

УДК 669.213:669.2./8.046.8
 DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-6-31-39

ЛЕЖАЛЫЕ ХВОСТЫ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-КОЛЧЕДАННЫХ РУД ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА: АНАЛИЗ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА

STALE TAILINGS OF COPPER-CRUSTED ORES FLOTATION WITH THE POSSIBILITY OF GOLD AND SILVER SELECTIVE EXTRACTION: RESOURCE POTENTIAL ANALYSIS



Н. Л. Медяник,
Магнитогорский
государственный
технический университет
им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск
medyanikmagnitka@mail.ru



Е. В. Леонтьева,
ООО «УралЭнергоресурс»,
г. Магнитогорск
allen_28@mail.ru



О. А. Мишурина,
Магнитогорский
государственный
технический университет
им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск
olegro74@mail.ru



Э. Р. Муллина,
Магнитогорский
государственный
технический университет
им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск
e.mullina@inbox.ru

N. Medyanik,
Magnitogorsk State Technical
University named after
G. I. Nosov, Magnitogorsk

E. Leontieva,
UralEnergoresurs LLC,
Magnitogorsk

O. Mishurina,
Magnitogorsk State Technical
University named after
G. I. Nosov, Magnitogorsk

E. Mullina,
Magnitogorsk State Technical
University named after
G. I. Nosov, Magnitogorsk

Дан анализ эффективности переработки лежальных хвостов флотационных фабрик медно-колчеданного комплекса. Рассмотрен ресурсный потенциал, вещественный состав и технологические возможности переработки ряда техногенных объектов. Проанализирована взаимосвязь и влияние минералогических и технологических факторов на выбор технологии переработки хвостов. Представлены результаты химического, минерального и фазового анализа лежальных хвостов флотации исследуемых колчеданных руд. По результатам комплекса исследований установлено, что лежальные хвосты флотации медно-колчеданных руд относятся к труднообогатимому виду георесурсов из-за высокого содержания пирита и низкого, на уровне миллионных долей, содержания золота и серебра, присутствующих преимущественно в «упорных» минералах – халькогенидах, сульфидах, их сростках. В работе использован факторный анализ условий формирования элементного состава хвостов: минералогических, технологических и экологических. Проанализирована территориальная доступность и технологическая возможность исследуемых техногенных образований. В ходе экспериментальных исследований вскрыт элементный состав лежальных хвостов – основными составляющими которых являются железо, сера, кремний и алюминий. По результатам рентгенофазного анализа установлено, что главнымрудным минералом хвостов является пирит. При этом отмечено, что основная доля золота в лежальных хвостах флотации представлена в виде сульфидов в форме тонкодисперсных и изоморфных включений. Неоднородный морфометрический и минеральный состав сульфидных агрегатов, их трудная раскрываемость и высокая дисперсность характеризуют лежальные хвосты как труднофлотируемое сырье. Выявленные особенности вещественного состава лежальных хвостов указывают на невозможность извлечения ценных компонентов (золота и серебра) из данного ресурса существующими традиционными технологиями. Доказано, что эффективно извлечь драгоцен-

ные металлы из данной категории сырья возможно только после их глубокого вскрытия химической переработкой.

Актуальность исследований заключается в необходимости переработки золотосодержащих техногенных отходов с целью значительного расширения сырьевой базы горных предприятий, а также с целью оздоровления экологической ситуации градообразующих горных предприятий Южного Урала.

Цель исследования – определить вещественный состав лежальных хвостов и разработать технологию селективного извлечения золота и серебра.

Объект исследования – лежальные хвосты флотации медно-колчеданных предприятий Южного Урала.

Предмет исследования – минеральный состав, содержание полезных компонентов лежальных хвостов и технология селективного извлечения из них золота и серебра.

