

Развитие технологий снижения экологического риска при извлечении золота из упорных руд

Я. Ли¹, Л. Жуо², И.В. Шадрунова³✉, А.К. Эрмаматов¹, Т.В. Чекушина³

¹ Горнорудная компания «Full Gold Mining» (Фул Голд Майнинг), г. Бишкек, Республика Кыргызстан

² Научно-экологическая компания «Тяе Цзинь-Синь», г. Бишкек, Республика Кыргызстан

³ Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉shadrunova_@mail.ru

Резюме: Задачей стран, входящих в Евразийский экономический союз, является поиск эффективных технологий получения золота из упорных руд с одновременным снижением экологической опасности производства. Для решения данной проблемы в Кыргызской Республике в процессе изучения альтернативных высокоэффективных реагентов для извлечения золота из золотосодержащих руд разного генезиса был разработан реагент «Цзинь-Синь» (комплекс солей). Совместными исследованиями Горнорудной компании «Full Gold Mining», Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Научно-экологической компании «Тяе Цзинь-Синь» обоснована эффективность применения нового разработанного реагента «Цзинь-Синь». В статье приведены результаты апробации нового реагента на реальном горнопромышленном объекте.

Ключевые слова: упорные руды, золото, сульфидные руды, цианид, хвосты флотации, защита окружающей среды, экология, безопасность труда

Для цитирования: Ли Я., Жуо Л., Шадрунова И.В., Эрмаматов А.К., Чекушина Т.В. Развитие технологий снижения экологического риска при извлечении золота из упорных руд. *Горная промышленность*. 2020;(6):143–147. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-143-147.

Development of Technologies to Reduce Environmental Risk in Extracting Gold from Refractory Ores

Ya. Li¹, L. Zhuo², I.V. Shadrunova³✉, A.K. Ermamatov¹, T.V. Chekushina³

¹ Full Gold Mining Company, Bishkek, Republic of Kyrgyzstan

² Tae Jin Xing Science and Environmental Technology Company, Bishkek, Republic of Kyrgyzstan

³ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉shadrunova_@mail.ru

Abstract: The task of the countries of the Eurasian Economic Union is to look for effective technologies to recover gold from refractory ores while reducing the environmental hazard of the operations. In order to solve this problem, the Jin Xing reactant (a salt complex) was developed in the Kyrgyz Republic in the course of studying alternative highly effective agents for gold recovery from gold-bearing ores of different genesis. Joint studies of the Full Gold Mining Company, the Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences and the Tae Jin Xing Science and Environmental Technology Company justified the application efficiency of the developed Jin Xing reactant. The paper presents the results of testing the new agent at a real mining operation.

Keywords: refractory ores, gold, sulfide ores, cyanide, flotation tailings, environmental protection, ecology, labor safety

For citation: Li Ya., Zhuo L., Shadrunova I.V., Ermamatov A.K., Chekushina T.V. Development of Technologies to Reduce Environmental Risk in Extracting Gold from Refractory Ores. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(6): 143–147. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-143-147.

Введение

Традиционно в технологических операциях по извлечению золота из сульфидных руд используется цианид натрия, его концентрация в рабочем растворе колеблется от 0,01 до 0,05% цианида натрия. На производстве стараются использовать настолько низкие концентрации, насколько это возможно с точки зрения защиты окружающей среды, безопасности и экономики¹ [1; 2].

Сегодня в мире разрабатывают и используют множество технологий для снижения цианида в хвостах до безопасного уровня, минимизируя количество используемого химиката, удаляя его из отработанных вод, перерабатывая и применяя химические или биологические преобразования цианида в менее опасные вещества [3; 4].

Факты случайных утечек цианида в мире тщательно расследовались, что привело к многочисленным реформам в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, направленным на предотвращение подобных

¹ Minerals Council of Australia. Fact Sheet—Cyanide and its Use by the Minerals Industry. 2005.

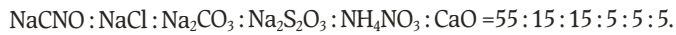
ситуаций в будущем. Одним из таких нововведений стало внедрение Международного кодекса использования цианида (International Cyanide Management Code), который предполагает разработку способов защиты поверхностных и грунтовых вод, создание систем сокращения уровня цианида в стоках и предупреждение утечек [5; 6].

