ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):346–365
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 669.2+502.174.1+658.567.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_346

ОБЗОР ТЕХНОГЕННЫХ И ВТОРИЧНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ И СПОСОБЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ НИХ ЗОЛОТА

С. А. Федоров[1,2], **А. М. Амдур**[2], **А. Н. Малышев**[2], **П. Ф. Каримова**[2]

[1] Институт металлургии Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия;
2 Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: В настоящее время существует большое количество техногенных и вторичных отходов, содержащих золото. Каждый тип такого сырья требует определенного подхода к извлечению благородного металла в связи с особенностями вещественного состава и формой нахождения в нем золота. В работе проведен литературный обзор золотосодержащих производственных и бытовых отходов. Выделено 11 типов техногенного и вторичного сырья, которые производятся четырьмя основными комплексами: горно-обогатительным, металлургическим, бытовым и энергетическим. Для каждого из типов сырья приведены форма нахождения нем золота, размеры его частиц, содержание, примеры месторождений на территории Российской Федерации и методы извлечения золота. Они условно разделены на три большие группы: обогатительные, гидрометаллургические (химическое воздействие) и пирометаллургические (термическое воздействие). Наиболее активно применяются гидрометаллургические методы (в частности, цианирование), так как они выдают высокие показатели извлечения золота – 80–99%. В свою очередь, такие методы нередко оказывают негативное влияние на окружающую среду, они довольно затратные, продолжительные по времени и имеют низкие показатели извлечения микро- и ультрадисперсного золота, доля которого значительна, особенно в отходах горно-обогатительного и металлургического комплексов. Обогатительные методы, в свою очередь, показывают эффективность извлечения мелкого золота из отходов горно-обогатительного комплекса. Для извлечения микродисперсного золота наибольшей перспективностью обладают пирометаллургические методы, в частности, плавление рудного материала с последующей продувкой расплава, так как только в расплавленном состоянии возможно укрупнить микрокапельки золота.

Ключевые слова: золото, техногенные отходы, вторичные отходы, горно-обогатительный комплекс, металлургический комплекс, бытовые отходы, классификация, методы извлечения.

Благодарности: Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075–03–2021–303 от 29.12.2020.

Для цитирования: *Федоров С. А., Амдур А. М., Малышев А. Н., Каримова П. Ф.* Обзор техногенных и вторичных золотосодержащих отходов и способы извлечения из них золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 346–365. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_346.

© С. А. Федоров, А. М. Амдур, А. Н. Малышев, П. Ф. Каримова. 2021

Industrial and secondary gold-bearing waste and gold recovery techniques: Review

S. A. Fedorov[1,2], **A. M. Amdur**[2], **A. N. Malyshev**[2], **P. F. Karimova**[2]

[1] Institute of Metallurgy, Ural Branch, Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia;
[2] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: Great amounts of industrial and secondary waste accumulated at the moment contain gold. Such waste requires certain approach to the noble metal recovery with regard to specific material constitution and gold occurrence forms. This article offers a review of gold-bearing industrial and domestic waste. There are 11 types of industrial and secondary waste generated in the mining-and-processing industry, metallurgy, municipal engineering and power sector. For each type, the article describes the form of gold occurrence, size, content, deposits in Russia and recovery methods. Conventionally, the gold recovery techniques are divided into three groups: concentrating, hydrometallurgical (chemical treatment) and pyrometallurgical (thermal treatment). The hydrometallurgical techniques, in particular, cyanation, are the most common as they offer higher gold recovery of 80–99%. At the same time, such methods affect the environment, need much investment and time, and offer low recovery of micro- and ultra-fine gold, while such gold features high content in mining, processing and metallurgical waste. The processing methods are efficient in extraction of fine gold from mining-and-processing waste. Regarding micron size gold, the most promising approach is pyrometallurgy, in particular, melting of waste with subsequent purging of the melt as it is only possible to enlarge gold microdrops in molten state.

Key words: gold, mining waste, secondary waste, mining-and-processing sector, metallurgical sector, municipal waste, classification, recovery techniques.

Acknowledgments: The study was carried out under R&D State Contract with the Ural State Mining University, Contract No. 075-03-2021-303 as of 29 December 2020.

For citation: Fedorov S. A., Amdur A. M., Malyshev A. N., Karimova P. F. Industrial and secondary gold-bearing waste and gold recovery techniques: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):346–365. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_346.

Введение

С ростом и развитием областей промышленности, использующих золото и сплавы на его основе, спрос на благородный металл резко возрастает. Однако, запасы богатого золотосодержащего минерального сырья с каждым годом снижаются. Этот факт, а также влияние глобального экономического кризиса, заставляет включать в переработку золотосодержащие техногенные и вторичные отходы, решать вопросы касательно полного извлечения Au из отходов. Уже к 2013—2015 гг. около 25% золота на мировом рынке получено за счет переработки вторичного сырья [1]. На территории России ресурсный потенциал только техногенных комплексов оценивается в 50—60% от добытого в стране золота [2]. Для извлечения металла из такого сырья предложено большое количество методов, строящихся преимущественно на выщелачивании золота [3—4]. Однако данных о какой-либо классификации по золотосодержащим отходам и известным методам извлечения из них благородного металла в открытых источниках очень мало. К настоящему времени авторами обнаружены только общая классификация всех техногенных месторождений по типу про-

Таблица 1
Характеристика и классификация техногенного и вторичного сырья на золото
Characteristics and gold content-related characteristics of industrial and secondary waste

Тип сырья	Содержание золота (среднее), г/т	Минеральная форма и размер частиц	Примеры месторождений
I. Техногенные отходы			
Горно-обогатительный комплекс			
Отвалы вмещающих и вскрышных пород	0,1 – 0,5	Самородное золото; сплавы и интерметаллиды с Cu, Ag; твердые растворы с медными сульфидами, арсенопиритом; реже – сульфоарсениды, теллуриды, антимониды, висмутиды, сульфосоли; размер частиц варьирует от 1 мкм до 4 мм	Отвалы рудника им. III Интернационала, отвалы Буримбаевского ГОК
Хвостохранилища обогатительных фабрик	0,1 – 8,5 (0,3 – 1)		Хвостохранилища Семеновской и Артемовской ЗИФ, ЗИФ Алтынтау Кокшетау, Учалинская, Александринская и Сибайская ОФ
Лежалые пирротиновые концентраты	0,3	Предположительно самородное золото и твердые растворы с сульфидами; микродисперсные частицы	Лежалые пирротиновые концентраты ГМК «Норильский никель»
Лежалые пиритные концентраты	1,1 – 3,7	Самородное золото; интерметаллиды и сплавы с Cu и Ag; твердые растворы с сульфидами	Отвалы Левихинского рудника (Средний Урал)
Техногенные россыпи	0,5 – 65,9 (менее 1,0)	Самородное золото; амальгамы золота и сплавы с Ag и Pb; размер зерен от 5 до 500 мкм	Техногенные россыпи р. Кедровка и р. Нагима (Верхнее Приамурье)
Металлургический комплекс			
Отвалы пиритных огарков	0,7 – 1,5	Форма нахождения золота и размер его частиц не установлены	Твердые отходы сернокислотного производства ОАО «Минудобрения», Полевского сернокислого завода
Шлакоотвалы	0,1 – 0,4	Сплавы с медью и сурьмой, интерметаллиды Au_3Cu, AuCu, размерами от 0,1 до 20 мкм	Шлакоотвалы Кировградского медеплавильного и Среднеуральского медеплавильного заводов
Сточные воды гидрометаллургического производства	0,019 – 0,046*	Предположительно, органические и комплексные соединения	Сточные воды и пруды заводов по переработке медного сырья
Иловые техногенные отложения	0,1 – 0,3	Самородная форма; размер частиц не более 5 мкм	Пруды-отстойники металлургических комбинатов

Окончание табл. 1

Тип сырья	Содержание золота (среднее), г/т	Минеральная форма и размер частиц	Примеры месторождений
II. Вторичные отходы			
Бытовой комплекс			
Электроника	110 — 10000	Самородная форма, металлические сплавы; пленки и напыления толщиной несколько мкм	—
Энергетический комплекс			
Золоотвалы ТЭЦ	0,13 — 25 (0,6 — 1,1)	Самородное золото; зерна, реже комковидные агрегаты крупностью 5 — 40 мкм	Золоотвалы ТЭЦ г. Хабаровск

Примечание: *содержание золота в г/дм^3.