Материал и методы исследования. При реализации экспериментов применяли комплекс физико-химических и химических методов анализа: термодинамический анализ, синхронный термический анализ с использованием совмещенного термического анализатора марки Netzsch STA 449 F3 Jupiter, УФ-спектроскопию с системой автоматизированной обработки данных, качественный химический и пробирный анализы

Ключевые слова: медно-колчеданные руды; медно-цинковые колчеданные руды; сульфидные ассоциации; хвосты обогащения руд медно-колчеданных месторождений; вещественный состав; золото; серебро; технологии; переработка; законсервированное хвостохранилище; комплексное освоение техногенных объектов

The article analyzes the possibility and efficiency of processing stale tailings of flotation plants of the copper pyrite complex. The resource potential, material composition and technological capabilities of processing a number of technogenic objects are considered. The interrelation and influence of mineralogical and technological factors on the choice of tailings processing technology are analyzed. The results of chemical, mineral and phase analysis of stale flotation tailings of the studied pyrite ores are presented.

According to the complex studies' results, it is established that the stale flotation tailings of copper pyrite ores belong to a refractory type of geo-resources due to the high content of pyrite and low, at the level of ppm, gold and silver content, which are present mainly in the "resistant" minerals - chalcogenides, sulphides, their intergrowths.

The article presents a factor analysis and conditions for the elemental composition of tailings formation: mineralogical, technological and environmental. The territorial accessibility and technological capability of the investigated technogenic formations are analyzed. In the course of experimental studies, the elemental composition of stale tailings has been revealed - the main components of which are: iron, sulfur, silicon and aluminum. According to the results of X-ray phase analysis, it has been found that the main ore mineral of the tailings is pyrite. At the same time, it is noted that the main share of gold in the stale flotation tailings is presented in the form of sulphides in the form of finely dispersed and isomorphic inclusions. The heterogeneous morphometric and mineral composition of sulphide aggregates, their difficult opening and high dispersion characterize stale tailings as a raw material that is difficult to float. The revealed features of the material composition of stale tails indicate the impossibility of extracting valuable components (gold and silver) from this resource using existing traditional technologies. It has been proved that it is possible to effectively extract precious metals from this category of raw materials only after their deep opening by chemical processing.

The relevance of the research lies in the need to process gold-containing man-made waste in order to significantly expand the raw material base of mining enterprises, as well as to improve the ecological situation of the city-forming mining enterprises of the South Urals. The aim of the research is to study the material composition of stale tailings and develop a technology for selective extraction of gold and silver. The object of research is the stale flotation tailings of copper-pyrite enterprises of the Southern Urals. The subject is the mineral composition, the content of useful components of lying tailings and the technology of gold and silver selective extraction from them.

Material and research methods. During the experiments, a set of physicochemical and chemical methods of analysis has been used: thermodynamic analysis, synchronous thermal analysis using a combined thermal analyzer of the Netzsch STA 449 F3 Jupiter brand, UV spectroscopy with an automated data processing system), qualitative chemical and assay analyzes

Key words: copper-pyrite ores; copper-zinc pyrite ores; sulphide associations; copper-pyrite ores; copper-zinc pyrite ores; sulfide associations; concentration tails; copper-pyrite ore deposits; material composition; gold; silver; technologies; processing; preserved tailings storage; complex development of man-made objects

Введение. В хвостохранилищах горных предприятий Южного Урала медно-колчеданного комплекса, крупнейшим из которых является Учалинский ГОК, сконцентрированы миллионы тонн лежальных хвостов флотации, в которых содержится большое количество дорогостоящих тяжелых металлов [1; 2; 4]: в пределах 100 т золота и 1200 т серебра [3].

Данные факты актуализируют целесообразность, разработки технологического комплекса мероприятий, направленных на освоение высокоминерализованных хвостохранилищ. Решение данного вопроса позволит значительно расширить минерально-сырьевую базу предприятий, а также повысить эффективность и рациональность недропользования. Актуальность вторичной переработки хвостохранилищ связана и с экологической составляющей горно-обогатительных регионов [5–9].

Освоение названных объектов содержит следующие факторы:

- низкая эффективность технологических процессов доизвлечения золота и серебра, что обусловлено структурными и фазовыми особенностями их нахождения в отходах [1–5];

- значительные затраты (автоклавное, бактериальное окисление), длительность (кучное выщелачивание, биоокисление), экологическая опасность (цианирование, кучное выщелачивание, обжиг) извлечения золота и серебра по существующим технологиям [1; 3].

