УДК 622.755

С.Б.ТАТАУРОВ, *канд. техн. наук, доцент, tataurovsb@mail.ru*
Министерство образования и науки Российской Федерации

S.B.TATAUROV, *PhD in eng. sc., associate professor, tataurovsb@mail.ru*
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА С ПРИМЕНИЕМ КРИОГЕННОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУД

Широкое развитие кучного выщелачивания золота на территориях распространения многолетнемерзлых горных пород приводит к необходимости модернизации геотехнологий. В частности, рассматривается задача совершенствования геотехнологий кучного выщелачивания золота с применением криогенной дезинтеграции золотосодержащих руд. Такая постановка задачи может служить первым шагом к созданию современных геокриотехнологий добычи полезных ископаемых при отрицательных температурах.

Ключевые слова: криодезинтеграция, кучное выщелачивание, золотосодержащие руды, циклическое замерзание-оттаивание, криолитозона.

TECHNOLOGICAL ADVANCEMENT OF GOLD HEAP LEACHING GEOTECHNOLOGY WITH CRYOGENIC ORE DESINTEGRATION

Widespread development of gold leaching in areas of permafrost soil demands geotechnology modernization. In particular, the paper studies enhancement of gold heap leaching geotechnologies with cryogenic gold ore disintegration. Such statement of the problem can become the first step in creation of modern mining cryotechnologies in conditions of sub-zero temperatures.

Key words: cryodisintegration, heap leaching, gold ores, cyclic freeze-thaw, permafrost zone.

В теории и практике кучного выщелачивания (КВ) золота существует проблема вскрытия упорных золотосодержащих руд без их переизмельчения и снижения фильтрационных свойств штабеля. Эта проблема может быть решена с использованием естественных или искусственных энергетических воздействий, позволяющих интенсифицировать вскрытие золотосодержащих руд. В число наиболее перспективных технических решений по использованию искусственных энергетических воздействий на руды входят методы: СВЧ-нагрева, действия энергией ускоренных электронов и электрохимические [7]. Однако по своей природе эти высокотехнологичные методы энергоемки и малопроизводительны. Поэтому их использование до сих пор ограничивается применением при рудоподготовительных операциях на обогатительных фабриках. В этой связи поиск наиболее дешевых и высокопроизводительных физических и физико-химических методов интенсификации рудоподготовки золотосодержащих руд в геотехнологиях остается актуальным. Одним из решений данной проблемы в условиях криолитозоны является использование геокриотехнологий, в частности, криодезинтеграции золотосодержащих руд [5, 6].

Криодезинтеграция является методом раскрытия минералов путем раскалывания руды по межминеральным границам без их переизмельчения в результате расклинивающего действия льда. Механизм этого

процесса заключается в увеличении объема воды в трещинах руды при переходе ее в лед на 9 %, что объясняется спецификой межмолекулярных взаимодействий, характерных для структуры льда.

Для обоснования повышения скорости растворения и выщелачивания золота с применением метода криодезинтеграции нами было использовано уравнение скорости растворения и выщелачивания вещества при повышении концентрации растворенного вещества C в жидкой фазе с позиции гетерогенного процесса массопередачи

$$dC/dt = kS(C_{нас} - C), \qquad (1)$$

где S – площадь растворяемой поверхности; k константа скорости растворения или выщелачивания.

Увеличение площади растворяемой поверхности золотосодержащих руд при циклическом воздействии методом криодезинтеграции определяли через показатель относительной криогенной трещинной пустотности

$$k_i = \frac{S_2 - S_1}{S_2} n, \qquad (2)$$

где S_1 – площадь трещинной пустотности руды до воздействия на нее криогенных факторов; S_2 – площадь трещинной пустотности руды после воздействия метода криодезинтеграции.