мышленного производства [5] и обзоры преимущественно гидрометаллургических методов извлечения золота [4].

В статье рассмотрены, объедены и классифицированы как золотосодержащие техногенные и вторичные отходы, так и известные методы извлечения золота из них.

Основные типы техногенных и вторичных отходов, содержащих золото

Из большого количества техногенных и вторичных отходов лишь ограниченное число можно рассматривать в качестве золотосодержащего сырья. К техногенным обычно относят отходы горно-металлургического комплекса. Все остальное можно отнести ко вторичным отходам, связанным с производственным и бытовым мусором. В работе выделено, рассмотрено и классифицировано 11 различных типов отходов (табл. 1), являющихся потенциальным сырьем для извлечения золота. Все они разделены по типу своего производства, по аналогии, что ранее авторами было сделано по металлам платиновой группы [6]. В классификации не рассматриваются оборотные продукты, такие, например, как отходы ювелирного производства.

Ниже приведена краткая характеристика каждого из выделенных типов.

1. Техногенные отходы

Техногенные золотосодержащие отходы — это отходы предприятий, направленные на добычу и производство цветных и благородных металлов. Подавляющее большинство таких отходов характеризуются относительно невысоким содержанием золота (в среднем 0,5 — 1 г/т), близкими к природным рудам минеральным и химическим составами, значительными запасами (десятки тонн на одном месторождении), преимущественно мелкозернистым составом (размер зерен 1 — 2 мм). Данные условия даже при не больших содержаниях золота делают техногенные отходы основным сырьевым ресурсом благородного металла после коренных руд и россыпных месторождений.

В целом, исходя из характера производства и опираясь на классификацию А. Б. Макарова и др. [5], можно

выделить отходы по двум комплексам: горно-обогатительный и металлургический.

1.1. Горно-обогатительный комплекс

Комплекс включает в себя следующий перечень отходов: отвалы вмещающих и вскрышных пород, хвостохранилища обогатительных фабрик, лежалые пирротиновые концентраты, пиритные концентраты, техногенные россыпи. Отличаются данные отходы от других техногенных тем, что сохраняют свой качественный минеральный состав исходных руд: минералы в них остаются теми же, что и в руде, изменяется только количественный состав. Отходы включают в себя отвалы вмещающих и вскрышных пород, хвостохранилища обогатительных фабрик, пирротиновые концентраты, пиритные концентраты, техногенные россыпи.

1.1.1. Отвалы вмещающих и вскрышных пород

Довольно бедные по содержанию золота отходы (в среднем 0,1 — 0,5 г/т) [5, 7]. Большая часть отходов представлена раздробленными магматическими породами кислого или среднего составов, либо метасоматитами. Основная доля золота в них находится в самородной форме, форме сплавов и интерметаллидов систем Au-Cu, Au-Ag, Au-Ag-Cu, реже — образует сульфоарсениды, теллуриды, антимониды, висмутиды, сульфосоли [8, 9]. Также отходы могут быть представлены твердыми растворами преимущественно в мышьяксодержащих сульфидах. Размер золотосодержащих частиц меньше 10 мкм, в редких случаях их величина может достигать 4 мм.

Часто отвалы вмещающих и вскрышных пород используют при закладке горных выработок или при производстве цементных и бетонных смесей. Нередко применяют для рекультивации нарушенных земель за счет низкого содержания вредных компонентов. Однако отвалы вмещающих и вскрышных пород стоит рассматривать в качестве сырья на золото, так как при небольших содержаниях запасы значительны (миллионы тонн отходов), и они нередко содержат в себе фрагменты исходной руды. На территории России известны два достаточно крупных техногенных месторождений золота данного типа — это отвалы рудника им. III Интернационала и отвалы Буримбаевского ГОК с содержаниями благородного металла 0,5 г/т и запасами более 1 т [5].

1.1.2. Хвостохранилища обогатительных фабрик

Отходы данного типа являются самыми богатыми по запасам золота из всех известных: сформировано до 600 млрд т хвостов, в которых сохраняется по разным оценкам от 10 до 40% не извлеченного благородного металла со средним содержанием 0,2 — 0,5 г/т [10]. Только на Урале запасы техногенного золота в хвостах обогащения оцениваются в 150 т [11]. Хвостохранилища состоят из мелкозернистого рыхлого материала (размер зерен не более 1 мм) со следующим усредненным минеральным составом: кварца до 60%, полевых шпатов — до 25%, слюдисто-глинистых минералов — до 10%, оксидов, гидроксидов железа — до 9%, сульфидов — до 2% [12]. Золото преимущественно находится в свободном виде, остальная его часть — образует минеральные формы, аналогичные тем, что присутствуют в отвалах вмещающих пород. Размер частиц золота варьируется от 1 до 50 мкм (реже более 100 мкм), содержание его в хвостах — от 0,1 до 6 г/т (при среднем 0,3 — 1,0 г/т) [8, 13 — 16]. Известные техногенные месторождения, представленные хвостами обогащения (с содер-

жанием золота) — хвостохранилища Михайловского ГОК (0,3 г/т), Семеновской и Артемовской ЗИФ (1,2 и 0,3 г/т соответственно), ЗИФ «Алтынтау Кокшетау» (8,5 г/т), Учалинская, Александринская и Сибайская ОФ (0,75 г/т) [8, 10, 17—18].

При долгом нахождении хвостов обогащения на открытом воздухе золото за счет дождевых и других вод может переходить в органические и прочие фазы, в незначительной степени водорастворимые и ионообменные формы — 9—17% [19]. Это приводит к неизбежной частичной потери золота из техногенных отходов.

1.1.3. Лежалые пирротиновые концентраты

Хранилища пирротиновых концентратов в открытых источниках известны только на территории ГМК «Норильский никель» [14—15]. Они сформировались во 2-ой половине XX века, когда существовавшие в то время методы извлечения цветных и благородных металлов были нерентабельны для такого типа материалов. За несколько десятилетий сформировалось более 10 млн т концентратов, в которых среднее содержание золота составляет 0,3 г/т [15]. Лежалые пирротиновые концентраты сложены частицами класса крупности -0,045 мм (занимают до 95% от массы концентрата). Состоят из силикатов (до 40 масс. %), пирротина (до 45 масс. %) и других сульфидов. Золото в них находится, предположительно, в самородной форме (с размером частиц в несколько мкм) и в виде твердых растворов с сульфидами.

1.1.4. Лежалые пиритные концентраты

В настоящее время отвалов пиритных концентратов мало, все они уходят в производство серной кислоты. Они являются продуктами флотационного обогащения. Содержание пирита в таких материалах — не менее 20—25 масс. %, а количество золота варьируется от 1,1 до 3,7 г/т [20]. Золото, как и во всех предыдущих материалах, находится в самородной форме, сплавах и интерметаллидах Au-Cu, Au-Ag, Au-Ag-Cu, твердых растворах с пиритом и другими сульфидами. Сохранились преимущественно старые отвалы пиритных концентратов, образовавшиеся еще в XX веке в связи с отсутствием экономически рентабельной технологии доизвлечения из них цветных и благородных металлов. Примером техногенного месторождения, представленного пиритными концентратами, могут служить отвалы Левихинского рудника (Средний Урал), где содержание пиритов, по нашим данным, варьирует от 25 до 60 масс. %, а Au — до 3,7 г/т.