Для извлечения золота и серебра из руд и отходов обогащения наибольшее применение находят технологии с использованием цианидов [2–4; 7]. Однако хвости флотации колчеданных медно-цинковых руд являются «упорными» для цианирования, так как содержат преимущественно тонкодисперсное и ионное золото, закапсулированное в сульфидных ассоциациях. Кроме того, цианиды являются ядовитыми и экологически опасными реагентами, поэтому существует необходимость в разработке инновационных химических способов вскрытия и доизвлечения золота и серебра из сформированных объемов хвостохранилищ предприятий медно-колчеданного комплекса с применением комбинированных методов и бесцианидных реагентов [2; 4; 5].

Основой решения данного вопроса является комплексный подход с учетом минера-

логических, технологических и экологических факторов. Ввиду многообразия факторов, определяющих эффективность технологического комплекса мер по разработке лежальных хвостов флотации медно-колчеданных руд, на первоначальном этапе исследований целесообразно обосновать выбор рационального способа и реагентов для извлечения драгоценных металлов в виде самостоятельных кондиционных продуктов [9].

Разработанность темы исследования. По вещественному составу медно-цинковые руды Уральского региона относят к «упорному» типу сульфидно-золотосодержащего сырья [3; 5; 7; 9].

В процессе флотации рудные минералы в разной степени разрушаются, что приводит к накоплению и складированию техногенных образований. В присутствии таких окислителей, как O_2 , Fe^{+3} , Cu^{+2} , MnO_2 , постепенно происходит химическая деструкция сульфидов, что приводит к их дальнейшему растворению и ионной миграции золота [3; 5; 7].

Кинетика процесса ионной миграции золота в значительной степени зависит от pH среды растворов: в кислых средах – от присутствия хлорид-ионов, в нейтральных и щелочных – от присутствия гуминовых кислот, а также тиосульфат- и сульфат-ионов. Ионные растворы золота мигрируют через твердые минеральные включения, в результате происходит осаждение и концентрирование его в виде коллоидных наслоений. Основными концентраторами золота являются пирит, коллоидные формы железа, углеродистые вещества [4].

В хвостохранилищах Учалинского ГОКа, общий объем которых составляет 25 млн м³, площадь 113 га, содержится более 52 т золота и 770 т серебра. Содержание драгоценных металлов в хвостах: 1,2...2,0 г/т – золота, 15...20 г/т – серебра. Основная масса отходов (80...90 %) сложена частицами размером -0,074 мм. Доля сульфидов составляет 50...75 % от массы хвостов, среди них превалирует пирит (90–98 %) [5; 7; 9]. В хвостохранилищах Бурибаевской фабрики содержание золота до 1,5 г/т, серебра – 7,6 г/т [3; 5]. В лежальных хвостах ОФ ПАО «Гайский ГОК» среднее содержание золота составляет 0,83 г/т, серебра – 7,0 г/т; доля породных минералов – 54,8 %, суммарное количество сульфидов – 34,2, пирита – 33 %. [2; 5; 10; 13; 15].

Таким образом, хвостохранилища, формирующиеся как техногенные образования на территории горных предприятий, занимающихся разработкой медно-цинковых колчеданных руд Урала, имеют ряд общих параметров:

- образованы тонкоизмельченным, сложным по составу материалом с повышенным содержанием пирита (наиболее устойчивого к окислению сульфида) и низкоконцентрированными включениями драгоценных металлов, с преобладающим нахождением их в упорных для цианирования формах [4; 16; 17];
- содержание золота и серебра в отходах сопоставимы с таковыми в исходных медно-колчеданных рудах (Au 0,83...3,48 г/т, Ag 16,2...23,9 г/т) [3; 5; 12].

Ввиду значительных объемов техногенного сырья и высокой подготовленности к утилизации вторичная переработка лежальных хвостов с доизвлечением золота, серебра актуальна и перспективна [7; 16; 17].

Методология исследования: в работе использован комплексный подход.

Методы исследования: в исследовании применены факторный анализ, рентгенофазовый анализ, гравитационный метод, а также методы индукции, сопоставления и аналогии.

Результаты исследования и их обсуждение. Возможность эффективной переработки данного техногенного сырья определяется, в первую очередь, его вещественным составом.

