
НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Петрология, минералогия

УДК 622.271

Техногенное минеральное сырьё регионов недропользования: природа, состав и перспективы рационального использования

С.К. Мустафин*, Г.С. Анисимова**, А.Н. Трифонов***, К.К. Стручков****

**Бакирский государственный университет, г. Уфа, Россия*

***Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия*

****Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина,
г. Санкт-Петербург – г. Пушкин, Россия*

*****Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия
e-mail: g.s.anisimova@diamond.ysn.ru*

Аннотация. *Анализируются природа, объёмы накопления и состав техногенного минерального сырья Российской Федерации, оцениваемого в 43,5 млрд. долл. США, что в 4 раза превышает стоимость разведанных ресурсов. Доля техногенного сырья в общей структуре ресурсов и запасов золота страны составляет 7–12 % и оценивается экспертами в 5000 т. Для регионов недропользования Урала, Сибири и Дальнего Востока, включая Республику Саха (Якутию), проблемы освоения техногенного минерального сырья актуальны. Рассматриваются природа образования, вещественный состав и особенности нахождения золота в разнотипном техногенном минеральном сырье Южного Урала, представленного лежалыми хвостами перколяции ЗИФ, пиритной флотации, шлаками золотомедного завода, пиритными огарками сернокислотного производства, эфелями бегуных фабрик, россыпями, отсевами месторождений песчано-гравийных материалов и др. Для ДФО и РС(Я) на примере техногенных россыпей, хвостов ЗИФ и др. показаны региональные особенности и перспективы ресайклинга золота из отходов недропользования. Необходимо создание региональных банков минералогических данных технологических особенностей самородного золота разнотипного природного и техногенного минерального сырья. Предлагается включить курс «Технологическая минералогия» в учебные планы профессиональной подготовки геологов. Комплексные научные и прикладные минералогические исследования полезных компонентов в составе разнотипного техногенного сырья целесообразно организовать в рамках программ «Технологической платформы Твёрдые полезные ископаемые», участниками которой являются СВФУ им. М.К. Аммосова, БаиГУ и другие учебные и научные центры. Освоение техногенного минерального сырья с использованием инновационных подходов и передовых технологий наряду с коммерческой выгодой снижает экологические риски недропользования, чем способствует созданию позитивного имиджа территории.*

Ключевые слова: техногенное минеральное сырьё, россыпь, золото, полезные компоненты, ресайклинг, гидрометаллургия, технологическая минералогия, экологический риск.

Благодарности: работа выполнена по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № 0381-2016-0004 и учебных планов БаиГУ, СВФУ и ЛенГУ.

МУСТАФИН Сабир Кабирович – д.г.-м.н., проф.; АНИСИМОВА Галина Семеновна – к.г.-м.н., в.н.с.; ТРИФОНОВ Александр Николаевич – к.г.-м.н., доцент; СТРУЧКОВ Константин Константинович – к.г.-м.н., доцент, зав. минералогическим музеем.

Technogenic Mineral Raw Materials of the Subsoil Use Regions: Nature, Composition and Prospects of Rational Development