Разработка альтернативных высокоэффективных реагентов для извлечения золота в Республике Кыргызстан

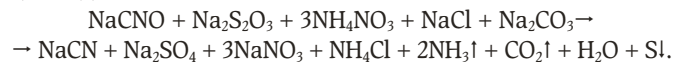
Для решения данной проблемы в Кыргызской Республике в процессе разработки альтернативных высокоэффективных реагентов для извлечения золота из золотосодержащих руд разного генезиса, в том числе техногенных, научно-экологической компанией «Тэе Цзинь-Синь» (рис. 1) был разработан низкотоксичный реагент – комплекс солей, который по степени воздействия на человека относится к разряду умеренно опасных веществ. Реагент назван «Цзинь-Синь» и его предложено использовать на обогатительной фабрике месторождения «Иштамберды» (рис. 2).

Содержание золота в руде – 6,0 г/т. Производительность фабрики – 1500 т/сутки. Применяемая технология – флотационная, выход концентрата составляет 4,5% при извлечении 55%. Хвосты флотации первоначально планировалось подвергнуть кучному выщелачиванию с применением цианида в качестве растворителя золота, который для снижения экологического риска технологии был успешно заменен на реагент Цзинь-Синь. Параметры и режимы выщелачивания хвостов флотации представлены в табл. 1.

Цзинь-Синь – химическая смесь, состоящая из цианата натрия (основной компонент), хлорида натрия (хлористый натрий), карбоната натрия (кальцинированная сода), тисульфата натрия, нитрата аммония и оксида кальция в соотношении:



В результате протекания реакций проходит образование цианида по схеме:



Технологически NaCNO и Na₂S₂O₃ подвергаются внутреннему окислению и восстановлению и образуют цианид натрия, сульфаты и нитраты натрия, хлорид аммония, а также летучие газообразные вещества – аммиак и диоксид углерода, при этом сера выпадает в осадок. Образованный цианид натрия в водной среде подвергается гидролизу с образованием синильной кислоты, соответственно, оксид кальция в составе химической смеси играет роль так называемой «защитной щелочи», предотвращая гидролиз NaCN и выделение в газовую фазу высокотоксичного цианистого водорода HCN. С учетом этих положений процесс выщелачивания золота из руд реагентом Цзинь-Синь проводится строго в щелочной среде (pH = 10,5–11) с применением CaO и/или NaOH.

Показатели выщелачивания хвостов флотации использования реагента Цзинь-Синь и цианида при одинаковых условиях выщелачивания равнозначны, это дает основание утверждать, что использование низкотоксичного реагента Цзинь-Синь для выщелачивания золота из хвостов флотации вполне может заменить традиционный цианид.

Предприятием ОсОО «Full Gold Mining» была инициирована работа по испытанию степени токсичности нового реагента Цзинь-Синь в независимой организации – Институте биотехнологии НАН КР. Испытания проводились на 70 клинически здоровых, нормально развитых лаборатор-



Рис. 1
Офис научно-экологической компании «Тэе Цзинь-Синь», КНР

Fig. 1
Office of the Tae Jin Xing Science and Environmental Technology Company, P.R.C



Рис. 2
Обогатительная фабрика месторождения «Иштамберды», Республика Кыргызстан

Fig. 2
Processing Plant at the Ishtamberdy deposit, Republic of Kyrgyzstan

Таблица 1
Параметры и режимы выщелачивания хвостов флотации

Table 1
Parameters and modes of flotation tailings leaching

Параметры и режимы	Показатели
Исходная крупность	80% класса –0,074 мм
Отношение Т : Ж	1 : 1,5
Расход извести (на 100%-ную активность)	2–3 кг/т
pH пульпы	10,5–11
Загрузка реагента Цзинь-Синь	1,0–1,5 кг/т
Время выщелачивания	6–12 ч
Число стадий выщелачивания	1
Расход воздуха в контактные чаны	0,03 м ³ /мин на 1 м ³ пульпы
Время сорбционного выщелачивания	36–42 ч
Число стадий сорбции	7
Содержание угля при сорбционном выщелачивании	30–40 кг/м ³ пульпы
Поток угля при загрузке регенерированного угля и выводе насыщенного угля из 1-го сорбционного чана	0,8–1,1 кг на 1 т хвостов флотации
Содержание золота в насыщенном угле	1,5–2,5 кг/т
Расход угля за счет механического износа	40 г/т хвостов флотации

