

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Л.В. Шумилова¹, А.Н. Хатькова¹, К.К. Размахнин¹

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия,
e-mail: shumilovalv@mail.ru

Аннотация: Руды черносланцевой формации и продукты их переработки являются упорными для извлечения благородных металлов. Объект исследований – лежалые огарки обжига сульфидного золотосодержащего концентрата с включениями рассеянного углеродистого вещества. Цель исследований – разработать бесцианидную технологию извлечения золота из упорного минерального сырья на основе применения Albion-процесса. Изучен химический и гранулометрический составы золотосодержащих огарков. Установлено распределение золота и серебра по фракциям крупности: –2,0 мм – 90,81% золота и 87,83% серебра; –0,075 мм – 12,97 г/т золота и 63,17 г/т серебра, что соответствует 41,96% по золоту и 48,54% по серебру от содержания благородных металлов в исходных огарках. Это обуславливает необходимость доизмельчения фракции крупности +2,0 мм (Albion-процесс) и раздельного выщелачивания фракций крупности +0,16 мм и –0,16 мм. Разработана бесцианидная технология переработки огарков с использованием в качестве выщелачивающего реагента тиокарбамида (тиомочевина). Проведенные экспериментальные исследования позволили установить оптимальные технологические параметры тиокарбамидного выщелачивания: продолжительность процесса выщелачивания – 7 ч; концентрация тиомочевина – 2,0%; концентрация серной кислоты – 2,5%; отношение Т:Ж = 1,0:2,0; концентрация окислителя (перекиси водорода) – 0,45%. Результат нового технологического решения – повышение эффективности процесса выщелачивания за счет синергетического эффекта интенсифицирующих факторов на основе применения Albion-процесса, окисления углеродсодержащих соединений и сульфидных минералов перекисью водорода и тиокарбамидного выщелачивания золота в раствор, которое составило 89,66%.

Ключевые слова: лежалые сульфидные огарки, углеродсодержащие соединения, тонкодисперсное золото, упорность, минерал-носитель, Albion-процесс, бесцианидная технология, окисление, тиокарбамид (тиомочевина), перекись водорода.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 гг.)

Для цитирования: Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К. Исследование процессов окисления углеродсодержащих соединений и извлечения золота из упорного минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 143–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_143.

Oxidation of carbon-bearing compounds and gold recovery from difficult minerals

L.V. Shumilova¹, A.N. Khatkova¹, K.K. Razmakhnin¹

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia, e-mail: shumilovalv@mail.ru

Abstract: Black shale ores and their processing products resist recovery of noble metals. The test subject are old roasted products of gold-bearing sulfide concentrate with disseminated carbonic inclusions. The research objective is the technology of cyanide-free gold recovery from difficult minerals using the Albion Process. The chemistry and grain-size composition of gold-bearing roasted products are analyzed. The size distributions of gold and silver particles are found: -2.0 mm—90.81% of gold and 87.83% of silver; -0.075 mm—12.97 g/t of gold and 63.17 g/t of silver, which corresponds to 41.96% of gold and 48.54% of silver, respectively, with regard to the content of these noble metals in the initial roasted products. This discovery conditions re-milling of particles $+2.0$ mm in size (Albion Process) and separate leaching of particles $+0.16$ mm and -0.16 mm in size. The technology is developed for cyanide-free treatment of roasted products with thiocarbamide as a leaching agent. The implemented experimental research produces optimal parameters for thiocarbamide leaching: leaching duration—7 h; thiocarbamide concentration—2.0%; sulfuric acid concentration—2.5%; S : L ratio = 1.0 : 2.0; concentration of oxidizer (hydrogen peroxide)—0.45%. The result of the new process design is the enhanced efficiency of leaching owing to the synergistic effect of intensifying factors of the Albion Process, hydrogen peroxide oxidation of carbon-bearing compounds and sulfide minerals and thiocarbamide recovery of gold at 89.66%.

Key words: old sulfide roasted products, carbon-bearing compounds, fine-dispersed gold, resistance, mineral-bearer, Albion Process, cyanide-free technology, oxidation, thiocarbamide, hydrogen peroxide.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-17-00040 Development and Scientific Justification of Eco-Friendly Waste-Free Technologies for Processing Natural and Manmade Mineral Raw Materials, 2022–2023.

For citation: Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K. Oxidation of carbon-bearing compounds and gold recovery from difficult minerals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; (11):143-158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_143.

Введение

30% мировых запасов золота в недрах и 50% процентов в России — это руды черносланцевой формации (метаморфизованные месторождения в углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных толщах), содержащие благородные металлы, инкапсулированные в углистые включения, состоящие из растворимой компоненты — битумоида и нерастворимого углеродистого веще-

ства — керогена (рассеянное углеродистое вещество — РУВ). Субмикроскопические частицы крупностью ($n \cdot 10^{-7}$ м) и окточастицы ($n \cdot 10^{-8}$ м) — «невидимое» золото, как правило, визуально не наблюдаемы на обычном стандартном оптическом микроскопе с максимальным увеличением 1200 крат, однако надежно выявляются электронной и лазерной микроскопией [1, с. 102; 2, с. 38; 3, с. 162].

В рудах черносланцевой формации и в продуктах их переработки (концентрат, промпродукт, хвосты, огарки обжига флотоконцентрата) основная масса органического вещества представлена рассеянным углеродистым веществом, которое расклассифицировано на три большие группы: кероген, битум, графит. Для извлечения золота из таких руд в практике золотоперерабатывающих предприятий применяется цианидная технология. При выборе растворителя благородных металлов — заменителя цианида следует учесть, что кероген является максимально упорным. Методом HAADF-STEM определено [4], что наночастицы золота размером менее 10 нм закрепляются на поверхности углеродистого вещества (рис. 1, а, в). Методом HRTEM-изображения установлено, что эти частицы состоят из элементного золота (рис. 1, б) [5, с. 3118], которое входит в состав кристаллической решетки минерала-носителя. Поэтому для извлечения золота необходимо нарушить тер-

модинамическую устойчивость системы с соответствующими фазовыми переходами.