S.K. Mustafin *, G.S. Anisimova **, A.N. Trifonov ***, K.K. Struchkov ****

*Bashkir State University, Ufa, Russia

**Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

***Leningrad State University named after A.S. Pushkin, St. Petersburg – Pushkin, Russia

****North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

e-mail: g.s.anisimova@diamond.ysn.ru

Abstract. The nature, volumes of accumulation and composition of technogenic mineral raw materials of the Russian Federation estimated in 43,5 billion US dollars, that in 4 times exceeds cost of the reconnoitered resources are analyzed. The share of technogenic raw materials in the general structure of resources and gold reserves of the country is 7–12% and is estimated by experts at 5,000 tonnes. For subsoil use regions of the Urals, Siberia and the Far East, including the Republic of Sakha (Yakutia), the problems of developing technogenic mineral raw materials are relevant. The nature of formation, material composition and peculiarities of finding gold in various types of technogenic mineral raw materials of the Southern Urals are considered. The raw materials are presented by the tailings of percolation of the mill, pyrite flotation, slags of the goldmine plant, pyritic cinder of sulfuric acid production, effluents of runner factories, placers, screenings of sand and gravel deposits, etc. For the Far Eastern Federal District and the RS (Y), regional examples and prospects for recycling gold from waste subsoil are shown on the example of technogenic placers, tailings of the mill, etc. It is necessary to create regional banks of mineralogical data of technological features of native gold of various types of natural and technogenic mineral raw materials. It is proposed to include the course «Technological Mineralogy» in the curricula of vocational training of geologists. Complex scientific and applied mineralogical research of useful components in the composition of diverse types of technogenic raw materials is expedient for organizing within the framework of programs of the «Technological Platform Solid Minerals» in which the NEFU named after M.K. Ammosov, Bashkir State University and other educational and scientific centers are members. The development of technogenic mineral raw materials with the use of innovative approaches and advanced technologies along with commercial benefits reduces environmental risks of subsoil use, thus contributing to creation of a positive image of a territory.

Key words: technogenic mineral raw materials, placer, gold, useful components, recycling, hydrometallurgy, technological mineralogy, ecological risk.

Acknowledgments: this work was carried out according to the R&D plan of IGABM SB RAS, project No. 0381-2016-0004 and the curricula of Bashkir State University, NEFU and LenSU.

Введение

В отвалах горнодобывающих предприятий Российской Федерации накоплено более 40 млрд. т отходов, а в 2014 г. образовалось 4807,3 млн. т [7]. Растут затраты на их складирование и хранение, рекультивацию земель, природоохранные мероприятия. Расходы на транспортировку и хранение отходов достигают 40 % затрат на рудоподготовку и обогащение сырья. На переработку техногенного и минерального сырья затрачивается 10 % всей вырабатываемой в РФ энергии [25].

Оценка техногенных ресурсов РФ в стоимостном выражении превышает 43,5 млрд. долл. США, что сопоставимо с величиной прогнозных ресурсов минерального сырья в недрах (более 50 млрд. долл. США), и в 4 раза превышает стоимость разведанных ресурсов, не вовлеченных в эксплуатацию [4]. По данным Геологической службы США, в 2016 г. ведущими странами-производителями золота были следующие (добыча/резервы, т): Китай – 455/2000; Австралия –

270/9500; Россия – 250/8000; США – 209/3000; Канада – 170/2400; Перу – 150/2400; ЮАР – 140/6000; Мексика – 125/1400; Индонезия – 100/3000; Узбекистан – 100/1700; всего по миру – 3100/5700 [32].

Двадцать лет назад доля техногенных объектов в структуре ресурсов и запасов золота РФ составляла как 7–12 % [3], сегодня объем потенциальных резервов золотосодержащих отходов РФ оценивается в 5000 т (55–60 %) [33].

Техногенное минеральное сырье регионов недропользования

В составе 95 млн. т хвостов свинцово-цинковых обогатительных фабрик (ОФ) РФ содержатся 156 тыс. т свинца, 420 тыс. т цинка и 110 т серебра; содержание свинца колеблется от 0,14 до 0,29 %, цинка – от 0,3 до 0,8 %. На Урале ежегодно образуется 5 млрд. т различных отходов недропользования, в регионе накоплено свыше 220 млн. т хвостов обогащения, складировано свыше 110 млн. т медных шлаков, со-

держащих в среднем 0,37% меди, 2,29 % цинка и 0,98 % серы, а также более 7 т золота и 150 т серебра, 23 тыс. т висмута и 8 тыс. т кадмия. На ОФ накоплено более 50 млн. т хвостов, содержащих 0,33 % меди, 0,5 % цинка и 28,2 % серы [11]. Наиболее ценными в хвостах обогащения являются сера (30–50 % общей стоимости), драгоценные металлы (25–45 %), медь (10–20 %) и цинк (10–15 %) [28].

На АО «Норильский горно-металлургический комбинат» в 4584,2 тыс. т хвостов обогащения содержится 0,26 % никеля, 0,27 % меди и 0,013 % кобальта; а в составе 4,6 млн. т шлаков – 6,5 тыс. т никеля, 16,2 тыс. т меди и 3210 т кобальта. В отвалах забалансовых руд Шерловогорского ГОКа массой 146 млн. т заключено около 96 % олова оловянной промышленности РФ, а в 110 млн. т хвостов содержится 148 тыс. т олова при среднем содержании 0,125 %. В отходах предприятий Приморского и Хабаровского краев заключено 60% техногенного олова РФ, остальное – на работающих предприятиях Магаданской области.