ных белых мышах, живой массой 18–25 г по общепринятому в токсикологии методу Кербера. Полученные цифровые материалы обработаны математическим методом с использованием метода Кербера [7]. Средняя смертельная доза данного реагента (ЛД50) для белых мышей была зафиксирована на уровне 344,6 мг/кг, а абсолютная смертельная доза (ЛД100) составила 738,2 мг/кг. На основании экспериментальных данных был сделан вывод, что по «Классификации вредных веществ по степени опасности и функциональному воздействию на организм человека» изучаемый реагент Цзинь-Синь относится к разряду умеренно опасных веществ, т.е. в соответствии с ГОСТ 12.1.007–76. ССБТ «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» данный реагент относится к третьему классу опасности.

Комплексное полупромышленное исследование реагента Цинь-Синь

Горнорудная компания «Full Gold Mining» провела комплексное полупромышленное исследование нового реагента Цинь-Синь для обогатительной фабрики на месторождении «Иштамберды». Предложенная принципиальная технологическая схема производства приведена на рис. 3.

Рациональный анализ показал, что золото в кварце составляет 22,71%, в сульфидных минералах – 76,01%, в сростках – 1,28%. При содержании 65% твердых частиц крупностью 0,045 мм в хвостах флотации, плотности пульпы 40%, расходе CaO 3,0 кг/т, времени контакта 2,0 ч, расходе Цзинь-Синь 1,0 кг/т и периоде выщелачивания 24 ч коэффициент извлечения золота в раствор достигает 62,12% от операции. Причем потери золота на 98,72% (от общего количества золота в кеках) находятся в виде микро- и нановключений.

Хвосты флотации плотностью 20% твердого перекачиваются насосом из контактного чана в отделение 1-й стадии обезвоживания гидрометаллургического цеха, где поступают в три камерных фильтр-пресса, в которых обезвоживаются до 80% твердого. Фильтрат самотеком возвращается в пруд-отстойник флотационной обогатительной фабрики, где очищается от твердых взвесей, и снова используется в циклах измельчения и флотации.

С целью максимально возможного сокращения или полного исключения сбросов сточных вод применяется система полного оборотного водоснабжения. Свежая вода используется только в случаях технической необходимости и для восполнения потерь (количество не превышает 8–12% от общего водопотребления), что позволит стабилизировать водные балансы в технологии.

Выщелачивание золота осуществляется реагентом Цинь-Синь. Сорбцию золота из пульпы осуществляют с применением активированного угля.

Аппаратурная схема процесса «уголь в пульпе» включает восемь агитаторов с механическим перемешиванием и непрерывно противоточным движением пульпы и угля. Пульпа хвостов флотации плотностью 40% насосом подается в чаны выщелачивания с реагентом Цинь-Синь, затем поступает в чаны сорбции с активированным углем.

Полная технологическая схема переработки насыщенного угля включает десорбцию золота раствором 5% NaOH при температуре 130–150 °С и давлении 400–450 кПа, кислотную обработку угля 3%-ной соляной кислотой до pH < 2, отмывку кислоты водой до pH 6–7, реактивацию угля при температуре не ниже 700 °С, грохочение реактивированного угля для отсева мелочи, фильтрацию товарного регенерата, электролитическое извлечение золота из товарного