Из условия, что криогенная дезинтеграция руд есть изменение общей площади свободной поверхности дробленой руды в штабеле за один цикл замерзания-оттаивания (ЦЗО), следует

$$S_c = k_i S, \qquad (3)$$

где S_c – прирост площади растворяемой поверхности в результате воздействия метода криодезинтеграции, м^2

В результате уравнение (1) с учетом воздействия количества циклов замерзания-оттаивания и петрографического состава руды, примет вид

$$dC/dt = k(S + S_c)(C_{нас} - C). \qquad (4)$$

Расчет параметров уравнения скорости растворения вещества в жидкой фазе проводится путем решения обратной задачи из полученного регрессионного уравнения полинома второй степени по результатам экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования воздействия криодезинтеграции на геотехнологические свойства коренных руд проводились на примере золотокварцевых сульфидных руд с содержанием глинистых минералов 6,0 % и низкой площадью трещинной пустотности от 2 до 7,5 % и золотокварцевых малосульфидных руд с содержанием глинисто-слюдистых минералов 30 % и высокой площадью трещинной пустотности от 11,16 до 50,65 %.

Для экспериментального обоснования использования метода криодезинтеграции при рудоподготовке были выполнены исследования на золотокварцевых сульфидных и малосульфидных рудах месторождений Дарасун и Дельмачик и золотокварцевого месторождения Погромное с использованием оптико-геометрического анализа и метода наложения светового спектра (рис.1).

В результате было установлено, что криодезинтеграция увеличивает показатель относительной криогенной трещинной пустотности в зависимости от содержания глинистых фракций, структурной прочности и условий (аэральных, аквальных и нивальных) для магматических золотокварцевых малосульфидных и золотокварцевых сульфидных руд от 0,12 до 0,35, тогда как для метаморфизованных кварцитовых руд – от 0,15 до 0,5 (см. таблицу).

Кроме того, было изучено влияние различных условий криодезинтеграции на изменение свойств крепких золотосодержащих руд – коэффициента крепости (по методу проф. Протодьяконова), влагонасыщения и скорости выщелачивания золота.

В частности, установлены температурные границы интенсивного снижения коэффициента крепости руды за один цикл замерзания-оттаивания руд в аэральных (в воздушно-сухом состоянии), аквальных (в увлажненном состоянии) и нивальных условиях (моделирование теплового удара с замерзанием-оттаиванием в увлажненном состоянии) в зависимости от изменения темпера-

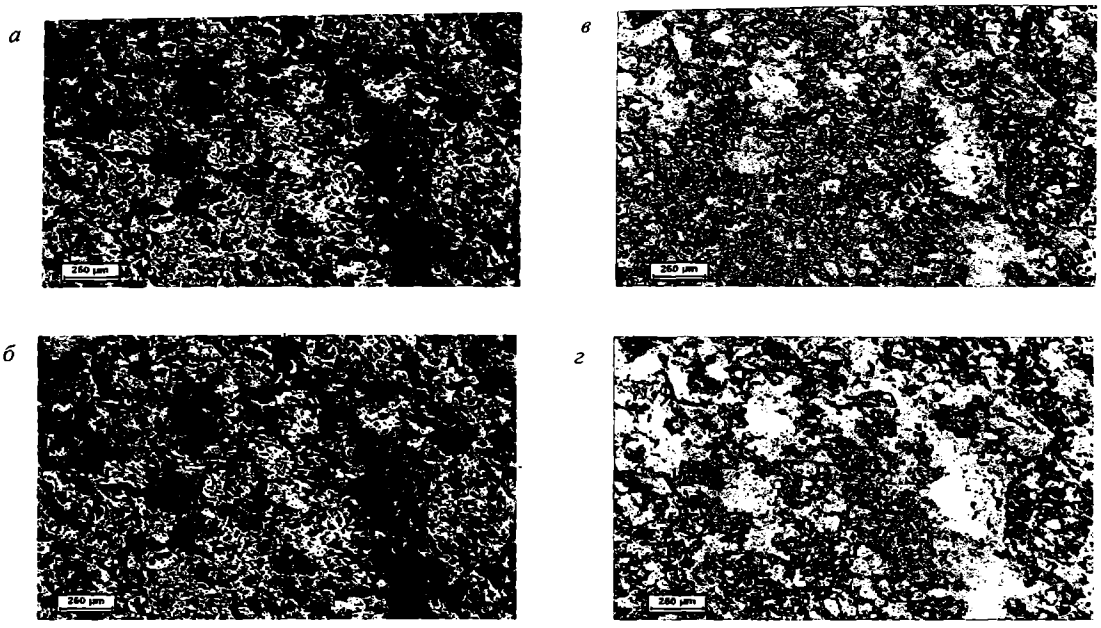


Рис.1. Микрофотографии шлифов руды месторождения Дельмачик до (*а*, *в*) и после (*б*, *г*) воздействия криодезинтеграции в аквальных условиях в отраженном свете (*а*, *б*) и с наложением светового спектра (*в*, *г*)