Учеными Янг и Йен [5, с. 3122] предложена гипотетическая структура керогена и три его химические модели, геометрическая конфигурация которых зависит от элементного состава (Н:С; О:С) и степени его метаморфизма (см. рис. 2).

Максимальное распространение в горно-перерабатывающей промышленности получили следующие способы, позволяющие уменьшить сорбционную активность РУВ:

1. Применение различных масляных реагентов, таких как дизельное топливо или керосин (выбор зависит от гидрофобности частиц углеродистого вещества), позволяющих удалить углеродистое вещество, незначительно повысить извлечение золота при выщелачивании, но при этом ухудшить свойства сорбента (активированного угля) [4].

2. Окисление РУВ щелочными растворами в присутствии окислителя —

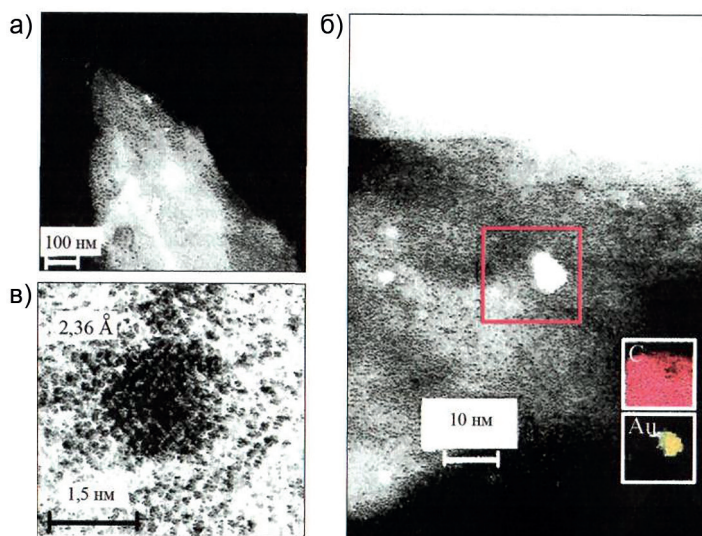


Рис. 1. Поверхность углеродистого вещества: наночастицы золота, закрепленные на поверхности углеродистого вещества (а); то же с более высоким разрешением (б); наличие решетки элементного золота (в)

Fig. 1. The surface of a carbonaceous substance: gold nanoparticles fixed on the surface of a carbonaceous substance (a); the same with a higher resolution (b); the presence of a lattice of elemental gold (v)

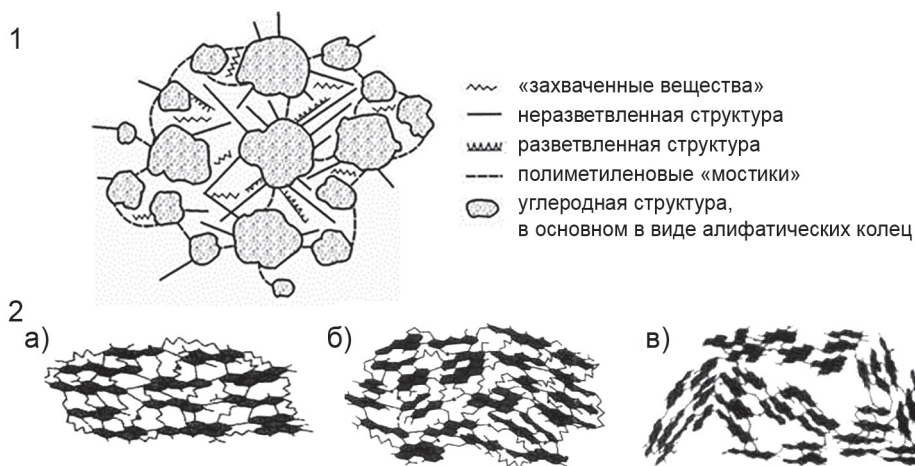


Рис. 2. Схемы структур керогена: 1 – гипотетическая структура керогена; 2 – химическая модель керогена: тип I – $H:C = 0,83$; $O:C = 0,013$; $M = 4024$ (а); тип II – $H:C = 0,73$; $O:C = 0,026$; $M = 7949$ (б); химическая модель керогена типа III – $H:C = 0,67$; $O:C = 0,059$; $M = 13226$ (в)

Fig. 2. Schemes of kerogen structures: 1 – hypothetical structure of kerogen; 2 – chemical model of kerogen: Type I – $H:C = 0.83$; $O:C = 0.013$; $M = 4024$ (a); Type II – $H:C = 0.73$; $O:C = 0.026$; $M = 7949$ (b); chemical model of kerogen Type III – $H:C = 0.67$; $O:C = 0.059$; $M = 13226$ (v)

кислорода с последующей обработкой масляным реагентом-собирателем для флотации углеродистого вещества, сопровождающееся коррозией технологического оборудования [4].

3. Окисление РУВ серноокислотным раствором соли трехвалентного железа $Fe_2(SO_4)_3$, осуществляемое при больших расходах серной кислоты, достигающих до 100 кг/т [21].

4. Флотация углеродсодержащих соединений, имеющая ряд проблем: хорошее извлечение кристаллических и чешуйчатых графитов, неудовлетворительную флотацию скрытокристаллических графита, керогена и битума [22].

5. Сверхтонкий помол с применением Альбион-процесса с последующим цианированием, приводящий к технологическим потерям золота, так как кероген обладает сорбционной активностью по отношению к аниону золота. Процесс цианидного выщелачивания достаточно хорошо изучен и эффективен [6, с. 266; 7, с. 220; 8; 9; 10, с. 221; 11, с. 186–192; 12, с. 99; 13, с. 160], однако представля-

ет опасность как для обслуживающего персонала, так и для окружающей природной среды за счет применения сильнодействующего ядовитого вещества (цианидов калия или натрия) [14, с. 139; 15, с. 330; 16, с. 470; 17; 18].