1.1.5. Техногенные россыпи

Второй по запасам золота тип техногенных отходов. Формируется за счет временных и постоянных водотоков вблизи горно-металлургических отходов, либо представляет собой отходы после переработки природных россыпей (после драги). Золото в них, по сравнению с предыдущими отходами, высокопробное, и находится в самородной форме, намного реже — представлено сплавами и интерметаллидами систем Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb. Почти все самородное золото находится в тесных срастаниях с породообразующей матрицей различного состава. Под воздействием физико-химических и биохимических процессов в техногенных россыпях происходят различные преобразования самородного золота: очищение за счет выноса серебра, разрушение минералов-концентраторов золота, осаждение микро- и нанозолота на геохимических барьерах с формирова-

нием так называемого «нового» золота (от нанообразваний до микро- и макроформ) [21]. Содержание благородного металла в россыпях очень сильно варьируется — от 0,1 до 65,9 г/т, однако среднее содержание менее 1 г/т (обычно 0,3—0.5 г/т). Частицы золота имеют размеры от 5 до 500 мкм [9, 22—23]. Наиболее известны техногенные россыпи в районе Верхнего Приамурья по р. Кедровка и р. Нагима с содержанием золота 0.3 г/т [22].

1.2. Металлургический комплекс

Отходы металлургического комплекса, в отличие от других техногенных отходов, подвергались агрессивному химическому и высокотемпературному воздействию. Благодаря этому вещественный состав металлургических отходов может резко отличаться от состава исходных руд. Материал отходов различной крупности — от менее 100 мкм до 10—15 см, непостоянный химический и минеральный составы, низкое содержание рудных компонентов (менее 1 масс. %) и золота (0,1—0,5 г/т). Само золото находится в основном в форме сплавов и интерметаллидов. Основные золотосодержащие отходные продукты металлургического комплекса — пиритные огарки, шлакоотвалы, сточные воды гидрометаллургического производства, иловые отложения прудов-отстойников.

1.2.1. Отвалы пиритных огарков

Пиритные огарки — продукты обжига пиритных концентратов, которые используют для сернокислотного производства. Отходы представляют собой дисперсный порошок буроватых цветов с размером частиц от 5 мкм до 2 мм. В минеральном составе преобладает гематит, магнетит и кварц, присутствуют сульфаты и сульфиты, в небольших количествах пирит и халькопирит. Содержание золота в огарках 0,7—5,0 г/т [18, 24], форма его нахождения не установлена. Предположительно оно находится в самородном виде, либо в сплавах и интерметаллидах с медью и серебром. В виде руды золото содержится в твердых отходах сернокислотного производства ОАО «Минудобрения» (Au 0,7—5,0 г/т), Полевского сернокислого завода и Кировградского медеплавильного комбината.

1.2.2. Шлакоотвалы

Наличие золота наблюдается преимущественно в отвальных шлаках пирометаллургического передела медных концентратов. Крупность обломков и зерен в шлакоотвалах очень сильно различается (от долей мм до нескольких десятков см), значительную долю в минеральном составе которых может забирать на себя стекло. Количество сульфидов и других рудных минералов обычно не превышает 1,5 — 2 масс. %. Золото образует сплавы с медью и сурьмой и интерметаллиды Au_3Cu, AuCu размерами от 0,1 до 15—20 мкм. Весь благородный металл сконцентрирован в сульфидных корольках. Содержание золота в шлаках достаточно низкое (0,1—0,4 г/т), суммарно с металлами платиновой группы оно достигает 1—2,2 г/т [5, 14, 15, 25]. Пример месторождений данного типа — шлакоотвалы Кировградского медеплавильного завода и Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) с содержанием Au 0,2—0,4 г/т [5].

1.2.3. Сточные воды гидрометаллургического производства

Малоизученный техногенный тип золотосодержащих отходов. Он отличается от всех других тем, что большая часть золота находится в ионной форме в растворах. В осадках золото, предположительно, образует органические и комплексные соединения. Скапливаются золотосодержащие растворы в прудах-отстойниках и хвостохранили-

щах заводов по гидрометаллургической переработке медного сырья. Содержание благородного металла в отдельных растворах, полученных при гидрометаллургических стадиях переработки медного сырья и уходящих в сточные воды, составляет 0,019 — 0,046 г/дм^3 [14].

1.2.4. Иловые техногенные отложения

По аналогии со сточными водами, так же малоизученный тип отходов. Часто образуются в прудах-отстойниках металлургических комбинатов, связанных с цветной металлургией. Лежалые илы состоят из тонкой фракции, размер зерен менее 0,5 мм. Состоят они из глинистых минералов, оксидов и гидроксидов железа, хлорита, кварца. Золото присутствует в самородной форме, иногда образует сплавы с ртутью, размер зерен не более 5 мкм. Содержание Au достигает 0,1 — 0,3 г/т [26 — 27].

2. Вторичные отходы

Основными представителями данной группы являются электроника (или электронный лом) и отходы энергетического комплекса. Остальные отходы сразу же включаются в переработку (ювелирный лом) либо отличаются весьма низкими содержаниями золота.

2.1. Электроника

Электронные отходы считаются одним из самых быстро накапливаемых видов мусора в мире: каждый год образуется несколько миллионов тонн отходов. А с учетом наличия в них большого количества цветных и благородных металлов они становятся богатейшим вторичным сырьем. Еще одним положительным фактором является то, что полезные компоненты, в отличие от руд, располагаются в конкретных деталях электронных устройств и легко поддаются извлечению, практически всегда стопроцентному. Основная же доля золота в электронных отходах находятся в печатных платах, микросхемах компьютеров и мобильных телефонов в виде тонких пленок (толщиной в несколько мкм). Однако, в зависимости от года выпуска отработанной электронной техники или вида конкретного устройства и микросхемы, содержание золота варьирует в широких пределах: от 110 до 10000 г/т [28 — 30].

2.2. Энергетический комплекс

Группа включает в себя только золоотвалы теплоэлектростанций и централей (ТЭС и ТЭЦ). Материал золотосодержащих золошлаковых отвалов мелкозернистый (основная часть зерен имеет размер менее 1 мм), состоит из алюмосиликатов, ферритов, карбонатов, оксидов и углеродистого вещества (около 90 масс. % занимают SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3). Золото в основной своей массе тонкое и пылевидное, представлено зернами, реже комковидными агрегатами крупностью 5 — 40 мкм, максимальные размеры золотин 1,0 мм (находятся в сростках с кварцем). Большая часть благородного металла связана со шлаковой составляющей. Содержания золота от 0,1 до 25 г/т, среднее — 0,6 — 1,1 г/т [31]. Примером месторождения золота такого типа являются золошлаковые отходы Хабаровских ТЭЦ.

Методы извлечения золота из техногенных и вторичных отходов

В зависимости от форм нахождения золота и вещественного состава вмещающего его отходного материала схемы переработки могут сильно отличаться. Все методы извлечения золота из отходов можно поделить на три большие группы: обогатительные, гидрометаллургические (химическое воздействие), пирометаллургические (термическое воздействие). Наиболее распространенные методы извлечения золотосо-

Таблица 2

Методы извлечения золота из техногенных и вторичных отходов
Methods of gold recovery from industrial and secondary waste

Название метода	Извлечение Au, %	Отходы, к которым применяется метод
1. Обогатительные методы		
Гравитационное обогащение	50 — 85	Отходы горно-обогатительного и энергетического комплексов
Флотационное обогащение	10 — 15	Лежалые пирротиновые и пиритные концентраты, хвосты обогащения
Гравитационно-флотационное обогащение	Не более 94	Хвосты обогащения
2. Гидрометаллургические методы		
Цианистое выщелачивание	13 — 99	Отвалы вскрышных и вмещающих пород, хвосты обогащения, отвалы пиритных огарков, техногенные россыпи
Автоклавное выщелачивание	Не более 95	Отвалы вскрышных и вмещающих пород, хвосты обогащения, отвалы пиритных огарков, техногенные россыпи
Галогенидное выщелачивание	80 — 98	Хвосты обогащения, техногенные россыпи
Выщелачивание тиомочевиной	90 — 95	Хвосты обогащения
Выщелачивание тиосульфатом	Не более 90	Отходы горно-обогатительного комплекса
Выщелачивание 1-фенил-2-тио-3-(2-гидроксиэтил) мочевиной	Не более 95	Хвосты обогащения, вторичные отходы
Бактериальное выщелачивание	Не более 95 — 99	Отходы горно-обогатительного комплекса, электроника
3. Пирометаллургические методы		
Обжиг и последующее выщелачивание	70 — 85	Лежалые пиритные концентраты
Плавление рудного материала с последующей продувкой расплава	30 — 100	Отвалы вскрышных и вмещающих пород, хвосты обогащения, шлакоотвалы

держащего техногенного и вторичного сырья и их характеристики по данным источников [3 — 4, 7, 11 — 13, 16, 17, 20, 27 — 30, 32 — 39] приведены в табл. 2.

