов А.Г., Мазуркевич С.А.* Способ извлечения благородных металлов из растворов и пульпы и реактор для его осуществления: Пат. 2251582 (РФ). 2005. *Sekisov A.G., Mazurkevich S.A.* How to extract precious metals from solutions and pulps and reactor for its implementation: Pat. 2251582 (RF). 2005 (In Russ.).
 22. *Секисов А.Г., Резник Ю.Н., Зыков Н.В., Шумилова Л.В., Лавров А.Ю., Манзырев Д.В., Климов С.С., Королев В.С., Конарева Т.Г.* Способ кюветно-кучного выщелачивания металлов из минеральной массы: Пат. 2350665 (РФ). 2009. *Sekisov A.G., Reznik Ju.N., Zykov N.V., Shumilova L.V., Lavrov A.Ju., Manzyrev D.V., Klimov S.S., Korolev V.S., Konareva T.G.* Kjuvetno method-heap leaching of metals from mineral mass: Pat. 2350665 (RF). 2009 (In Russ.).
 23. *Черепанов Г.П.* Механика разрушения. Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2012. *Cherepanov G.P.* Fracture mechanics. Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovanij, 2012 (In Russ.).

24. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П., Леоненко Н.А. Интегрирование оптоволоконных лазеров в процессы горного производства. *Изв. Юго-Западного гос. ун-та. Сер.: Техника и технологии*. 2015. No. 3 (16). С. 55—59.
Cheban A.Ju., Khrunina N.P., Leonenko N.A. Integration of fiber lasers in mining production processes. *Izv. Yugo-Zapad. gos. univ. Ser.: Tekhnika i tehnologiya*. 2015. No. 3 (16). P. 55—59 (In Russ.).
25. Капустина Г.Г., Леоненко Н.А., Швец Н.Л. Агломерация ультрадисперсного золота при лазерном воздействии на минеральные золотосодержащие среды. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. 2016.
Kapustina G.G. Leonenko N.A. Shvec N.L. Agglomeration ultrafinegold laser effects on mineral containing Wednesday. Khabarovsk: Tihookeanskij gos. universitet, 2016 (In Russ.).
26. Карабасов Ю.С., Лужков Ю.М., Панин В.В., Семенов М.П., Крылова Л.Н., Воронин Д.Ю. Способ переработки упорного минерального сырья: Пат. 2265068 (РФ). 2005.
Karabasov Yu.S., Luzhkov Y.M., Panin V.V., Semenov M. P., Krylova L.N., Voronin D. Yu. Method of processing hard minerals: Pat. 2265068 (RF). 2005 (In Russ.).
27. Бондарь В.В., Буртовой А.Г. Способ переработки упорного минерального сырья, содержащего золото, и проходной реактор для его осуществления: Пат. 2428492 (РФ). 2011.
Bondar V.V., Burtovoy, A.G. Method of processing hard minerals containing gold, and passing the reactor for its implementation: Pat. 2428492 (RF). 2011(In Russ.).
28. Секисов А.Г., Мязин В.П., Лавров А.Ю., Попова Г.Ю. Перспективы кучного выщелачивания золота из упорных руд и техногенного минерального сырья с использованием фотоэлектрохимического синтеза активных реагентных комплексов в рабочих растворах. *ГИАБ*. 2015. No. 5. С. 155—159.
Sekisov A.G., Myazin V.P., Lavrov A.Yu., Popova G.Yu. Prospects of heap leaching gold from refractory ores and industrial minerals using photoelectrochemical synthesis of active reagent complexes in working. *GIAB*. 2015. No. 5. P. 155—159.