Альтернатива цианиду – тиокарбамид (тиомочевина), который применяется для выщелачивания благородных металлов из руд, концентратов и промежуточных продуктов. С экологических позиций тиокарбамид по сравнению с цианидом обладает явными преимуществами (скорость процесса растворения выше в 10 раз, небольшой удельный расход, меньше коррозионная активность реагента). Тиокарбамидное выщелачивание золота предложено в 40-х годах XX в. И.Н. Плаксиным. В последующие годы большой цикл работ по тиокарбамидному выщелачиванию различных золото- и серебросодержащих продуктов проведен сотрудниками Иргиредмета [19, с. 423; 20].

Один из главных признаков благоприятности условий применимости выщелачивания золота – степень окис-

ления РУВ, которая должна быть более 70% [9].

Проведение исследований процессов окисления углеродсодержащих соединений при переработке золотосодержащего сырья по экологощадящим технологиям на основе замены агрессивного цианида на малотоксичные растворители является актуальной научной задачей.

Объект исследований — лежалые огарки обжига сульфидного золотосодержащего концентрата с включениями рассеянного углеродистого вещества.

Предмет исследований — процесс окисления углеродсодержащих соединений при переработке отходов золотоизвлекательной фабрики бесцианидной технологией с применением Albion-процесса.

Цель исследований — разработать бесцианидную технологию извлечения золота из упорного минерального сырья на основе применения Albion-процесса (ультратонкое измельчение и окислительное выщелачивание золота из угле-

родсодержащих соединений при атмосферном давлении).

Задачи исследований — изучить химический и гранулометрический составы золотосодержащих огарков; разработать бесцианидную технологию переработки огарков с использованием в качестве выщелачивающего реагента тиокарбамида (тиомочевины); экспериментальным путем выявить зависимости влияния режимных технологических параметров процессов окисления и выщелачивания на извлечение золота; изучить кинетику процесса выщелачивания; экспериментальным путем установить оптимальные режимные технологические параметры процессов окисления и выщелачивания.

Методы

На лазерном анализаторе частиц «Микросайзер 201А» изучен гранулометрический состав техногенного сырья. Гранулометрический состав лежалых огарков, хранившихся на промплощадке ГОКа на протяжении более 50 лет в ре-

Таблица 1

Гранулометрический состав огарков Granulometric composition of the stubs

Класс, мм	Выход, %	Содержание, г/т		Распределение, %	
		Au	Ag	Au	Ag
+12,5	2,52	1,58	5,95	0,61	0,4
-12,5 +7,90	2,14	7,25	14,95	2,37	0,85
-7,90 +4,75	4,61	3,32	28,01	2,34	3,43
-4,75 +3,35	3,33	2,12	30,44	1,08	2,69
-3,35 +2,00	5,74	3,18	31,18	2,79	4,8
-2,00 +1,18	9,12	8,91	34,73	12,43	8,42
-1,18 +0,425	15,95	6,85	16,45	10,71	6,98
-0,425 +0,212	10,91	7,91	30,46	10,20	8,84
-0,212 +0,106	9,67	9,01	42,15	10,32	10,84
-0,106 +0,075	3,84	8,84	41,84	5,19	4,2
- 0,075	32,17	12,97	63,17	41,96	48,55
Итого	100	6,54	37,6	100	100

Таблица 2

Химический состав огарков
Chemical composition of the stubs

Элементы	Содержание, %	Элементы	Содержание, %	Элементы	Содержание, %
Au	6,54 г/т	Ca	1,12	Cd	0,0003
Ag	36,1 г/т	Co	0,0014	P	0,08
S _{Общ.}	3,58	Cr	0,0035	Pb	0,68
S _{сульфидн.}	0,9	Cu	0,15	Sc	0,00043
C _{орг.}	2,5	K	0,76	Sn	< 0,001
As	0,815	La	0,001	Sr	0,0127
Fe	12,84	Li	0,005	Ti	< 0,01
Sb	0,03	Mg	0,49	V	0,0042
Al	2,35	Mn	0,085	W	0,008
Ba	0,012	Mo	0,0002	Y	0,00075
Be	< 0,00005	Na	0,04	Zn	0,37
Bi	0,0045	Ni	0,002	Zr	0,0003

гионе с резкоконтинентальным климатом и большим среднегодовым перепадом температур (зимой — минус 35–45 °С, летом — плюс 25–35 °С), выпадением осадков и действием солнечной радиации и ветровой нагрузки, постепенно изменялся. В результате естественной дезинтеграции огарки крупностью +12,5 мм значительно разрушились,

поэтому фракция крупности продуктов обжига от –2,00 до –0,075 мм составила 81,66% (см. табл. 1).

Анализ результатов гранулометрического состава показал, что распределение золота и серебра по фракциям крупности составило: –2,0 мм — 90,81% золота и 87,83% серебра; –0,075 мм — 12,97 г/т золота и 63,17 г/т серебра,

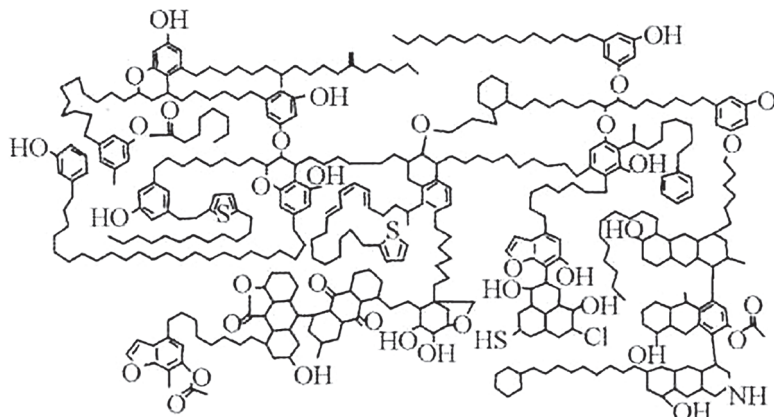


Рис. 3. Двухмерная модель химической структуры слабопреобразованного керогена с расположением функциональных групп

Fig. 3. Two-dimensional model of the chemical structure of a weakly transformed kerogen with the arrangement of functional groups

что соответствует 41,96% по золоту и 48,54% по серебру от содержания благородных металлов в исходных огарках.