1. Обогатительные методы

Предварительно многие золотосодержащие отходы проходят стадию обогащения с дальнейшим получением богатого концентрата, из которого золото извлекают уже гидро- или пирометаллургическими методами. Используют преимущественно гравитационное, флотационное и гравитационно-флотационное обогащение. Обычно такие методы применяют для довольно богатых по содержанию золота отходов либо в случае, если крупность частиц благородного металла измеряется от сотых долей мм и более. Микродисперсное золото

перечисленными методами практически не извлекается. Гравитационному и флотационному обогащению подвергаются отходы горно-обогатительного и металлургического комплексов. Извлечение золота колеблется в широких пределах: от 20 до 85%.

1.1. Гравитационное обогащение

Метод основан на использовании действия силы тяжести, при которой рудные фазы отделяются от нерудных за счёт разницы их плотности и размера частиц. В качестве гравитационных аппаратов для извлечения золота из хвостов обогащения в последнее время [3, 22] используются различные виды центробежных концентраторов, такие, как Knelson и Falcon (Канада, США), Итомак, К-80 (Россия) и др. Получаемые золотосодержащие концентраты отправляются на дальнейшую гидро- и пирометаллургическую обработку. Извлечение золота в концентрат находится обычно на уровне 50—70%, в редких случаях увеличивается до 80—85% [11, 21, 32].

Метод гравитационного обогащения является низко затратным и относительно экологически безопасным для извлечения мелкого золота из хвостов обогащения и отходов энергетического комплекса.

1.2. Флотационное обогащение

Флотационное обогащение строится на различии в удельных поверхностных энергиях минеральных фаз, за счет чего одни фазы удерживаются на межфазовой поверхности, другие — тонут. Для каждого конкретного золотосодержащего сырья необходимы свои параметры процесса и флотореагенты. Флотационное обогащение эффективно для крупных фракций золота, извлечение мелкого золота проблематично: при размере частиц благородного металла менее 40—50 мкм оно составляет 10—15% [21].

Данный метод также применяют для лежалых пирротиновых концентратов, реже — для лежалых пиритных концентратов и хвостов обогащения. Высокую эффективность метод показывает в комплексе с другими обогатительными операциями (чаще с гравитационным обогащением).

1.3. Гравитационно-флотационное обогащение

Комбинирование двух предыдущих методов обогащения. Очень часто применяется для лежалых пирротиновых концентратов и для хвостов обогащения. Метод включает в себя измельчение, нередко ультратонкое на бисерной мельнице, обогащение на гравитационном концентраторе типа Knelson и последующую флотацию полученного концентрата. Извлечение мелкого золота в таком случае может достигать 94% [33—34].

2. Гидрометаллургические методы

Ведущая группа по извлечению золота из отходного сырья и самая богатая по разнообразию применяемых методов. Строятся они на серии кислотных или щелочных выщелачиваний. Далее полученные растворы подвергаются процедурам разделения и очистки, таким как осаждение примесей, экстракция растворителем, адсорбция и ионный обмен, для выделения и концентрирования золота и прочих интересующих металлов.

У этой группы методов весьма высокий показатель извлечения золота — 80—99%. Однако уровень извлечения для микродисперсного золота — низкий. Применяются методы для всех видов отходов, наиболее часто — для хвостов обогащения и электроники.

2.1. Цианистое выщелачивание

Главный и широкоприменяемый метод извлечения золота из техногенных и вторичных отходов. Цианистое

выщелачивание основано на избирательном растворении золота в растворах цианидов металлов в присутствии растворенного в пульпе кислорода. Растворение золота проводится в щелочной среде при pH 10 — 12 в цианистых растворах небольшой концентрации (0,03 — 0,3%).

Процесс цианирования проходит в соответствии со следующей химической реакцией:

$$2Au + 4NaCN + \frac{1}{2}O_2 = \\ = 2Na\left[Au\left(CN\right)_2\right] + 2NaOH.$$

Цианирование — длительный процесс: в зависимости от материала и формы нахождения золота в нем цианирование может продолжаться от 24 до 72 ч. Расход цианида натрия составляет от 0,2 до 0,5 кг на 1 тонну рудного материала.

В настоящее время в промышленности применяются следующие методы цианирования:

— перколяционный (просачивание);

— метод перемешивания при интенсивной аэрации пульпы (реакторы, пачуки). Этот метод называют чановым выщелачиванием;

— кучное выщелачивание, которое является разновидностью перколяционного выщелачивания.

Из цианистых растворов после отделения и очистки их от твердой фазы золото может выделяться методом осаждения цинком, а также сорбцией на угле и ионообменных смолах. Из богатых золотосодержащих растворов золото выделяется электролизом с получением золотосодержащих шламов, из которых после плавки с флюсами получается сплав с серебром (сплав Доре). Весьма удобный метод для извлечения мелкого золота, однако он не всегда пригоден для микродисперсного благородного металла. Если в первом случае извлечение достигает 95 — 99%, то во втором случае может упасть до 13%. Отрицательные стороны цианистого выщелачивания — серьезное загрязнение окружающей среды и длительность самого процесса [4, 7, 11, 32].

2.2. Автоклавное выщелачивание

Автоклавное выщелачивание основано на окислении сульфидов и последующем растворении золота при помощи водных растворов щелочей и кислот с использованием автоклава, где создается повышенное давление и температура от 100 до 500°C. В комплексе с бактериальным выщелачиванием и цианированием сквозное извлечение золота может составлять 95% [33, 35].

Отрицательная сторона данного метода — повышенное содержание сульфидной серы в концентрате, выше уровня автогенности (примерно 6% сульфидной серы), что осложняет автоклавное выщелачивание.

2.3. Галогенидное выщелачивание

Золото свободно образует комплексы Au (I) и Au (III) с хлоридом, бромидом и йодидом в зависимости от условий химического состава раствора. На этом свойстве строится метод галогенидного выщелачивания [4, 16, 34].

Однако из галогенидов только хлор/хлорид применяется в промышленных и значительных масштабах. Скорости хлорирования благоприятствуют низкий pH, высокий уровень хлоридов и хлора, повышенные температуры и высокие площади поверхности выщелачиваемого материала. Сейчас комплекс хлорида золота $HAuCl_4$ восстанавливается на активированном угле в виде металлического золота, что обычно приводит к потере золота в хвосты из-за истирания мелких частиц золота с поверхности частиц активи-

рованного угля. Хлоридное выщелачивание золота труднее, чем цианидное выщелачивание за счет того, что газообразный хлор очень ядовит, и его необходимо контролировать, чтобы избежать риска для здоровья [4, 16].

Бром имеет ряд преимуществ, включая быструю экстракцию, нетоксичность и приспособляемость к широкому диапазону значений pH. Хотя высокая скорость растворения дает ему определенное преимущество перед цианидом, при использовании брома часто наблюдается высокий расход реагентов, и поскольку он может объединяться с другими элементарными частицами с образованием токсичных соединений, затраты на строительные материалы, способные выдерживать такие условия, и последствия для здоровья могут быть значительными.