Показатель относительной криогенной трещинной пустотности для некоторых типов руд месторождений золота криолитозоны

Генетический тип месторождений	Геолого-промышленный тип	Вмещающие породы	k_i			Примеры месторождений
			air	aq	nv	
Магматический	Золотокварцевый малосульфидный	Гранодиориты, габброиды, граниты	0,13	0,21	0,35	Дельмачик, Советское
	Золотокварц-сульфидный	Диориты, габброиды, сиениты	0,12	0,16	0,3	Дарасун, Березовское
Метаморфизованный	Кварцитовый золото-содержащий	Сланцы, песчаники	0,15-0,17	0,3-0,35	0,45-0,5	Погромное, Таборное

Примечание. air -аэральные, aq – аквальные, nv – нивальные условия криодезинтеграции.

туры в области отрицательных значений (рис.2): для аэральных условий от 0 до –3 °С; для аквальных и нивальных условий от 0 до –7 °С [6].

Дальнейшее понижение температур в области отрицательных значений до –25 °С при ЦЗО на снижение крепости руды в аэральных условиях криогенеза существенного влияния не оказало, в то время как в аэральных и нивальных условиях изменения крепости руды продолжали наблюдаться, но при значительно меньшей интенсивности. Установленная закономерность характерна как для золотокварцевых сульфидных руд, так и для золотокварцевых малосульфидных руд. В связи с большим количеством глинистых минералов (~30 %), характеризующихся высокой гидрофильностью и низкой структурной прочностью в золотокварцевых малосульфидных рудах, отмечено более ощутимое снижение крепости при воздействии криогенеза.

На основе результатов экспериментальных исследований получено регрессионное уравнение, экспоненциально описывающее изменение коэффициента крепости

руды от температуры при одном цикле промерзания-оттаивания:

$$f = y_0 + ae^{T/b} \text{ при } b = \frac{1}{\lambda} \qquad (5)$$

или

$$f = f_0 + ae^{\lambda T}$$

$$T_0 \le T \le 0,$$

тогда

$$f(0) = f_0 = y_0 + a \to a =$$

$$= f_0 - y_0 \to f(T) = y_0 + (f_0 - y_0)e^{\lambda T} \qquad (6)$$

где f – коэффициент крепости руды после воздействии криогенеза; f_0 – коэффициент крепости исходной руды; T – температура в ветви отрицательных значений, °С; y_0, a, b – расчетные коэффициенты уравнения, зависящие от условий криогенеза и типа руд.

Коэффициенты корреляции шести статических моделей изменяются от 0,99 до 0,93, что подтверждает надежность каждой из построенной модели.

Механизм снижения коэффициента крепости золотосодержащих руд при воздействии криогенеза на основании результатов исследований В.Н.Конищева [4] объясняется частичным разрушением внутренних структурных связей за счет расклинивающего действия льда (при замерзании) и тонких пленок воды (при оттаивании), адсорбированных на стенках микротрещин. Результатом этих явлений является увеличение в рудах содержания открытых пор, что соответственно приводит к увеличению влагонасыщения и степени раскрытия минеральных комплексов.

Для количественной оценки изменения содержания открытых пор в ходе криогенеза использовались значения влажности, характеризующие влагонасыщение руд. Установлено, что в аэральных условиях криогенеза (цикле промерзания-оттаивания) при изменении отрицательных температур от –1 до –25 °С, влагонасыщение малосульфидных руд увеличилось на 6,25 %, сульфидных – на 5,9 %, в аквальных – соответственно на 13,8 и 9,1 %, в нивальных – соответственно на 30,7 и 16,4 %.