Химический состав огарков определялся эмиссионно-спектральным анализом. Химический состав огарков показывает, что содержание $C_{\text{орг}}$ составляет 2,5% (см. табл. 2).

Кероген ($C_{421}H_{638}O_{44}S_4NCl$) является прекурсором нефти и газа и имеет плотную упаковку атомов в кристаллической решетке на плоскостной 2D-модели (2D geometric model), что свидетельствует о сложном строении углеродного скелета (см. рис. 3) [22]. Следовательно, возникает необходимость применения комбинированных технологий с принятием нестандартных технологических решений.

Проведены тестирование и лабораторные исследования тиокарбамидного (тиомочевинного) выщелачивания золота из лежалых огарков на малой лабораторной пробе массой 15 кг.

Результаты

При проведении исследований по извлечению золота из лежалых огарков с учетом современных экологических требований технологический аспект заключался в следующем:

- установление минералов — носителей тонкодисперсного золота;
- выбор эффективных способов дезинтеграции бинарных минералов золота и РУВ;
- подбор экологически щадящих растворителей и комплексообразователей благородных металлов.

Для переработки лежалых огарков обжига золотосодержащего флотоконцентрата разработана бесцианидная технология — тиокарбамидное (тиомочевинное) выщелачивание золота с использованием Albion-процесса ультратонкого измельчения и окислительного выщелачивания золота из углеродсодержащих соединений при атмосферном давлении.

Выбор подготовительных процессов (грохочение, измельчение, промывка, обезвоживание, доизмельчение) и типа растворителя золота, а также способа выщелачивания (агитационное, кучное) определялся исходя из необходимости сокращения крупности огарков от начального размера до оптимального, снижения вязкости пульпы и удаления глины, повышения эффективности процессов последующего выщелачивания с учетом климатических условий региона.

Разработанная технология бесцианидного (тиокарбамидного) выщелачивания золота из сульфидных лежалых огарков обжига флотационного концентрата представлена на рис. 4.

В качестве интенсифицирующих факторов процесса тиокарбамидного выщелачивания применялись ультратонкое измельчение, агитационное выщелачивание с добавлением эффективного окислителя — перекиси водорода (H_2O_2). Поскольку схема регенерации тиокарбамида достаточно простая, это позволяет реализовывать бессточную гидрометаллургическую технологию.

Подрешетный продукт грохочения –2,0 мм состоит из минеральных частиц, пригодных для выщелачивания (класс крупности –0,16 мм), и нераскрытых сростков золота в конгломерации с глинистыми частицами (класс крупности +0,16 мм). Для удаления глинистой составляющей в технологической схеме предусмотрена операция промывки фракции крупности –2,0 мм на ситах с размером ячеек 0,16 мм. Фракция крупности +0,16 мм доизмельчалась.

Экспериментальные исследования извлечения золота при агитационном выщелачивании проводили по двум технологическим ветвям для фракции крупности +0,16 мм и –0,16 мм. Огарки крупностью +0,106 мм предварительно промывали и обезвоживали, а затем измельчали до 80% класса 10^6 мкм. Ре-

зультаты промывки огарков представлены в табл. 3.

Обсуждение результатов

Следует отметить, что скорость выщелачивания золота зависит от рН раствора, концентрации тиомочевины и окислителя. Экспериментальным путем определены зависимости влияния режимных технологических параметров (концентрация тиомочевины, серной кислоты, перекиси водорода; соотношения Т:Ж) на эффективность процесса тиокарбамидного выщелачивания: извлечения золота. Изучена кинетика процесса тиокарбамидного выщелачивания.

Экспериментальные исследования по влиянию длительности процесса тиокарбамидного выщелачивания исследовали при концентрации тиомочевины 2,0%, серной кислоты 2,5%, перекиси водорода 0,45%.

В первые 2 ч выщелачивания в раствор переходит 70% золота, через 6 ч этот показатель достигает значения в 88,0%. Установлена оптимальная продолжительность процесса, которая составила 7 ч при извлечении золота 89,28% (рис. 5).

Через каждый час процесс перемешивания прекращали, отбирали аликвоты,

определяли рН, концентрацию тиомочевины и окислителя, концентрацию золота.

Влияние концентрации тиомочевины определялось при продолжительности процесса 7 ч. Концентрация в растворе тиомочевины изменялась в пределах от 0,25 до 3,0% (рис. 6). Извлечение золота при концентрации тиомочевины 0,25% составило 80%. Результаты исследований показали, что скорость растворения золота находится в прямой зависимости от концентрации тиомочевины только в диапазоне значений от 0,25% до 2,0%. Максимальное извлечение золота составило 88,75%. Увеличение концентрации тиомочевины с 2,0% до 3,0% не влияет на показатели извлечения золота. Принято значение оптимальной концентрации тиомочевины — 2,0%.

Тиокарбамид позволяет перевести металлическое золото в ионное состояние без его окисления, однако для того чтобы не произошло разрушение образовавшегося комплексного соединения золота, требуется кислая среда (рН = 2–4). Поэтому для регулирования водородного показателя при исследованиях использовали серную кислоту.