По результатам комплексного исследования минералогических свойств лежальных хвостов Учалинской обогатительной фабрики установлено, что отходы представляют собой полиминеральное высокодисперсное низкоконцентрированное сырье с содержанием золота и серебра (до 2 и 20 г/т соответственно), сульфидов меди и цинка (1...4 %) и высоким содержанием пирита (50...56 %) [5].

Данные химического анализа двух проб лежальных хвостов представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав отходов / Chemical composition of waste

Элемент/ Element	Au , г/т/ Au , g/t	Ag , г/т/ Ag , g/t	$\text{Fe}_{\text{общ.}}$, %/ Feed, %	$\text{S}_{\text{общ.}}$, %/ $\text{S}_{\text{com.}}$, %	$\text{C}_{\text{общ.}}$, %/ $\text{C}_{\text{com.}}$, %	Cu , %	Zn , %
Содержание/ Content	1,7-2,0	18,0-19,5	23,0-26,8	28,1-28,7	0,22-0,60	0,12-0,73	0,34-1,26

Согласно полученным результатам, содержание железа и серы в хвостах меняется незначительно, а концентрации меди и цинка сильно характеризуются значительным диапазоном варьирования. При этом, следует отметить, что наличие в отходах углеродистого вещества (УВ) даже в выявленных невысоких концентрациях (менее 1 %) может привести к низкому извлечению золота из-за эффекта

прег-роббинга [4; 5; 11; 13], поскольку в ряде случаев УВ обладает сорбционной активностью к золоту. Для снижения обозначенной негативной тенденции, углеродистые вещества при переработке предварительно целесообразно дезактивировать и подвергнуть процессу окисления.

Результаты рентгенофазового анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Минеральный состав лежальных хвостов, % / Stale tailings mineral composition, %

Минерал / Mineral	Mass. / Mass.	Минерал / Mineral	Mass. / Mass.
Кварц / Quartz	13...21	Барит/ Barite	3...4
Плагиоклаз / Plagioclase	4...5	Пирит/ Pyrite	50...56
Хлорит/ Chlorite	6...9	Сфалерит/ Sphalerite	Не более 4 / no more 4
Слюдя/ Mica	Не более 4 / no more 4	Теннантит/ Tennantite	Не более 1 / no more 1
Гипс/ Gypsum	8...10	Гидрониоярозит/ Hydronioarosite	Не более 2 / no more 2

Анализ полученных результатов показал, что главным рудным минералом исследуемых хвостов является пирит (50...56 %); породные минералы, преимущественно это кварц, составляют 40...50 % отходов.

Согласно результатам исследований химического и минерального состава пробы лежальных отходов из действующего хвостохранилища Учалинской ОФ, наблюдается незначительное отличие по основным

элементам и минералам. Такие особенности могут быть связаны с различными сроками хранения хвостов обогащения [4; 5; 13].

Данные по вещественному составу старогодных отходов в законсервированном хвостохранилище Сибайской ОФ Учалинского ГОКа свидетельствуют о большей неоднородности состава хвостов по площади и глубине (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Компонентный состав лежальных хвостов Сибайского филиала АО «Учалинский ГОК» / Component composition of stale tailings of the Sibay branch of JSC “Uchalinsky GOK”

$\frac{\text{Fe}_{\text{общ}}}{\text{Fe}_{\text{сомн.}}} \%, \%$	S, %	Cu, %	Zn, %	As, %	Au, г/т / Au, g/t	Ag, г/т / Ag, g/t	Se, г/т / Se, g/t	Te, г/т / Te, g/t	Sb, г/т / Sb, g/t
2,21-36,2	25-38	0,12-0,42	0,31-1,0	0,11-0,2	0,52-2,53	8,4-30,2	22,3-50,4	26,3-60,2	24,8

В результате длительного хранения соотношение сульфидных и нерудных минералов (в основном, кварца) изменилось от 3:1 до 1:3 за счет окислительного разрушения сульфидов, особенно вблизи поверхности. Разложение способствует высвобождению связанного с сульфидами золота, его миграции и переотложению в толще лежальных хво-

стов обогащения, для которых содержание золота до 1,5...2 раз выше, чем в текущих хвостах. В то же время, окисление сульфидных отходов затрудняет их переработку методом флотации.