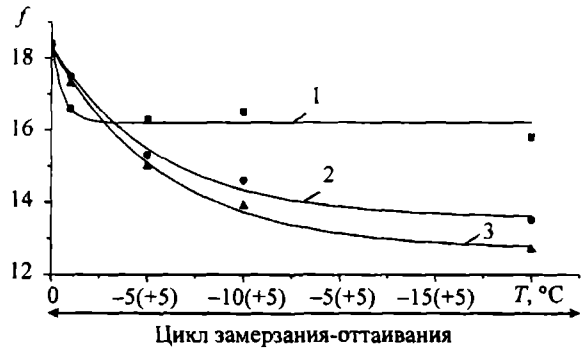


Рис.2. Изменение коэффициента крепости золотокварцевой руды месторождения Дельмачик (по методу проф. Протодьяконова) в зависимости от условий криогенеза: 1, 2, 3 – соответственно золотокварцевая руда после воздействия криогенеза в аэральных, аквальных и нивальных условиях; R^2 – коэффициент детерминации (1 – R^2 = 0,93; 2,3 – R^2 = 0,99)

Для оценки влияния метода криодезинтеграции на скорость кучного выщелачивания крепких золотосодержащих руд был применен наиболее эффективный и экологически безопасный метод – йодидное выщелачивание золота.

Цикл исследований по выщелачиванию золотосодержащей руды до и после криодезинтеграции показал, что для руды, не подверженной воздействию криодезинтеграции, максимальное содержание золота в растворе составило 4,7 мг/л при средней скорости выщелачивания в течение 72 ч – 0,14 мг/(л·ч).

Для руды после воздействия криодезинтеграции в аэральных условиях (без орошения водой) максимальное содержание золота в растворе составило 5,3 мг/л, в то время как для руды после криодезинтеграции в аквальных условиях (с предварительным орошением водой) – 5,8 мг/л, в нивальных условиях – 6,8 мг/л. Изменение средней скорости выщелачивания золота из руд, подвергнутых криодезинтеграции в течение 72 ч, составило для аэральных условий 0,17 мг/(л·ч), аквальных – 0,19 мг/(л·ч) и нивальных (с предварительным орошением водой и последующим воздействием тепловым ударом при оттаивании руд 0,23 мг/(л·ч).

Основные технологические параметры усовершенствованной геотехнологии кучно-

го выщелачивания золота с применением криодезинтеграции крепких золотосодержащих руд в условиях криолитозоны базируются на результатах теоретических, экспериментальных, лабораторных и полупромышленных испытаний, а также технико-экономических показателях работы российских и зарубежных предприятий.

В частности, геотехнология кучного выщелачивания золота из крепких руд с применение цианидных растворов включает следующие операции: дробление крепких руд до крупности –20 мм, складирование руды в рудные массивы или на площадку выщелачивания, сезонное промораживание-оттаивание (криодезинтгерация) массива руды (I этап), кучное цианидное выщелачивание в летний период, сезонное промораживание-оттаивание (криодезинтеграция) остатков выщелачивания (II этап), проведение повторного кучного выщелачивания остатков с последующей криоконсервацией отвала (рис.3).

По сравнению с традиционной схемой кучного цианидного выщелачивания золота модернизированная геотехнология включает предварительную криодезинтегацию руды в массиве путем циклического сезонного замерзания-оттаивания (СЗО). Мощность штабеля должна соотвествовать глубине СЗО, характерной для данной территории криолитозоны; по данным геокриологических исследований на терриотории криодитозоны России она может изменяться до 5 м [1-3].

В ходе исследований по выщелачиванию руды было установлено, что после проведения первой стадии криодезинтеграции руды в массиве, с учетом условий криодезинтгерации и характеристик руд, продолжительность периода выщелачивания сокращается до 30 %, а извлечение золота, за счет увеличения удельной площади трещинной пустотности руд, увеличивается на 5-10 %. В частности, при выщелачивании золота из малосульфидных руд месторождения Дельмачик извлечение в зависимости от условий криодезинтеграции (увлажненный (аквальный), увлаженный с тепловым ударом (нивальный)) соответственно составило 88 и 93,1 %.