Эксперименты по влиянию концентрации серной кислоты проводились в

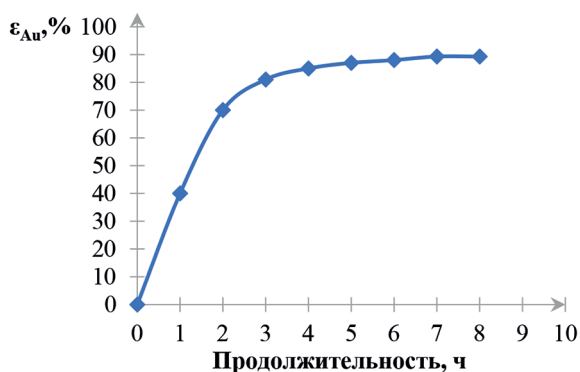


Рис. 5. Зависимость извлечения золота в раствор тиомочевины от продолжительности процесса тиокарбамидного выщелачивания золота

Fig. 5. Dependence of gold extraction into thiourea solution on the duration of the process of thiocarbamide leaching of gold

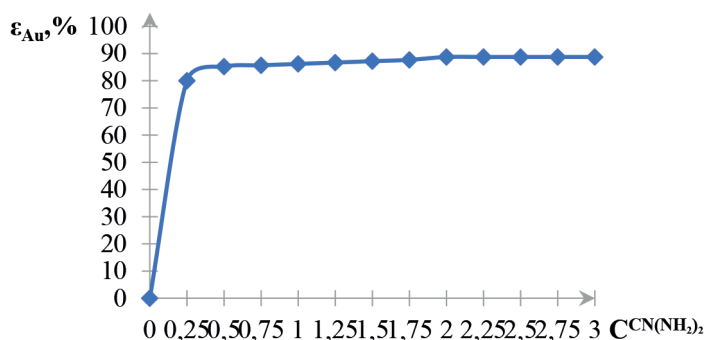


Рис. 6. Зависимость извлечения золота от концентрации тиомочевины при тиокарбамидном выщелачивании золота

Fig. 6. Dependence of gold extraction on the concentration of thiourea during thiocarbamide leaching of gold

2,0%-ном растворе тиомочевины в присутствии 0,45% перекиси водорода при перемешивании в течение 7 ч. Влияние концентрации серной кислоты при агитационном тиокарбамидном выщелачивании сульфидных огарков определялось в диапазоне от 0,5% до 3,0% (рис. 7). При повышении концентрации серной кислоты от 0,5% до 3,0% извлечение золота увеличивается от 38,0% до 88,6%, при этом оптимальное значение концентрации серной кислоты составило 2,5%. Повышение концентрации кислоты с 2,5% до 3,0% не улучшает показатели выщелачивания.

Экспериментальные исследования влияния соотношения твердого и жидкого на процесс тиокарбамидного вы-

щелачивания исследовали при концентрации тиомочевины 2,0%, серной кислоты 2,5%, перекиси водорода 0,45%, продолжительности процесса 7 ч. Определение оптимального значения отношения Т:Ж осуществляли при значениях от 1,0:0,5 до 1,0:3,0. При Т:Ж = 1,0:1,0 извлечение золота составило 70%. В пределах Т:Ж, равном от 1,0:2,0 до 1,0:3,0, показатель извлечения золота находится на максимальном значении (87,7%), не изменяясь. Установлено оптимальное соотношение Т:Ж = 1:2. (рис. 8).

Экспериментальное определение влияния концентрации перекиси водорода на извлечение золота проводилось при концентрации тиомочевины 2,0%, серной кислоты 2,5% (соотношение Т:Ж =

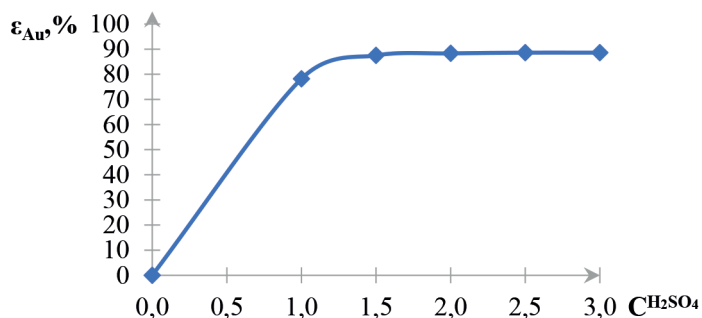


Рис. 7. Зависимость извлечения золота от концентрации серной кислоты при тиокарбамидном выщелачивании

Fig. 7. Dependence of gold extraction on sulfuric acid concentration during thiocarbamide leaching

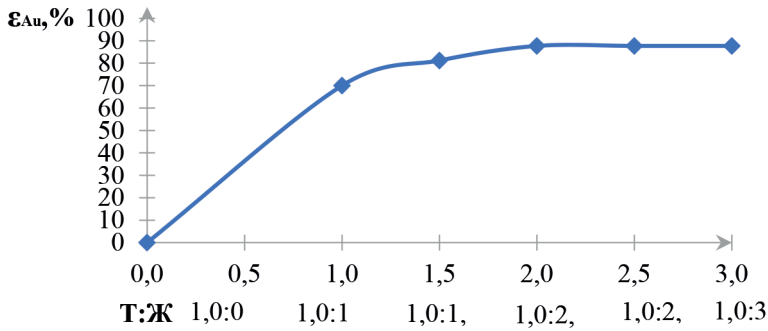


Рис. 8. Зависимость извлечения золота от отношения Т:Ж при тиокарбамидном выщелачивании
 Fig. 8. Dependence of gold extraction on the T:W ratio during thiocarbamide leaching

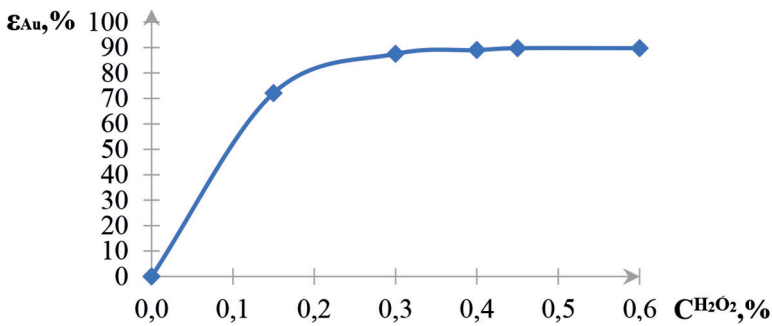


Рис. 9. Зависимость извлечения золота от концентрации перекиси водорода при тиокарбамидном выщелачивании
 Fig. 9. Dependence of gold extraction on the concentration of hydrogen peroxide during thiocarbamide leaching