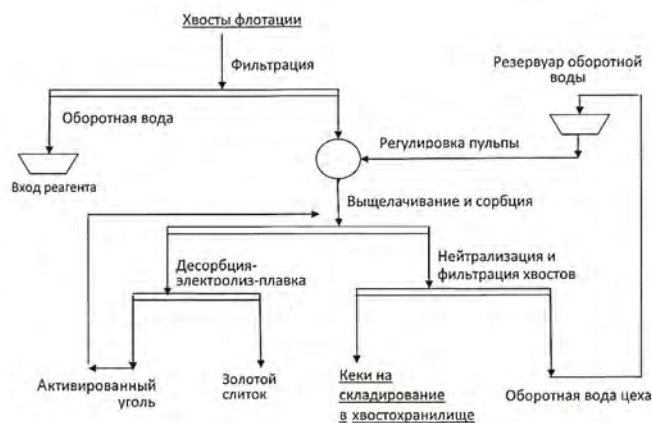


Рис. 3 Принципиальная схема переработки хвостов флотации

Fig. 3 Schematic processing diagram of flotation tailings

регенерата, обработку катодного осадка кислотой для удаления неблагородных металлов/серебра и извлечение серебра из кислого раствора (операция проводится при необходимости получения отдельных слитков золота и серебра), плавку катодного осадка на сплав Доре.

Процесс сорбции золота из выщелачивающего раствора осуществляется при pH 10,5–11 в присутствии ионов кальция, в порах активированного угля идет образование карбоната кальция, что приводит к снижению сорбционной емкости угля и ухудшению кинетики сорбции. Для восстановления сорбционных свойств угля производят кислотную обработку соляной кислотой до процесса десорбции золота, либо после десорбции. Увеличение содержания кальция в угле, подаваемом на десорбцию, с 1 до 5% приводит к повышению остаточного содержания золота в регенерированном угле в 2,5–5 раз.

Одним из недостатков активированных углей является их повышенная чувствительность к органическим соединениям, таким как флотационные реагенты. В результате отравления угля снижается кинетика сорбции и сорбционная емкость угля. Для восстановления активности угля проводят традиционные операции: производят высокотемпературную регенерацию (реактивацию) угля в печи без доступа воздуха; регенерацию угля ведут в горизонтальных вращающихся печах; уголь после реактивации разгружается в воду для закалки.

Переработка товарных золотосодержащих элюатов, полученных в процессе десорбции золота, осуществляется электролитическим методом. Катод – стальная вата, имеющая большую развернутую поверхность для улучшения кинетики осаждения золота. Аноды – чаще всего пластины или сетки из нержавеющей стали. Плавка осуществляется в индукционной печи с получением готового продукта – сплава Доре.

Процесс обезвоживания хвостов выщелачивания происходит аналогично процессу обезвоживания хвостов флотации. Максимальное обезвоживание конечных хвостов обеспечивает систему полного оборотного водоснабжения обогатительной фабрики и цеха гидрометаллургии с минимальным восполнением водопотребления. Содержание вредных веществ в конечных хвостах минимально из-за содержания влаги равной порядка 20%, что является положительным фактором для экологически безопасного захоронения хвостов.

Приготовление 20%-ного раствора реагента Цинь-Синь

происходит следующим образом: запуск вентиляции участка и агитатора чана растворения (Ø2000x2000); заполнение чана растворения свежей водой до уровня 50% и доведение pH раствора до 12–12,5 путем добавления расчетного количества 10% раствора NaOH или сухого реагента NaOH; последовательный подъем и разгрузка содержимого расчетного количества мешков с реагентом внутрь загрузочного бункера чана; доведение уровня заполнения до 80% свежей водой, перемешивание раствора в течение 1,5 ч и остановка агитатора; перекачка готового 20%-ного раствора с помощью насоса в чан хранения для дальнейшей подачи в чаны выщелачивания.

Основные исходные данные для расчета водного баланса выполнены Проектным институтом «Золото», г. Санменся. Произведен расчет расхода основных материалов и реагентов (табл. 2). Для работы цеха «СР» проектом предусмотрен отдельно стоящий расходный склад реагентов, время хранения реагентов составляет 30 дней. Объем баковой аппаратуры реагентного отделения с насосными станциями обеспечивает суточную потребность в реагентах.