Базовые параметры и режимы кучного цианидного выщелачивания золотосодержащих крепких руд (с применением криодезинтеграции штабеля руды) показаны ниже:

Наименование параметра	Значение
Сезонная производительность установки, тыс.т	150
Содержание золота в товарной руде, г/т	> 1
Режим рудоподготовки, включая криодезинтгерацию	Круглогодичный
Режим работы установки кучного выщелачивания	Сезонный
Продолжительность сезона эксплуатации при использовании традиционных растворов (цианидное выщелачивание), сут	120-140
Крупность руды, направляемой на кучное выщелачивание, мм	–20 +0
Тип гидроизоляционного основания под размещение штабеля	Одноразового использования
Высота штабеля, м	Определяется из расчета глубины СЗО для данной территории
Общая высота штабеля (при выщелачивании руды в две очереди), м	5-7
Продолжительность полного цикла выщелачивания, сут	55-65
Рекомендуемая схема подготовки руды	Двухстадиальное дробление
Суммарное извлечение золота из руды, %	
после I цикла криодезинтеграции (увлажненная руда)	81-91
после II цикла криодезинтеграции хвостов выщелачивания (увлажненная руда)	87-96
Расход реагентов на 1 т руды, кг	
Цианид натрия (100 % NaCN)	0,4-0,45
Гидрооксид натрия (NaOH)	0,1-0,2

Круглодогодичный режим работы предприятия обеспечивается технологией рудоподготовки, включающей операции дробления и криодезинтеграции руды в массиве штабеля, с последующим кучным выщелачиванием золота в теплый период.

Для доизвлечения золота из остатков кучного выщелачивания применяется вторая стадия криодезинтеграции, в результате прирост золота после повторного выщелачивания достигает 4-9 %. Период выщелачивания составляет 10-15 сут, дальнейшее продолжение кучного выщелачивания золота будет неэффективно.

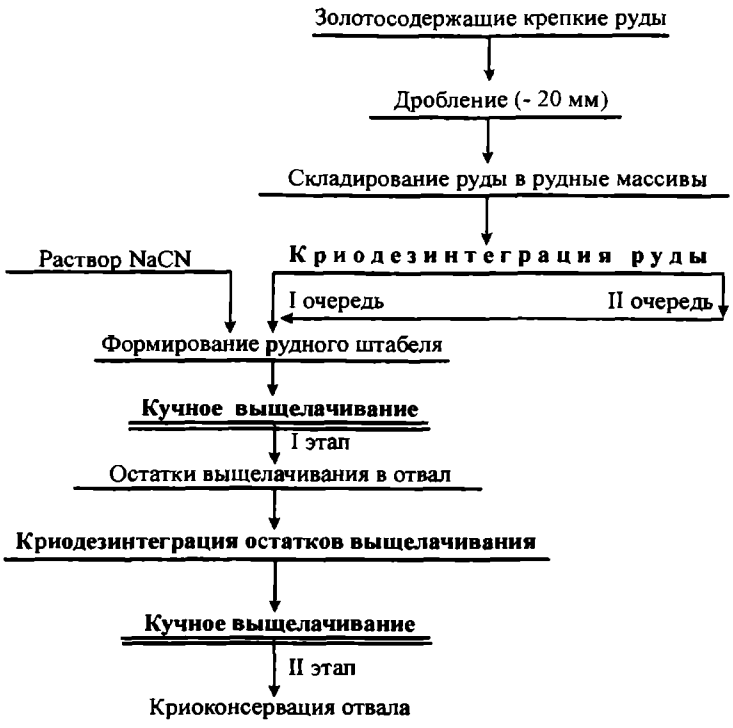


Рис.3. Принципиальная геотехнологическая схема кучного цианидного выщелачивания золотосодержащих крепких руд с применением криодезинтеграции рудного штабеля КВ

Таким образом, применение двух стадий криогенной дезинтеграции в геотехнологиях кучного выщелачивания золота, находящейся в увлажненном состоянии, позволяет увеличить суммарное извлечение золота до 96 %.