Скорость выщелачивания золота в растворах йодида также намного выше, чем при цианировании. Несмотря на то, что комплексы йодида золота являются наиболее стабильными в водных растворах (среди галогенов), йод по-прежнему недостаточно используется и малоизучен как выщелачивающий агент золота. Во многом это связано с его стоимостью [4, 34].

Однако, несмотря на повышенную токсичность некоторых галогенидов, извлечение золота из отходных материалов может достигать 80 — 98%.

2.4. Выщелачивание тиомочевиной

Тиомочевина $(NH_2)_2CS$, используемая в качестве агента для извлечения золота из отходных материалов, показала большие перспективы. В кислых условиях тиомочевина растворяет золото, образуя катионный комплекс $Au(CS[NH_2]_2)_2^+$.

Выщелачивание проводится в диапазоне pH 1 — 2, и его успешное применение зависит от тщательной оптимизации и контроля уровня pH, окислительно-восстановительного потенциала, концентрации тиомочевины и времени выщелачивания. Тиомочевину можно использовать напрямую, поскольку выщелачивание золота происходит в кислых растворах. Тиомочевина дороже цианида, потребление при переработке золота велико. Также возникает обеспокоенность по поводу его воздействия на окружающую среду. Однако извлечение золота с помощью этого реагента составляет 90 — 95% [4, 27].

2.5. Выщелачивание тиосульфатом

Золото медленно растворяется в щелочном тиосульфате. Скорость растворения зависит от концентрации тиосульфата и растворенного кислорода, температуры процесса, и может быть увеличена добавлением ионов меди. Хотя комплекс тиосульфата золота после образования достаточно стабилен, необходимы щелочные условия для предотвращения разложения тиосульфата кислотой. Процесс выщелачивания тиосульфата катализируется медью и имеет ряд преимуществ по сравнению с обычным процессом цианирования, несмотря на его низкую скорость. Приемлемые скорости выщелачивания золота с использованием тиосульфата достигаются в присутствии аммиака вместе с медью. В последние годы этот реагент рассматривался как потенциальный заменитель цианида, поскольку он обычно вызывает меньшее воздействие на окружающую среду. Также выщелачивание тиосульфата оказывает меньшее влияние на посторонние катионы и вызывает меньше опасений по поводу загрязнения. Высокий расход реагентов делает большинство тиосульфатных систем в целом неэкономичными, несмотря на их потенциальные экологические преимущества [4]. Извлечение золота

с помощью тиосульфатного выщелачивания может достигать 90% [4, 20].

2.6. Выщелачивание 1-фенил-2-тио-3-(2-гидроксиэтил) мочевиной

1-Фенил-2-тио-3-(2-гидроксиэтил) мочевина способна растворять золото с относительно высокими выходами (> 95%). Происходит это в присутствии окислителя Fe^{3+} в растворе серной кислоты при pH 0,9 — 1,2 и комнатной температуре в течение 120 ч. Экспериментальные результаты [4], полученные в этом исследовании, показали, что замещенные производные тиомочевины с открытой цепью могут действовать как очень эффективные выщелачивающие агенты.

2.7. Бактериальное выщелачивание

Биогидрометаллургия золота в последние десятилетия получает все более широкое распространение и обладает потенциалом для крупного технологического прорыва для промышленности материалов и минералов из-за большого интереса, проявляемого крупными международными компаниями к этой новой технологии. Существует два основных направления бактериального выщелачивания для извлечения золота: биоокисление и биосорбция [4].

Биоокисление происходит с использованием тионовых железоокисляющих мезофильных бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* или умеренно термофильных микроорганизмов рода *Sulfobacillus* [32]. Выщелачивающая среда с pH 2,0 — 2,2 содержит бактерии в количестве до 10^9 кл/см^3. Эти бактерии адаптируются к высокому содержанию в пульпе, например, мышьяка, являющегося сильным ингибитором жизнедеятельности бактерий. Выщелачивание проводится в чанах с механическим перемешиванием и подачей воздуха при соотношении Т:Ж=1:5 — 1:4. В процессе бактериального выщелачивания, продолжительность которого составляет от 90 до 100 ч, происходит окисление и растворение сульфидных минералов, при котором микродисперсное золото вскрывается с высокой эффективностью. В растворы при выщелачивании переходят мышьяк, в основном в пятивалентной форме, и железо в трехвалентной форме. Твердая фаза направляется на сорбционное цианирование, а растворы после удаления из них мышьяка и железа с повышением pH до 3,0 — 3,1 и подачей извести направляются на процесс бактериального выщелачивания в виде оборотных растворов. Такая технология позволяет извлечь из труднообогатимых золотосодержащих руд и техногенных образований до 95% золота, в то время как цианирование концентрата без бактериального вскрытия обеспечивает извлечение золота до 30% [17, 30, 32].

Процесс биосорбции — пассивное физико-химическое взаимодействие между заряженными поверхностными группами микроорганизмов и ионами в растворе. Известно, что многие микроорганизмы, включая водоросли, бактерии, дрожжи и грибы, активно накапливают золото. Среди них повышенной золоторастворяющей активностью обладают представители родов Bacillus, Bacterium, Chromobacterium, при использовании которых максимальная концентрация металла в растворах достигает 1,35 — 2,15 мг/л после 3,5 — 4,0 месяцев взаимодействия. Процесс микробиологического растворения золота интенсифицируется путем селекции активных штаммов, подбора питательных сред и специальных окислителей, что в совокупности обеспечивает достижение вышеуказанных концентраций металла в культурных растворах за 20 сут. Наиболее

активно растворяют золото полученные на основе индуцированного мутагенеза измененные штаммы бактерий Bac. mesenteriicus niger 12 и 129 при использовании мочевины в качестве источников азота, а в качестве источников углерода — глюкозы (углевод из группы моносахаридов) или мелассы (кормовая патока).

Извлечение золота данным методом может достигать 99%. Однако в отходном сырье, где преобладает микро- и ультрадисперсное золото, и основная его доля сосредоточена в породообразующих минералах (кварц, кальцит и т.д.), извлечения благородного металла будет на низком уровне [3, 4]. Основным отрицательным фактором бактериального выщелачивания будет сложность самой технологии: создание и поддержание определенных условий среды для бактерий, длительность процессов окисления и растворения рудного материала.

3. Пирометаллургические методы

Пирометаллургические процессы, по сравнению с другими группами методов извлечения золота, пользуются гораздо меньшим распространением. Связано это с тем, что в настоящее время извлекают преимущественно дисперсное и мелкое золото известными традиционными методами, а извлечения микро- и ультрадисперсного благородного металла находится на стадиях разработки. К последним и относятся пирометаллургические методы (за исключением обжига). Применяются они для отходов горно-обогатительного и металлургического комплексов. Данные методы в совокупности с другими способны практически полностью извлекать благородный металл из отходного сырья.

3.1. Обжиг и последующее выщелачивание

Окислительный обжиг — традиционный способ подготовки к выщелачиванию золота из материала, содержащего большое количество сульфидов. Последние представлены пиритом, реже и в значительно меньших количествах — арсенопиритом и халькопиритом. При нагреве свыше 450 °С в присутствии кислорода происходит окисление пирита и других сульфидов:

$$FeS_2 + O_2 = FeS + SO_2;$$
$$3FeS + 5O_2 = Fe_3O_4 + SO_2;$$
$$4Fe_3O_4 + O_2 = 6Fe_2O_3.$$

Зерна гематита после окисления пирита, соответственно, приобретают пористую и рыхлую структуру, открывая тем самым доступ выщелачивающих растворов к частицам золота. Температуры обжига 700—750 °С [37], продолжительность процесса обычно не превышает пару часов. После обжига полученный пиритный огарок подвергают выщелачиванию, обычно цианистыми растворами. Извлечение золота при этом из такого материала не превышает 70—85% [37].