= 1:2), продолжительности процесса 7 ч. Исследования позволили установить оптимальное значение concentra-

ции окислителя, которая составила 0,45% при извлечении золота 89,75% (рис. 9). Зависимость концентрации тиомочеви-

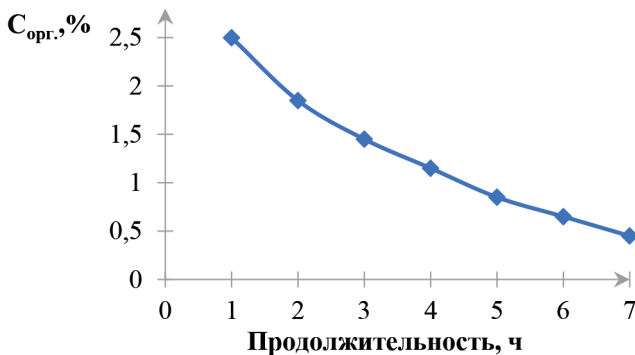


Рис. 10. Зависимость концентрации тиомочевины в растворе от продолжительности процесса тиокарбамидного выщелачивания
 Fig. 10. Dependence of the concentration of thiourea in solution on the duration of the thiocarbamide leaching process

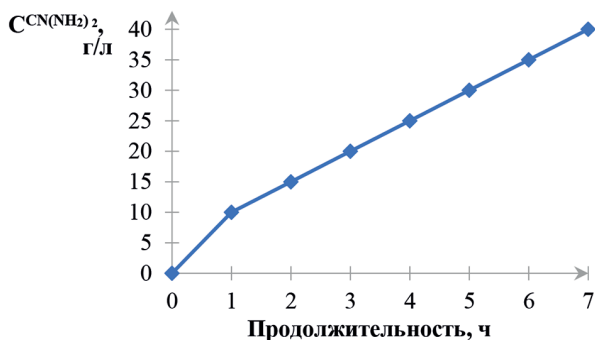


Рис. 11. Зависимость концентрации органического углерода в твердой фазе от продолжительности процесса тиокарбамидного выщелачивания

Fig. 11. Dependence of the concentration of organic carbon in the solid phase on the duration of the thiocarbamide leaching process

ны в растворе от продолжительности процесса тиокарбамидного выщелачивания представлена на рис. 10. При продолжительности выщелачивания в течение 1 ч концентрация тиомочевины ($C^{CN(NH_2)_2}$) составила 10 мг/л, а в течение 7 ч — увеличилась в четыре раза и составила 40 мг/л.

Концентрация органического углерода в твердой фазе в течение 7 ч постоянно снижалась с 2,5% (через 1 ч) до 0,45% (через 7 ч) (рис. 11).

Таким образом, экспериментальные исследования позволили установить следующие оптимальные условия проведения тиокарбамидного выщелачивания лежалых огарков:

- концентрация тиомочевины — 2,0%;
- концентрация серной кислоты — 2,5%;
- концентрация перекиси водорода — 0,45%;
- соотношение Т : Ж = 1 : 2;
- продолжительность процесса выщелачивания — 7 ч.

Результатом нового технологического решения является повышение эффективности процесса выщелачивания при полноте извлечения золота в раствор 89,66% за счет интенсифицирующих факторов.

Заключение

Разработана бесцианидная технология тиокарбамидного выщелачивания золота из сульфидных лежалых огарков обжига флотационного концентрата на основе применения интенсифицирующих факторов: ультратонкое измельчение до 80% кл. –106 мкм, агитационное выщелачивание с добавлением перекиси водорода (по сравнению с классическим вариантом тиокарбамидного выщелачивания без применения окислителя).

Процесс выщелачивания характеризуется высокой скоростью растворения металлов, возможностью улучшения технологических показателей за счет комбинирования отдельных стадий выщелачивания фракций крупности +0,106 мм и –0,106 мм.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить оптимальные технологические параметры тиокарбамидного выщелачивания (концентрация тиомочевины, серной кислоты, перекиси водорода, соотношение Т:Ж, продолжительность процесса).