Таблица 2
Расход основных материалов цеха гидрометаллургии

Table 2
Consumption of basic materials in the hydrometallurgical shop

Наименование	Удельный расход	Общий расход за год
Известь, кг	3,00	900 000
Реагент Цинь-Синь, кг	1,00	300 000
Активированный уголь, кг	0,04	9000
Конвейерная лента, м ²	0,05	15 000
Сетка на грохоты, кг	0,02	6000
Смазочные масла, кг	0,10	30 000
Фильтровальная ткань, кг	0,10	30 000
Запасные части насоса, кг	0,15	45 000
Электроэнергия, кВт.ч	30,88	926,28*10 ⁴

Химико-аналитическая лаборатория (рис. 4) находится вблизи от обогатительной фабрики, поэтому анализ проб и технологические испытания осуществляются в непрерывном режиме. Рабочие помещения лаборатории, в которых проводится анализ продуктов, содержащих реагент Цинь-Синь (пульпа сорбции выщелачивания, десорбент и т.п.), оборудованы принудительной приточно-вытяжной вентиляцией и местными отсосами из шкафов и других очагов газовыделений. Работы, связанные с выделением вредных для здоровья газов, паров, пыли, должны производиться в вытяжных шкафах, оборудованных надёжной вентиляцией.

В отделениях гидрометаллургического цеха, где применяется реагент Цинь-Синь, устанавливаются газоанализаторы, сигнализирующие о наличии в воздухе токсичных веществ в концентрациях, превышающих ПДК. За качеством выбрасываемого воздуха осуществляется постоянный контроль с отбором проб на рабочих местах. Предусматривается ежегодный обязательный профилактический медицинский осмотр всего персонала предприятия. Цех гидрометаллургии по санитарной классификации относится к I классу с размером санитарно-защитной зоны – 500 м².

Цианат натрия (основной компонент реагента Цинь-Синь) не входит в Перечень сильнодействующих ядовитых веществ, в отношении которых применяется порядок приобретения, сбыта и хранения, учета и перевозки, утвержденного постановлением Правительства Кыргызской Республики от 21.09.1999 № 513 «Об утверждении Инструкции о порядке приобретения, сбыта и хранения, учета и перевозки сильнодействующих ядовитых веществ в Кыргызской Республике». Тем не менее необходимо, чтобы перевозкой, обращением и переработкой реагента Цинь-Синь занимался обученный персонал с использованием сертифицированных средств, например, специальных контейнеров, размещение и сброс отходов в окружающую среду также подлежат жесткому мониторингу.

В случае обнаружения опасного воздействия вновь применяемых реагентов на человека или окружающую среду (выявляемых предварительно установленными специальными приборами – датчиками, сигнализаторами) техноло-



Рис. 4
Лаборатория оснащена высокотехнологичным оборудованием для экспресс-анализа

Fig. 4
The laboratory is equipped with hi-tech instruments for express analysis

² Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. Сан ПИН 2.2.1/2.1.1. 006-03.

гические процессы проводятся далее при соблюдении технологии и мер безопасности, аналогичных применяемым при извлечении золота способом цианирования.

Заключение

Все вышеперечисленное дает основание утверждать, что замена на обогатительной фабрике «Иштамберды»

традиционного цианида на разработанный реагент Цзинь-Синь является технологически обоснованным решением, возможность его широкого использования с максимально низкой угрозой для окружающей среды и минимальным негативным влиянием на жизнеобеспечение населения региона.