3.2. Плавление рудного материала с последующей продувкой расплава

Метод перспективен для извлечения микро- и ультрадисперсных частиц золота из отвалов вскрышных и вмещающих пород, хвостов обогащения и шлакоотвалов. При плавлении отходных минеральных материалов и их продувке капельки золота в расплаве флотируются под действием сил межфазного натяжения пузырьками газа. В процессе флотации идет коагуляция, в ходе которой капельки золота способны увеличиваться до значительных размеров (100 мкм и более). После плавления полученный шлак дробят, и золото извлекают уже традиционными методами обогащения: гравитационной сепарацией или цианированием. Температура плавки обычно лежит в диапазоне 1250—1350 °С, длительность

процесса не более 20—30 мин. Применение данного метода в совокупности с традиционными способно повысить извлечение золота практически до 100% [39].

Заключение

Резюмируя, можно отметить большое разнообразие по своей природе, содержанию и запасам техногенного золота и вторичных отходов. Если в одних отходах наблюдается относительная стабильность по форме нахождения золота, его содержанию и запасам (отвалы вмещающих и вскрышных пород, сточные воды и электроника), то в других — очень сильный разброс по показателям (хвосты обогащения, отходы энергетического комплекса).

Себестоимость извлечения золота из такого отходного сырья будет значительно ниже, чем при его извлечении из коренных руд, так как исключаются дорогостоящие операции добычи, дробления и т.д. Это, в свою очередь, объясняет и большое разнообразие методов извлечения золота, из которых более активно применяются гидрометаллургические методы, так как они имеют высокие показатели извлечения Au — 80—99%. В свою очередь, такие методы нередко оказывают негативное влияние на окружающую среду, они довольно затратны, продолжительны по времени, отличаются низкими показателями извлечения микро- и ультрадисперсного золота, доля которого значительна, особенно в отходах горно-обогатительного и металлургического комплексов. Эффективны гидрометаллургические методы для электроники и отходов с повышенным содержанием сульфидных фаз.

Обогатительные методы показывают эффективность извлечения мелкого золота из отходов горно-обогатительного комплекса.

Для извлечения микродисперсного золота наибольшей перспективностью обладают пирометаллургические методы, в частности, плавление минерального материала с последующей продувкой расплава, так как только в расплавленном состоянии возможно укрупнить микрокапельки золота [39].

Все это показывает узкую направленность каждого метода по отношению к конкретным отходным материалам. К тому же многие из методов извлечения золота находятся на стадиях разработки и требуют дальнейшего изучения и промышленных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Железцов Е. Н.*, *Иванова М. А.* Современное состояние мирового рынка золота и роль российских золотодобывающих предприятий // Международный научный журнал «Символ науки». — 2016. — № 5. — С. 103—108.
2. *Рассказов И. Ю.*, *Александрова Т. Н.*, *Литвинцев В. С.* Проблемы извлечения тонкодисперсного золота из песков техногенных россыпей и некоторые пути их решения // Материалы межрегиональной конференции «Проблемы освоения техногенного комплекса месторождений золота». — Магадан, 2010. — С. 167—169.
3. *Минеев Г. Г.*, *Жучков И. А.*, *Пунишко О. А.*, *Минеева Т. С.*, *Аксенов А. В.* Биометаллургические и химические методы извлечения золота и серебра из нетрадиционных руд, концентратов и техногенного сырья // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. — 2005. — № 2. — С. 8—17.
4. *Syed S.* Recovery of gold from secondary sources — A review // Hydrometallurgy. 2012, № 115—116, pp. 30—51.
5. *Макаров А. Б.*, *Талалай А. Г.*, *Хасанова Г. Г.* Геолого-промышленные типы техногенных месторождений // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2018. — № 8. — С. 80—85.

6. *Федоров С. А.*, *Амдур А. М.* Обзор техногенного и вторичного сырья металлов платиновой группы и его классификация // Металлург. — 2021. — № 7. — С. 101—106.

7. *Кирильчук М. С.*, *Рассказова А. В.* Доизвлечение трудноизвлекаемого золота из техногенно-трансформированного минерального сырья с использованием активационного кучного выщелачивания // Проблемы недропользования. — 2019. № 2. — С. 101—106.

8. *Чернышов Н. М.* Техногенный золото-платиноидный тип месторождений КМА (Центральная Россия) // Вестник ВГУ, серия: Геология. — 2010. — № 1. — С. 175—191.

9. *Бортников Н. С.*, *Дистлер В. В.*, *Викентьев И. В.*, *Гамянин Г. Н.*, *Григорьева А. В.*, *Гроховская Т. Л.*, *Служеникин С. Ф.*, *Тагиров Б. Р.* Формы нахождения благородных металлов в рудах комплексных месторождений: методология изучения, количественные характеристики, технологическое значение // Проблемы минерагении России. — Москва: РАН, Отделение наук о Земле, 2012. — С. 365—384.

10. *Наумов В. А.*, *Фиоруччи А.*, *Голдырев В. В.*, *Брюхов В. Н.*, *Фетисов В. В.* научные основы управления геологическими процессами в техногенно-минеральных образованиях // Международный научно-исследовательский журнал. — 2018. — № 9 (75). — С. 89—92.

11. *Wang J.*, *Faraji F.*, *Ramsay J.*, *Ghahreman A.* A review of biocyanidation as a sustainable route for gold recovery from primary and secondary low-grade resources // Journal of Cleaner Production. — 2021. — No. 296. — pp. 1—18.

12. *Шадрунова И. В.*, *Горлова О. Е.*, *Провалов С. А.* Адаптивные методы доизвлечения золота из хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2011. — № 9. — С. 180—185.

13. *Капустина Г. Г.*, *Леоненко Н. А.*, *Швец Н. Л.* Агломерация ультрадисперсного золота при лазерном воздействии на минеральные золотосодержащие среды. — Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2017. — 94 с.

14. Атлас минерального сырья, технологических промышленных продуктов и товарной продукции ЗФ ОАО ГМК «Норильский никель» / Л. Ш. Цемехман, В. Б. Фомичев, Л. Н. Ерцева, Н. Г. Кайтмазов, С. М. Козырев, В. И. Максимов, Я. М. Шнеерсон, В. Т. Дьяченко. — Москва: Руда и металлы, 2010. — 336 с.

15. *Петров Г. В.*, *Бодуэн А. Я.*, *Мардарь И. И.*, *Иванов Б. С.*, *Богинская А. С.* Ресурсы благородных металлов в техногенных объектах горно-металлургического комплекса России // Успехи современного естествознания. — 2013. — № 3. — С. 145—148.

16. *Горлова О. Е.*, *Шадрунова И. В.*, *Жилина В. А.*, *Чекушина Т. В.* Повышение полноты извлечения золота из лежалых отходов переработки золотосодержащих руд // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. — Вып. 1. — С. 193—210.

17. *Ерденова М. Б.*, *Койжанова А. К.*, *Камалов Э. М.*, *Абдылдаев Н. Н.*, *Абубакриев А. Т.* Доизвлечение золота из отходов переработки золотосодержащих руд Казахстана // Комплексное использование минерального сырья. — 2018. — № 2. — С. 12—20.

18. *Мустафин С. К.*, *Анисимова Г. С.*, *Трифонов А. Н.*, *Стручков К. К.* Техногенное минеральное сырье регионов недропользования: природа, состав и перспективы рационального использования // Наука и образование. — 2017. — № 4. — С. 7—16.

19. *Михайлов А. Г.*, *Харитонова М. Ю.*, *Вашлаев И. И.*, *Свиридова М. Л.* Мобильность цветных и благородных металлов в хвостах обогащения // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. — С. 1—9.

20. *Sachkov V. I.*, *Nefedov R. A.*, *Medvedev R. O.* Method for extraction of gold and silver from technogenic pyrite raw materials // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2019, № 597, pp. 1—6.