Для проверки установленных оптимальных условий выщелачивания в перспективе планируется проведение исследований на укрупненной лабораторной пробе массой 300 кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупская Л. Т., Мелконян Р. Г., Зверева В. П., Растанина Н. К., Голубев Д. А., Филатова М. Ю. Опасность отходов, накопленных горными предприятиями в Дальневосточном федеральном округе, для окружающей среды и рекомендации по снижению риска экологических катастроф // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 102–112. DOI: 10.25018/0236_1493_2018_12_0_102_112.
2. Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Черкасов В. Г. Стратегия рационального и комплексного использования минерального сырья на основе наилучших доступных технологий и оценки жизненного цикла отходов горного производства // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 27. – № 4. – С. 32–44. DOI: 10.21209/2272-9245-2021-27-4-32-44.
3. Илиаш Н., Дунка Э., Оффенберг Ю., Тешеляну Д. Элементы геоэкологического аудита и учета объектов окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 359–371. DOI: 10.25018/0236_14_93_2021_31_0_359.
4. Меретуков М. А. Золото и природное углеродистое вещество. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2007. – 109 с.
5. Van de Velde K., Barbante C., Cozzi G., Moret I., Bellomi T., Ferrari C. P., Boutron C. F. Changes in the occurrence of silver, gold, platinum, palladium and rhodium in mont blanc ice and snow since the 18th century // Atmospheric Environment. 2000, vol. 34, no. 19, pp. 3117–3127.
6. Rosenfeld C. E., Chaney R. L., Martinez C. E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulea* (J. Presl & C. Presl) FK Mey in field-contaminated soils // Science of the Total Environment. 2018, vol. 616–617, pp. 279–287. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.016.
7. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods // Hydrometallurgy. 2018, vol. 181, pp. 215–220. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.10.004.
8. Секисов А. Г., Лавров А. Ю., Рассказова А. В. Фотохимические и электрохимические процессы в геотехнологии. – Чита: ЗабГУ, 2019. – 306 с.
9. Кучное выщелачивание благородных металлов / Отв. ред. проф. М.И. Фазлуллин. – М.: Академия горных наук, 2001. – 646 с.
10. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогащенности сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 218–227. DOI: 10.31897/gpmi.2020.2.218.
11. Шумилова Л. В. Гравитационно-электрохимический способ извлечения золота из техногенных россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S19. – С. 186–192.
12. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.014.
13. Чантурия В. А., Самусев А. Л., Миненко В. Г. Интенсификация химико-электрохимического выщелачивания золота из упорного минерального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 5. – С. 154–164. DOI: 10.15372/FTPRP120200518.
14. Абрамов Б. Н. Оценка токсичности хвостохранилищ рудных месторождений Забайкальского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 136–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.
15. Галачиева С. В., Соколов А. А., Соколова О. А., Махошева С. А. Система оценки устойчивого развития региональных народохозяйственных комплексов горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. – № 3. – С. 329–335. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-329-335.

16. Корнилов С. В., Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А., Собенин А. В. К вопросу об экологической реабилитации природной экосистемы, нарушенной при отработке Кольванского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 465 — 474. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-465-474.

17. Zehra Yigit Avdan, Gordana Kaplan, Serdar Goncu, Ugur Avdan Monitoring the water quality of small water bodies using high-resolution remote sensing data // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019, vol. 8, no. 12, article 553. DOI: 10.3390/ijgi8120553.

18. Topp S. N., Pavelsky T. M., Jensen D., Simard M., Ross M. R. V. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications // Water. 2020, vol. 12, no. 1, article 169. DOI: 10.3390/w12010169.

19. Деметьев В. Е., Войлошников Г. И., Федоров Ю. О. Разработка ОА «ИРГИРЕД-МЕТ» по извлечению ценных компонентов из техногенного сырья // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 4. — С. 418 — 427.

20. Шумилова Л. В. Научное обоснование инновационной технологии извлечения золота (разработка, апробация в условиях Забайкалья). — Изд-во Palmarium Academic Publishing, Германия, 2014. — 362 с.

21. Таужнянская З. А. Технология переработки углистых и бедных золотосодержащих руд за рубежом. — М.: Цветметинформация, 1972. — 30 с.

22. https://www.studmed.ru/view/bragina-vi-tehnologiya-obogascheniya-i-pererabotki-ne-metallicheskikh-poleznykh-iskopaemykh_16c54514116.html?page=8;metallurgist.pro/obogaschenie-grafita/ <http://www.mpoldt.ru/poleznoe/391-sposoby-obogashcheniya-grafita.html>). **ГИАБ**

REFERENCES

1. Krupskaya L. T., Melkonyan R. G., Zvereva V. P., Rastanina N. K., Golubev D. A., Filatova M. Yu. Ecological hazard of accumulated mining waste and recommendations on risk reduction in the Far Eastern Federal District. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 12, pp. 102 — 112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2018_12_0_102_112.

2. Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Cherkasov V. G. Strategy of rational and integrated use of mineral raw materials based on the best available technologies and assessment of the life cycle of mining waste. *Transbaikalian state university journal.* 2021, vol. 27, no. 4, pp. 32 — 44. [In Russ]. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-32-44.

3. Iliash N., Dunka E., Offenberg Yu., Teshelyanu D. Elements of geoecological audit and accounting of environmental objects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3-1, pp. 359 — 371. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_14_93_2021_31_0_359.

4. Meretukov M. A. *Zoloto i prirodnoe uglerodistoe veshchestvo* [Gold and natural carbonaceous matter], Moscow, Izdatel'skiy dom «Ruda i Metally», 2007, 109 p.

5. Van de Velde K., Barbante C., Cozzi G., Moret I., Bellomi T., Ferrari C. P., Boutron C. F. Changes in the occurrence of silver, gold, platinum, palladium and rhodium in mont blanc ice and snow since the 18th century. *Atmospheric Environment.* 2000, vol. 34, no. 19, pp. 3117 — 3127.

6. Rosenfeld C. E., Chaney R. L., Martinez C. E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Nocca caerulea* (J. Presl & C. Presl) F.K. Mey in field-contaminated soils. *Science of the Total Environment.* 2018, vol. 616 — 617, pp. 279 — 287. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.016.

7. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods. *Hydrometallurgy.* 2018, vol. 181, pp. 215 — 220. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.10.004.

8. Sekisov A. G., Lavrov A. Yu., Rasskazova A. V. *Fotokhimicheskie i elektrokhimicheskie protsessy v geotekhnologii* [Photochemical and electrochemical processes in geotechnology], Chita, ZabGU, 2019, 306 p.

9. *Kuchnoe vyshchelachivanie blagorodnykh metallov.* Pod red. M.I. Fazlullina [Heap leaching of precious metals, Fazlullin M. I. (Ed.)], Moscow, Akademiya gornykh nauk, 2001, 646 p.

10. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Studies of enrichment of sulfide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan shield. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 218–227. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.218.
11. Shumilova L. V. Gravitational-electrochemical method of gold extraction from technogenic placers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S19, pp. 186–192.
12. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019, vol. 140, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.014.
13. Chanturia V. A., Samusev A. L., Minenko V. G. Intensification of chemical-electrochemical leaching of gold from stubborn mineral raw materials. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2020, no. 5, pp. 154–164. [In Russ]. DOI: 10.15372/FT-PRPI20200518.
14. Abramov B. N. Toxicity assessment of mine tailings ponds in Transbaikalia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 136–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.
15. Galachieva S. V., Sokolov A. A., Sokolova O. A., Makhosheva S. A. System of assessment of sustainable development of regional national economic complexes of mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018, vol. 10, no. 3, pp. 329–335. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-329-335.
16. Kornilkov S. V., Antoninova N. Yu., Shubina L. A., Sobenin A. V. On the issue of ecological rehabilitation of the natural ecosystem disturbed during the development of the Kolyvan deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 465–474. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-465-474.
17. Zehra Yigit Avdan, Gordana Kaplan, Serdar Goncu, Ugur Avdan Monitoring the water quality of small water bodies using high-resolution remote sensing data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019, vol. 8, no. 12, article 553. DOI: 10.3390/ijgi8120553.
18. Topp S. N., Pavelsky T. M., Jensen D., Simard M., Ross M. R. V. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications. *Water*. 2020, vol. 12, no. 1, article 169. DOI: 10.3390/w12010169.
19. Dementiev V. E., Voiloshnikov G. I., Fedorov Yu. O. Development of the OA «IR-GIREDMET» for the extraction of valuable components from technogenic raw materials. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 418–427. [In Russ].
20. Shumilova L. V. *Nauchnoe obosnovanie innovatsionnoy tekhnologii izvlecheniya zolota (razrabotka, aprobatsiya v usloviyakh Zabaykal'ya)* [Scientific substantiation of the innovative technology of gold leaching (working, testing in conditions of Transbaikalie)], Izd-vo Palmarium Academic Publishing, Germaniya, 2014, 362 p.
21. Tauzhnyanskaya Z. A. *Tekhnologiya pererabotki uglistykh i bednykh zolotosoderzhashchikh rud za rubezhom* [Technology of processing of carbonaceous and poor gold-bearing ores abroad], Moscow, Tsvetmetinformatsiya, 1972, 30 p.
22. available at: https://www.studmed.ru/view/bragina-vi-tehnologiya-obogascheniya-i-pererabotki-nemetallicheskikh-poleznykh-iskopaemykh_16c54514116.html?page=8;metallurgist.pro%obogaschenie-grafita/ <http://www.mpoltd.ru/poleznoe/391-sposoby-obogashcheniya-grafita.html>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шумилова Лидия Владимировна¹ — д-р техн. наук,
доцент, профессор, e-mail: shumilovalv@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,
Хатькова Алиса Николаевна¹ — д-р техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: alisa1965.65@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

Размахнин Константин Константинович¹ — д-р техн. наук,
доцент, доцент, e-mail: igdranchita@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

¹ Забайкальский государственный университет.

Для контактов: Шумилова Л.В., e-mail: shumilovalv@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.V. Shumilova¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Professor, e-mail: shumilovalv@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

A.N. Khatkova¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: alisa1965.65@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

K.K. Razmakhnin¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Assistant Professor, e-mail: igdranchita@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

¹ Transbaikal State University, Chita, 672039, Russia.

Corresponding author: L.V. Shumilova, e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Получена редакцией 24.07.2023; получена после рецензии 18.08.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 24.07.2023; received after the review 18.08.2023; accepted for printing 10.10.2023.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

**ОЦЕНКА ПОТЕРЬ И РАЗУБОЖИВАНИЯ РУДЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ
ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СО СЛОЖНЫМ МОРФОЛОГИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ**
(2023, № 5, СБ 3, 12 с.)

Лялин Никита Алексеевич¹ — аспирант, e-mail: m141778@edu.misis.com;

Беспалова Юлия Алексеевна¹ — аспирант, e-mail: trekbol3@mail.ru; ¹ НИТУ «МИСиС».

Подземная разработка месторождений со сложным морфологическим строением сопровождается техническими сложностями, включая выбор и применение систем разработки и количественно-качественными показателями добываемого сырья. Рассчитывались и оценивались показатели потерь и разубоживания при использовании комбинированной системы, состоящей из горизонтальной слоевой заходки с закладкой выработанного пространства и системы разработки подэтажным магазинированием. Отмечено влияние формы залегания, изменчивой мощности и анизотропии физико-химических свойств руды на показатели потерь и разубоживания, которые изменяются в широком диапазоне, в зависимости от типа обрабатываемой рудной залежи и системы разработки. Приведено расчетное обоснование общешахтных количественно-качественных показателей и наиболее вероятные факторы, влияющие на них.

Ключевые слова: морфология рудного тела, потери, разубоживание, слоевая система разработки, подэтажное магазинирование, жилообразные тела, штокверкоподобные тела, пластообразные тела.

**ESTIMATION OF LOSSES AND DILUTION OF ORE IN A COMBINED SYSTEM OF UNDERGROUND MINING
OF DEPOSITS WITH COMPLEX MORPHOLOGICAL CONDITIONS**

N.A. Lialin¹, Graduate Student, e-mail: m141778@edu.misis.com; Y.A. Bepalova¹, Graduate Student;

¹ National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Underground mining of deposits with a complex morphological structure is accompanied by many technical difficulties, including the choice and application of mining systems and quantitative and qualitative indicators of the extracted raw materials. In the study, the indicators of losses and impoverishment were calculated and evaluated using a combined system consisting of a horizontal layered backfill with backfilling of the worked-out space and a system of development by underground storage. A significant influence of the form of occurrence, variable thickness, and anisotropy of the physical and chemical properties of the ore on the indicators of losses and impoverishment, which will change in a wide range, depending on the type of ore deposit being mined and the development system, is noted. The calculation substantiation of general mine quantitative and qualitative indicators and the most probable factors influencing them are given.

Key words: morphology of the ore body, losses, impoverishment, layered mining system, underground storage, vein-like bodies, stockwork-like bodies, sheet-like bodies.