Выводы

1. Установлены закономерности скорости кучного выщелачивания золота от изменения прочностных характеристик и водонасыщения золотосодержащих руд при циклических колебаниях температур и условий криолитогенеза (аэральных, аквальных и нивальных):

• снижение коэффициента крепости руд экспоненциально зависит от понижения температур в ветви их отрицательных значений, что приводит к дифференциации геотехнологических свойств руд по скорости выщелачивания золота после их оттаивания в массивах естественного и техногенного происхождения (месторождений золота, штабелей КВ) по вертикальному разрезу криолитосферы;

• максимальное снижение коэффициента крепости руды в режиме одного цикла промерзания-оттаивания наблюдается при охлаждении руды до отрицательной температуры от 0 до –7 °С в зависимости от вида испытаний.

2. Математически обоснован метод криодезинтеграции крепких руд для кучного выщелачивания золота, характеризующийся приростом площади растворяемой поверхности руды вследствие увеличения трещинной пустотности руды в результате расклинивающего действия льда (при циклическом замерзании-оттаивании).

3. Для оценки структурно-технологических параметров руд, прошедших стадию криодезинтеграции, обоснована необходимость использования показателя относительной криогенной трещинной пористости, оцениваемого при помощи оптико-геометрического анализа в совокупности с предложенным методом наложения светового спектра.

4. Предложена геотехнология кучного цианидного выщелачивания золота с применением криогенной дезинтеграции руд в штабеле и установлены ее базовые параметры и режимы. Показано, что после проведения первой стадии криодезинтеграции руды в массиве, с учетом условий криодезинтеграции и характеристик руд, продолжительность периода выщелачивания сокращается до 30 %, а извлечение золота за счет увеличения удельной площади трещинной пустотности руд увеличивается на 5-10 %; после применения второй стадии криодезинтеграции и последующего повторного выщелачивания прирост золота достигает 4-9 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д.Ершова. М.: Недра, 1989. С.139-143.

2. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д.Ершова. М.: Недра, 1988. 357 с.

3. *Ершов Э.Д.* Общая геокриология: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.

4. *Конищев В.Н.* Криогенное выветривание // II Межд. конф. по мерзлотоведению: Доклады и сообщения // Якутск. Вып.3. 1973.

5. *Татауров С.Б.* Теоретические исследования воздействия криогенеза на рудоподготовку золотосодержащего сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 8. М.: Изд-во МГГУ, 2007. С.249-255.

6. *Шестернев Д.М.* Исследование криогенной дезинтеграции золотокварцевых руд для интенсификации процесса кучного выщелачивания золота / Д.М.Шестернев, В.П.Мязин, С.Б.Татауров // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. 2006. № 1. С.108-116.

7. *Чантурия В.А.* Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Электронный научно-информационный журнал «Вестник ОГГГГН РАН». № 4(6), 98. М.: ОИФЗ РАН, 1998.

REFERENCES

1. Geocryology of the USSR. Uplands of the Southern USSR / Edited by E.D.Yershov. Moscow: Nedra Publishing House, 1989. P.139-143.

2. Geocryology of the USSR. European Part of the USSR / Edited by E.D.Yershov. Moscow: Nedra Publishing House, 1988. P.357.

3. *Yershov E.D.* General Geocryology / Textbook. Moscow: Publishing House of the Moscow State University, 2002. P.682.

4. *Konischev V.N.* Cryogenic Weathering / 2nd International Conference on Permafrost Studies: Papers and Reports // Yakutsk. Vol.3ю 1973.

5. *Tataurov S.B.* Theoretical Studies of Cryogenetic Impact on Gold Ore Preparation / Mining Informational and Analytical Journal. N 8. Moscow: Publishing House of the Moscow State Mining University, 2007. P.249-255.

6. *Shesternev D.M., Myazin V.P., Tataurov S.B.* Studies of Cryogenic Disintegration of Gold-Quartz Ores in order to Enhance Gold Heap Leaching Process // Physical and Engineering Challenges in Mineral Deposit Developing. 2006. N 1. P.108-116.

7. *Chanturia V.A.* Current Challenges of Mineral Raw Material Processing in Russia // Electronic research and informational journal «Bulletin of Department of Geology, Geophysics, Geochemistry and Mining Sciences of the RAS». N 4(6), 98. Moscow: United Institute of the Earth Physics of RAS, 1998.