Список литературы

1. Tran T., Lee K., Fernando K. Halide as an alternative lixiviant for gold processing – an update. In: Young C.A., Twidwell L.G. Anderson C.G. (eds). *Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects. The Minerals. Metals and Materials Society*. Warrendale, PA, USA; 2001. P. 501–508.
2. Botz M.M. Overview of Cyanide Treatment Methods. *Mining Environmental Management*. 2001;(May):28–30. Available at: <http://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/cyanide.destruction.overview.pdf>.
3. Емельянов Ю.Е., Богородский А.В., Баликов С.В., Епифоров А.В. Сопоставительная оценка вариантов переработки упорных флотоконцентратов. *Цветные металлы*. 2012;(8):10–12. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/893/article/14069/>
4. Шадрунова И.В., Провалов С.А., Горлова О.Е., Фадеева Н.В. *Адаптация методов обогащения для доизвлечения золота из лежащих хвостов золотоизвлекательных фабрик*. М.: ИПКОН РАН; 2009. 196 с.
5. Anderson C.G. NSC Pressure Leaching: Industrial and Potential Application. In: *Hydrometallurgy 2008: Proceedings of the 6th International Symposium*. ALTA, Perth, West Australia, June 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288431014_NSC_Pressure_Leaching_Industrial_and_Potential_Applications
6. Adams M.D. Summary of gold plants and processes. In: Adams M.D., Wills B.A. (eds) *Advances in Gold Ore Processing*. Elsevier; 2005. Vol. 15. P. 994–1013.
7. Бельский М.Л. *Элементы количественной оценки фармакологического эффекта*. 2-е изд. Л.: Медгиз; 1963. 152 с.

References

1. Tran T., Lee K., Fernando K. Halide as an alternative lixiviant for gold processing – an update. In: Young C.A., Twidwell L.G. Anderson C.G. (eds). *Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects. The Minerals. Metals and Materials Society*. Warrendale, PA, USA; 2001. P. 501–508.
2. Botz M.M. Overview of Cyanide Treatment Methods. *Mining Environmental Management*. 2001;(May):28–30. Available at: <http://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/cyanide.destruction.overview.pdf>.
3. Emelyanov Yu.E., Bogorodskiy A.V., Balikov S.V., Epiforov A.V. The assessment of options for processing refractory flotation concentrates. *Tsvetnye Metally*. 2012;(8):10–12. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/893/article/14069/>
4. Shadrunova I.V., Provalov S.A., Gorlova O.E., Fadeeva N.V. *Concentration methods adaptation for gold extraction from stale waste of gold factory*. Moscow: Institute for Problems of Integrated Development of Subsoil of the Russian Academy of Sciences; 2009. 196 p. (In Russ.)
5. Anderson C.G. NSC Pressure Leaching: Industrial and Potential Application. In: *Hydrometallurgy 2008: Proceedings of the 6th International Symposium*. ALTA, Perth, West Australia, June 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288431014_NSC_Pressure_Leaching_Industrial_and_Potential_Applications
6. Adams M.D. Summary of gold plants and processes. In: Adams M.D., Wills B.A. (eds) *Advances in Gold Ore Processing*. Elsevier; 2005. Vol. 15. P. 994–1013.
7. Belenky M.L. *Elements of quantitative assessment of drug-induced effect*. 2nd ed. Leningrad: Medgiz; 1963. 152 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Ли Яохуэй – президент горнорудной компании «FullGoldMining», (Фул Голд Майнинг), г. Бишкек, Республика Кыргызстан

Жуо Лянсай – президент научно-экологической компании «Тас Цзинь-Синь», г. Бишкек, Республика Кыргызстан

Шадрунова Ирина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом горной экологии, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, академик Евразийской горной академии, г. Москва, Российская Федерация

Эрмаматов Акылбек Куштарович – вице-президент по производству и инновационным технологиям горнорудной компании «Full Gold Mining» (Фул Голд Майнинг), г. Бишкек, Республика Кыргызстан

Чекушина Татьяна Владимировна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.10.2020

Поступила после рецензирования: 02.11.2020

Принята к публикации: 16.11.2020

Information about the author

Li Yaohui – President of Full Gold Mining Company, Bishkek, Republic of Kyrgyzstan

Zhuo Liangcai – President of Tae Jin Xing Science and Environmental Technology Company, Bishkek, Republic of Kyrgyzstan

Irina V. Shadrunova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mining Ecology, Chief Research Associate at the Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of RAS, Academician of the Eurasian Academy of Mining Sciences, Moscow, Russian Federation

Akylbek K. Ermamatov – Vice President for Production and Innovation Technologies, Full Gold Mining Company, Bishkek, Republic of Kyrgyzstan

Tatiana V. Chekushina – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Leading Research Associate at the Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of RAS, Moscow, Russian Federation

Article info:

Received: 20.10.2020

Revised: 02.11.2020

Accepted: 16.11.2020