21. *Кузнецова И. В.*, *Сафронов П. П.*, *Моисеенко Н. В.* Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей — потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия) // Георесурсы. — 2019. — Т. 21, № 1. — С. 2—14.

22. *Ковлеков И. И.* Техногенное золото Якутии. — Москва: МГГУ, 2002. — 303 с.

23. *Банщикова Т. С.*, *Литвинцев В. С.*, *Шокина Л. Н.* Проблемы извлечения золота из иловых отложений техногенных россыпей // Известия Высших учебных заведений. Горный журнал. — 2009. — № 3. — С. 15—19.

24. *Макаров А. Б.*, *Гуман О. М.*, *Антонова И. А.*, *Захаров А. В.* Техногенно-минеральные месторождения пиритных огарков и их влияние на природную окружающую среду // Известия УГГУ. — 2012. — № 11—12. — С. 38—45.

25. *Федоров С. А.*, *Амдур А. М.*, *Шваб Е. А.* Золото в продуктах пирометаллургического передела медноколчеданных руд // XXV Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа- 2019». Сборник статей. — Екатеринбург: 2019. — С. 182—185.

26. *Усманова Н. Ф.*, *Брагин В. И.*, *Жижаев А. М.*, *Меркулова Е. Н.*, *Фисенко Ю. Ю.* Морфологические разновидности золота в рудном и техногенном сырье коры выветривания // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 130—136.

27. *Ivannikov S.*, *Ageev O.*, *Bratskaya S.*, *Medkov M.*, *Shamrai E.*, *Yudakov A.* Beneficiation and hydrometallurgical processing of gold-containing sludge // E3S Web of Conferences. 2018, № 56, pp. 1—7.

28. *Стрижко Л. С.*, *Костюхин Ю. Ю.*, *Кружкова Г. В.*, *Иванова Е. А.* Извлечение цветных и благородных металлов из электронного лома: экономические показатели и стратегия ценообразования // Известия вузов. Цветная металлурги. — 2013. — № 3. — С. 28—33.

29. *Fogarasi S.*, Imre-*Lucaci F.*, Imre-*Lucaci A.*, *Ilea P.* Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation // Journal of Hazardous Materials. 2014, № 273, pp. 215—221.

30. *Liu R.*, *Li J.*, Ge Zh. Review on chromobacterium violaceum for gold bioleaching from e-waste // Procedia Environmental Sciences. 2016, № 31, pp. 947—953.

31. *Черепанов А. А.* Благородные металлы в золошлаковых отходах дальневосточных ТЭЦ // Тихоокеанская геология. — 2008. — № 27 (2). — С. 16—28.

32. *Минеев Г. Г.*, *Панченко А. Ф.* Растворители золота и серебра в гидрометаллургии. М.: Металлургия, 1994. — 241 с.

33. *Бодуэн А. Я.*, *Петров Г. В.*, *Мардарь И. И.*, *Иванов Б. С.* Извлечение благородных и цветных металлов из техногенного сырья Норильского промышленного региона: практика и исследования // Успехи современного естествознания. — 2013. — № 3. — С. 143—145.

34. *Федотов П. К.*, *Сенченко А. Е.*, *Федотов К. В.*, *Бурдонов А. Е.* Гравитационно-флотационное обогащение золотосодержащей руды // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. — 2021. — № 1. — С. 4—15.

35. *Chanturiya V. A.*, *Bunin I. J.*, *Lunin V. D.* Non-traditional methods of desintegration and breaking-up of mineral complexes in beneficiation and hydrometallurgical processes. Theoretical and practical problems in mineral processing // Proceedings of XIX Mineral processing symposium with international participation. — Beograd: Topola — Oplenac, 2004. — pp. 11—22.

36. *Бучихин Е. П.*, *Нестеров К. Н.*, *Пальваль И. А.*, *Бахир В. М.* Переработка хвостов обогащения россыпных месторождений золота («чёрных шлихов») йод-йодидными растворами // Золото и технологии. — 2018. — № 2. — С. 76—79.

37. *Чекушин В. С.*, *Олейникова Н. В.* Переработка золотосодержащих рудных концентратов // Известия Челябинского научного центра. — 2005. — Вып. 4 (30). — С. 94—101.

38. *Матушкина А. Н.*, *Амдур А. М.*, *Цыпин Е. Ф.* Показатели обогащения материала с преобладанием тонкодисперсного золота до и после тепловой обработки на примере силикатно-карбонатной руды // Цветные металлы. — 2016. — № 12. — С. 9—13. ГИАБ

REFERENCES

1. Zheleztsov E. N., Ivanova M. A. The current state of the world gold market and the role of Russian gold mining enterprises. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Simvol nauki»*. 2016, no. 5, pp. 103—108. [In Russ].
2. Rasskazov I.Yu., Alexandrova T. N., Litvintsev V. S. *Problemy izvlecheniya tonkodispersnogo zolota iz peskov tekhnogennykh rossypey i nekotoryye puti ikh resheniya* [Problems of extraction of finely dispersed gold from sands of technogenic placers and some ways of their solution], *Materialy mezhregionalnoy konferentsii «Problemy osvoyeniya tekhnogennogo kompleksa mestorozhdeniy zolota»*. 2010, pp. 167—169. [In Russ].
3. Mineev G. G., Zhuchkov I. A., Punishko O. A., Mineeva T. S., Aksenov A. V. Biometallurgical and chemical methods of extracting gold and silver from unconventional ores, concentrates and technogenic raw materials. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2005, no. 2, pp. 8—17. [In Russ].
4. Syed S. Recovery of gold from secondary sources A review. *Hydrometallurgy*. 2012, no. 115—116, pp. 30—51.
5. Makarov A. B., Talalay A. G., Khasanova G. G. Geological and industrial types of technogenic deposits. *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN*. 2018, no. 8, pp. 80—85. [In Russ].
6. Fedorov S. A., Amdur A. M. Review of technogenic and secondary raw materials of platinum group metals and its classification. *Metallurgist*. 2021, no. 7, pp. 101—106. [In Russ].
7. Kirilchuk M. S., Rasskazova A. V. Additional recovery of hard-to-recover gold from technogenically transformed mineral raw materials using activation heap leaching. *Problemy nedropolzovaniya*. 2019, no. 2, pp. 101—106. [In Russ].
8. Chernyshov N. M. Technogenic gold-platinoid type of deposits in KMA (Central Russia). *Vestnik VGU. seriya: Geologiya*. 2010, no. 1, pp. 175—191. [In Russ].
9. Bortnikov N. S., Distler V. V., Vikentiev I. V., Gamyanin G. N., Grigorieva A. V., Grokhovskaya T. L., Sluzhenikin S. F., Tagirov B. R. *Formy nakhozhdeniya blagorodnykh metallov v rudakh kompleksnykh mestorozhdeniy: metodologiya izucheniya. kolichestvennyye kharakteristiki. tekhnologicheskoye znacheniye* [Forms of finding noble metals in ores of complex deposits: study methodology, quantitative characteristics, technological value]. *Problemy mineragenii Rossii*. 2012, pp. 365—384. [In Russ].
10. Naumov V. A., Fioruchchi A., Goldyrev V. V., Bryukhov V. N., Fetisov V. V. Scientific foundations of management of geological processes in technogenic-mineral formations. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatelskiy zhurnal*. 2018, no. 9 (75), pp. 89—92. [In Russ].
11. Wang J., Faraji F., Ramsay J., Ghahreman A. A review of biocyanidation as a sustainable route for gold recovery from primary and secondary low-grade resources. *Journal of Cleaner Production*. 2021, no. 296, pp. 1—18.
12. Shadrunova I. V., Gorlova O. E., Provalov S. A. Adaptive methods for additional gold recovery from tailing dumps of gold recovery factories. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011, no. 9, pp. 180—185. [In Russ].
13. Kapustina G. G., Leonenko N. A., Shvets N. L. *Aglomeratsiya ultradispersnogo zolota pri lazernom vozdeystvii na mineralnyye zolotosoderzhashchiye sredy* [Agglomeration of ultrafine gold under laser action on mineral gold-bearing media], Khabarovsk, Pacific State University, 2017, 94 p. [In Russ].
14. Tsemekhman L.Sh., Fomichev V. B., Ertseva L. N., Kaitmazov N. G., Kozyrev S. M., Maksimov V. I., Schneerson Ya.M., Dyachenko V. T. *Atlas mineralnogo syria. tekhnologicheskikh promyshlennykh produktov i tovarnoy produktsii ZF OAO GMK «Norilskiy nikel»* [Atlas of mineral raw materials, technological industrial products and marketable products of the Polar Division of OJSC MMC Norilsk Nickel], Moscow, Ore and Metals, 2010, 336 p. [In Russ].