Результаты содержания золота в хвостохранилищах Учалинской ОФ представлены в табл. 4.

Таблица 4 / Table 4

Результаты рационального анализа золота в лежальных хвостах Учалинской ОФ / The results of rational analysis of gold in the stale tailings of the Uchalinskaya OF

Формы нахождения золота/ Forms of finding gold	Содержание, г/т/ Content, g / t	Содержание, %/ Content, %
В сростках (в цианируемой форме)	31,0	
В цианируемой форме/ In cyanized form	0,51 - 0,62	30,0 - 31,0
Золото в пленках/ Gold in films	0,08 - 0,10	4,0 - 5,9
В сульфидах/ In sulphides	0,89 - 1,11	52,3 - 55,5
В кварце / In quartz	0,19 - 0,20	9,5 - 11,8
Общее содержание/ General content	1,7 - 2,0	100

Согласно фазовому анализу, менее 31 % золота в лежальных хвостах Учалинской ОФ находится в исходноцианируемой форме. Концентрация золота, покрытого кислото-растворимыми пленками и связанного с кварцем, составляет 4,0...5,9 и 9,5...11,8 % соответственно. Основная доля золота лежальных отходов (52,3... 55,5 %) заключена в сульфидной форме.

Таким образом, результаты анализа позволяют отнести лежальные хвосты флотации колчеданных руд к виду труднообогатимого сырья. Упорность к цианированию обусловлена значительными количествами дисперсного золота, законсервированного в сульфидах и кварце, наличием покровных пленок естественного и техногенного происхождения.

По данным ситового анализа установлено, что 89,42 % материала хвостов имеет крупность менее 0,04 мм, в котором содержится практически все золото (96,12 %) и серебро (97,62 %), что указывает на необходимость использования для переработки отходов metallurgических методов, обеспечивающих высокую

эффективность и селективность переработки.

Для проверки возможности переработки отходов гравитационным методом и получения богатого по золоту и серебру концентрата провели исследования на центробежном концентраторе «ИТОМАК-КН-01». Результаты эксперимента приведены в табл. 5.

Таблица 5 / Table 5

Тестирование на обогатимость хвостов гравитационным методом / Gravity Tailings Waste Testing

Продукты/ Products	Выход, %/ Output, %	Au, г/т/ Au, g / t	Извлечение Au, %/ Extraction Au, %	Ag, г/т/ Ag, g/t	Извлечение Ag, %/ Extraction Ag, %	Давление, бар /Pres- sure, bar
Проба/ Test	100,00	2,00	—	18,0,0	—	0,0
Концентрат/ Concentrate	86,77	2,20	95,45	19,00	91,59	0,1
Хвосты/Tails	13,23	0,69	4,55	11,41	8,41	
Концентрат/ Concentrate	74,22	2,24	83,12	18,54	76,44	0,2
Хвосты/Tails	25,78	1,31	16,88	16,41	23,56	
Концентрат/ Concentrate	59,16	2,25	66,55	18,78	61,72	0,3
Хвосты/Tails	40,84	1,64	33,45	16,87	38,28	

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что, несмотря на высокие значения показателя извлечения золота в тяжелую фракцию (66,55...95,45 %), его доля в концентрате в сравнении с исходным материалом растёт незначительно. Подобные зависимости получены и для серебра.

Выводы. Эффективно вскрыть и извлечь золото и серебро из упорных пиритных лежальных хвостов возможно только после их глубокой химической переработки:

1) хвосты флотации медно-колчеданных руд являются сырьем сложного вещественно-минерального состава, сравнимым по содержанию золота и серебра с исходными рудами, что делает их переработку перспективной и целесообразной;

2) твердые отходы флотации относятся к труднообогатимому, «упорному» минеральному сырью. Причины «упорности» обусловлены высоким содержанием дисперсного золота, заключенного в сульфидах, и присутствием углеродистого вещества;

3) благородные металлы (золото и серебро) в лежальных хвостах флотации исследуемых руд содержатся в многочисленных собственных минералах, представленных самородным золотом и серебром, «упорными» теллуридами, селенидами и сульфосолями. Данные минералы образуют микроскопические (5...40 мкм), субмикроскопические и наноразмерные выделения, ассоциированные с сульфидами в труднораскрываемые сростки сложной структуры. Кроме того, значительная часть драгметаллов изоморфно содержится в сульфидах, которые являются не только носителями, но и концентраторами золота и серебра;

4) выявленные особенности вещественного состава лежальных хвостов обуславливают низкую эффективность извлечения из них золота и серебра традиционными методами и указывают на необходимость вскрытия «упорных» ассоциаций химическими способами с использованием бесцианидных реагентов.