15. Petrov G. V., Boduen A.Ya., Mardar I. I., Ivanov B. S., Boginskaya A. S. Resources of noble metals in technogenic objects of the mining and metallurgical complex of Russia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2013, no. 3, pp. 145—148. [In Russ].

16. Gorlova O. E., Shadrunova I. V., Zhilina V. A., Chekushina T. V. Increasing the completeness of gold extraction from stale waste of gold ore processing. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*. 2020, Is. 1, pp. 193—210. [In Russ].

17. Erdenova M. B., Koyzhanova A. K., Kamalov E. M., Abdyldaev N. N., Abubakriev A. T. Additional extraction of gold from waste processing of gold-bearing ores in Kazakhstan. *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syrya*. 2018, no. 2, pp. 12—20. [In Russ].

18. Mustafin S. K., Anisimova G. S., Trifonov A. N., Struchkov K. K. Technogenic mineral raw materials of the regions of subsoil use: nature, composition and prospects for rational use. *Nauka i obrazovanie*. 2017, no. 4, pp. 7—16. [In Russ].

19. Mikhailov A. G., Kharitonova M.Yu., Vashlaev I. I., Sviridova M. L. Mobility of non-ferrous and noble metals in the tailings. *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya*. 2014, no. 6, pp. 1—9. [In Russ].

20. Sachkov V. I., Nefedov R. A., Medvedev R. O. Method for extraction of gold and silver from technogenic pyrite raw materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, no. 597, pp. 1—6.

21. Kuznetsova I. V., Safronov P. P., Moiseenko N. V. Substance and mineral characteristics of technogenic placers potential sources of noble metal (on the example of the Nizhnesemdzhinsky gold-bearing cluster of Priamurye, Russia). *Georesursy*. 2019, T. 21, no. 1, pp. 2—14. [In Russ].

22. Kovlekov I. I. *Texnogennoe zoloto Yakutii* [Technogenic gold of Yakutia], Moscow, MGGU, 2002, 303 p. [In Russ].

23. Banshchikova T. S., Litvintsev V. S., Shokina L. N. Problems of gold extraction from silt deposits of technogenic placers. *Izvestiya Vysshikh uchebnyx zavedeniy. Gornyy Zhurnal*. 2009, no. 3, pp. 15—19. [In Russ].

24. Makarov A. B., Guman O. M., Antonova I. A., Zakharov A. V. Technogenic and mineral deposits of pyrite cinders and their impact on the natural environment. *Izvestiya UGGU*. 2012, no. 11—12, pp. 38—45. [In Russ].

25. Fedorov S. A., Amdur A. M., Shvab E. A. *Zoloto v produktakh pirometallurgicheskogo peredela mednokolchedannykh rud* [Gold in the products of pyrometallurgical processing of copper pyrite ores], *Proceedings of XXV All-Russian Scientific Conference "Ural Mineralogical School-2019",* 2019, pp. 182—185 [In Russ].

26. Usmanova N. F., Bragin V. I., Zhizhaev A. M., Merkulova E. N., Fisenko Yu.Yu. Morphological varieties of gold in ore and technogenic raw materials of the weathering crust. *FTPRPI*. 2015, no. 2, pp. 130—136. [In Russ].

27. Ivannikov S., Ageev O., Bratskaya S., Medkov M., Shamrai E., Yudakov A. Beneficiation and hydrometallurgical processing of gold-containing sludge. *E3S Web of Conferences*. 2018, no. 56, pp. 1—7.

28. Strizhko L. S., Kostyukhin Yu.Yu., Kruzhkova G. V., Ivanova E. A. Extraction of non-ferrous and precious metals from electronic scrap: economic indicators and pricing strategy. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2013, no. 3, pp. 28—33. [In Russ].

29. Fogarasi S., Imre-Lucaci F., Imre-Lucaci A., Ilea P. Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation. *Journal of Hazardous Materials*. 2014, no. 273, pp. 215—221.

30. Liu R., Li J., Ge Zh. Review on chromobacterium violaceum for gold bioleaching from e-waste. *Procedia Environmental Sciences*. 2016, no. 31, pp. 947—953.

31. Cherepanov A. A. Noble metals in ash and slag waste of Far Eastern thermal power plants. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2008, no. 27 (2), pp. 16—28. [In Russ].

32. Mineev G. G., Panchenko A. F. *Rastvoriteli zolota i serebra v gidrometallurgii* [Solvents of gold and silver in hydrometallurgy], Moscow, Metallurgiya, 1994, 241 p. [In Russ].

33. Boduen A.Ya., Petrov G. V., Mardar I. I., Ivanov B. S. Extraction of noble and non-ferrous metals from technogenic raw materials of the Norilsk industrial region: practice and research. *Uspexi sovremennogo estestvoznaniya*. 2013, no. 3, pp. 143—145. [In Russ].

34. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Gravity-flotation concentration of gold-bearing ore. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2021, no. 1, pp. 4—15. [In Russ].

35. Chanturiya V. A., Bunin I. J., Lunin V. D. Non-traditional methods of desintegration and breaking-up of mineral complexes in beneficiation and hydrometallurgical processes. Theoretical and practical problems in mineral processing. *Proceedings of XIX Mineral processing symposium with international participation*. 2004, pp. 11—22.

36. Buchikhin E. P., Nesterov K. N., Palval I. A., Bakhir V. M. Processing of tailings of enrichment of alluvial gold deposits ("black concentrates") with iodine-iodide solutions. *Zoloto i tekhnologii*. 2018, no. 2, pp. 76—79. [In Russ].

37. Chekushin V. S., Oleinikova N. V. Processing of gold-bearing ore concentrates. *Novosti Chelyabinskogo Nauchnogo Tsentra*. 2005, Is. 4 (30), pp. 94—101. [In Russ].

38. Matushkina A. N., Amdur A. M., Tsypin E. F. Indicators of material enrichment with a predominance of finely dispersed gold before and after heat treatment on the example of silicate-carbonate ore. *Tsvetnye metally*. 2016, no. 12, pp. 9—13. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоров Сергей Андреевич[1,2] — младший научный сотрудник, аспирант; e-mail: saf13d@mail.ru;
Амдур Алексей Миронович[2] — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедры химии, e-mail: engineer-ektb@rambler.ru;
Малышев Александр Николаевич[2] — лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, студент, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com;
Каримова Полина Фаритовна[2] — лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, студент, e-mail: pauline.spring@yandex.ru;
[1] Институт металлургии Уральское отделение Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амудсена, 101, Россия;
[2] Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorov S. A.[1,2], Post-Graduate Student, Junior Researcher, e-mail: saf13d@mail.ru;
Amdur A. M.[2], Head of the Chemistry Department Professor, Doctor of Engineering Sciences, e-mail: engineer-ektb@rambler.ru;
Malyshev A. N.[2], Laboratory Research Assistant, Student, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com;
Karimova P. F.[2], Laboratory Research Assistant, Student, e-mail: pauline.spring@yandex.ru;
[1] Institute of Metallurgy, Ural Branch, Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia;
[2] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 01.10.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 25.05.2021; received after the review 01.10.2021; accepted for printing 10.10.2021.