Список литературы

1. Алексеев Я. В., Корчагина Д. А. Сырьевая база рудного золота России: состояние освоения и перспективы развития до 2040 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 4–5. С. 3–7.
2. Бобоев И. Р., Стрижко Л. С. Влияние ультратонкого измельчения на технологические показатели автоклавного окисления упорного золото-медно-мышьяковистого флотоконцентрата // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 5. С. 13–18.
3. Болдырев А. В., Баликов С. В., Емельянов Ю. Е., Копылова Н. В., Николаев Ю. Л., Поседко Е. Ю. Сравнительная оценка различных методов переработки упорного золотосульфидного флотоконцентрата // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 5. С. 161–170.
4. Голик В. И., Комашенко В. И. Практика выщелачивания металлов из отходов переработки руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. № 3. С. 13–23.
5. Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е., Троценко И. Г. Технико-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2020. Т. 18, № 4. С. 12–23.
6. Кашуба С. Г. Золотодобывающая отрасль России: состояние и перспективы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 4–5. С. 48–52.
7. Комогорцев Б. В., Вареничев А. А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 2. С. 204–218.
8. Перспективные направления химической и микробиологической переработки минерального сырья цветных и благородных металлов // Металлург. 2017. № 9. С. 82–89.
9. Рахманов О. Б., Аксенов А. В., Минеев Г. Г., Назаров Х. М., Каримов М. И. Переработка упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» с использованием автоклавного окисления // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 8. С. 163–172.
10. Рахманов О. Б., Аксенов А. В., Минеев Г. Г., Солихов М. М., Шумуродов Х. Р. Поиск рациональной технологии переработки упорных золотосодержащих руд с тонковкрапленным золотом месторождения «Иккижелон» (Северный Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 6. С. 119–126.
11. Секисов А. Г., Рубцов Ю. И., Лавров А. Ю. Активационное кучное выщелачивание дисперсного золота из малосульфидных руд // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 96–101.
12. Солихов М. М., Аксёнов А. В., Васильев А. А., Каримов М. И., Рахманов О. Б. Поиск оптимальной технологической схемы переработки упорных золотосодержащих руд месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 2. С. 180–190.
13. Boinovich L., Emelyanenko A. Wetting and surface forces // Advances in Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 165. No. 2. P. 60–69.
14. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces // International Journal of Mineral processing. 2016. Vol. 156. P. 62–68.
15. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces // Journal of Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 361. Issue 1. P. 321–330.
16. Verrelli D. I., Koh P.T.L., Bruckard W.J., Schwarz M.P. Variations in the induction period for particle–bubble attachment // Minerals Engineering. 2012. Vol. 36–38. P. 219–230.
17. Zheng J.-m., Chin W-C., Khijniak E., Khijniak E., Pollack G.H. Surfaces and interfacial water: Evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact // Advances in Colloid and Interface Science. 2006. Vol. 127. Issue 1. P. 19–27.

References

1. Alekseev Ya. V., Korchagina D. A. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* (Mineral resources of Russia. Economics and Management), 2020, no. 4–5, pp. 3–7.
2. Boboyev I. R., Strizhko L. S. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* (Institutes News. Non-ferrous metallurgy), 2017, no. 5, pp. 13–18.
3. Boldyrev A. V., Balikov S. V., Yemelyanov Yu. Ye., Kopylova N. V., Nikolayev Yu. L., Posedko Ye. Yu. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* (Bulletin of Irkutsk State Technical University), 2017, vol. 21, no. 5, pp. 161–170.
4. Golik V. I., Komashchenko V. I. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* (Proceedings of the Tula State University. Earth sciences), 2016, no. 3, pp. 13–23.

5. Yevdokimov S. I., Gerasimenko T. Ye., Trotsenko I. G. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* (Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov), 2020, vol. 18, no. 4, pp. 12–23.
6. Kashuba S. G. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* (Mineral resources of Russia. Economics and Management), 2020, no. 4–5, pp. 48–52.
7. Komogortsev B. V., Varenichev A. A. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information and analytical bulletin), 2016, no. 2, pp. 204–218.
8. *Metallurg* (Metallurgist), 2017, no. 9, pp. 82–89.
9. Rakhmanov O. B., Aksenov A. V., Mineyev G. G., Nazarov Kh. M., Karimov M. I. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* (Bulletin of the Irkutsk State Technical University), 2018, vol. 22, no. 8, pp. 163–172.
10. Rakhmanov O. B., Aksenov A. V., Mineyev G. G., Solikhom M. M., Shomurodov Kh. R. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* (Bulletin of Irkutsk State Technical University), 2017, vol. 21, no. 6, pp. 119–126.
11. Sekisov A. G., Rubtsov Yu. I., Lavrov A. Yu. *Zapiski Gornogo instituta* (Notes of the Mining Institute), 2016, vol. 217, pp. 96–101.
12. Solikhov M. M., Aksonov A. V., Vasilyev A. A., Karimov M. I., Rakhmanov O. B. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* (Bulletin of the Irkutsk State Technical University), 2018, vol. 22, no. 2, pp. 180–190.
13. Boinovich L., Emelyanenko A. *Advances in Colloid and Interface Science* (Advances in Colloid and Interface Science), 2011, vol. 165, no. 2, pp. 60–69.
14. Miller J.D., Wang X., Jin J., Shrimali K. *International Journal of Mineral processing* (International Journal of Mineral processing), 2016, vol. 156, pp. 62–68.
15. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. *Journal of Colloid and Interface Science* (Journal of Colloid and Interface Science), 2011, vol. 361, issue 1, pp. 321–330.
16. Verrelli D. I., Koh P.T.L., Bruckard W. J., Schwarz M. P. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2012, vol. 36–38, pp. 219–230.
17. Zheng J.-m., Chin W-C., Khijniak E., Khijniak E., Pollack G.H. *Advances in Colloid and Interface Science* (Advances in Colloid and Interface Science). 2006, vol. 127, issue 1, pp. 19–27.

Информация об авторе

Медяник Надежда Леонидовна, д-р техн. наук, профессор, зав.кафедрой химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, комплексная технология переработки горно-обогатительного сырья
medyanikmagnitka@mail.ru

Леонтьева Елена Вячеславовна, канд. техн. наук, инженер-технолог ООО «УралЭнергоресурс», Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геохимия
allen_28@mail.ru

Мишурина Ольга Алексеевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, технология физико-химической переработки техногенных образований
olegro74@mail.ru

Муллина Эльвира Ринатовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, технология физико-химической переработки техногенных образований
e.mullina@inbox.ru

Information about the author

Nadezhda Medyanik, doctor of technical sciences, professor, head of the Chemistry department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: mineral processing, complex technology of processing of mining and processing raw materials

Elena Leontieva, candidate of technical sciences, engineer-technologist, UralEnergoresurs LLC, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: mineral processing, geochemistry allen_28@mail.ru

Elvira Mullina, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Chemistry department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: mineral processing, technology of physical and chemical processing of technogenic formations

Olga Mishurina, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Chemistry department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Scientific interests: mineral processing, technology of physical and chemical processing of technogenic formations

Для цитирования

Медяник Н. Л., Леонтьева Е. В., Мишурина О. А., Муллина Э. Р. Анализ ресурсного потенциала лежальных хвостов флотации медно-колчеданных руд с возможностью селективного извлечения золота и серебра // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 6. С. 31–39. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-6-31-39.

Medyanik N., Leontieva E., Mishurina O., Mullina E. Stale tailings of copper-crusted ores flotation with the possibility of gold and silver selective extraction: resource potential analysis // Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 6, pp. 31–39. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-6-31-39.

Статья поступила в редакцию: 03.06.2021 г.
Статья принята к публикации: 09.06.2021 г.