Лежалые хвосты ОФ АО «Джидинский ВМК» (30 млн. т) содержат 0,075 % WO_3 . К техногенным месторождениям отнесены хвосты Иультинского (Магаданская область) и Приморского (Приморский край) ГОКов. В 105,7 млн. т хвостов Тырныаузского ВМК содержится 42,7 тыс. т WO_3 (0,04 %), 12,75 тыс. т молибдена (0,012 %). Сорская ОФ АО «Молибден» перерабатывает рудные отвалы объемом 52,5 млн. т, содержащие 13540 т сульфидного молибдена (0,026 %) и 36825 т меди (0,070 %) [17].

Перспективы расширения минерально-сырьевой базы месторождений РФ увязываются с вовлечением в эксплуатацию бедных, ранее некондиционных, труднообогатимых руд и техногенных образований [30]. Более 800 млн. т шлаковых отвалов черной и цветной металлургии РФ занимают площадь 2,2 тыс. га; ежегодно образуются 100 млн. т разных шлаков. Извлечение тантала из шлаков оловоплавильных производств переработки касситеритовых концентратов Эге-Хайского (Якутия) и Орловского (Восточное Забайкалье) ГОКов перспективно. Малайзия, Таиланд, Индонезия из такого сырья обеспечивают 60 % мирового производства тантала [18].

С техногенным сырьем недропользователи РФ будут обходиться бережнее, поскольку с 01.01.2017 г. запрещено захоронение отходов, содержащих полезные компоненты, подлежащие утилизации, в соответствии с перечнем, утвержденным Правительством РФ [7].

Уральский регион. На ОФ Урала ежегодно образуется от 5 до 7 млн. т хвостов флотации медно-цинковых руд. Текущие хвосты обогащения руд Учалинского, Александринского, Сибайского и Юбилейного месторождений характеризуются содержанием полезных компонентов (Cu – 0,25–

0,58 %, Zn – 0,53–1,36 %), сопоставимым с кондиционными рудами (Cu – более 0,4 %, Zn – более 1 %), что обуславливает рентабельность их переработки рядом методов [6]. В составе 61,3 млн. т лежалых хвостов Гайской ОФ накоплено 170,8 тыс. т меди (0,278 %), 159,5 тыс. т цинка (0,26 %), 45,94 т золота (0,75 г/т) и 485,5 т серебра (7,92 г/т); 100 млн. т шлаков медеплавильных заводов содержат: 370 тыс. т меди, 2,2 млн. т цинка, 9 т золота, 175 т серебра, 38 т висмута, 10 тыс. т кадмия.

Оптимальный результат процесса обогащения разнотипного золотосодержащего сырья достигается при системном подходе к комплексному управлению взаимосвязанными составляющими элементами. Гравитационный процесс с пониженным извлечением золота целесообразно использовать на первом этапе освоения предприятия, а в последующем следует богатые хвосты первого этапа перерабатывать с применением различных типов выщелачивания [16].

В природно-легированных железных рудах Зигазино-Комаровской группы месторождений (Белорецкий железорудный район) высока доля окристых агрегатов, что обуславливает высокие (до 40 %) технологические потери сырья, объем отходов которого составляет 70 млн. т; комбинат накопил 3 млн. т шлаков.

Золотосодержащим сырьем в Республике Башкортостан (РБ) являются хвосты перколяции Семёновской золотоизвлекательной фабрики (2,64 млн. т), пиритной флотации Миндякского ГОКа (2,6 млн. т), шлаки Баймакского золотомедного завода (1 млн. т), пиритные огарки сернокислотного производства ОАО «Минудобрения» (г. Мелеуз) (2,7 млн. т), эфеля бегунных фабрик, россыпей, отсевы песчано-гравийных материалов и др. [22, 23].

Техногенное золото в 1 млн. т шлаков золотомедного завода г. Баймак представлено изометричными, удлиненными без выступов, с редкими углублениями чешуйками размерами от $0,25 \times 0,1$ мм до $0,05 \times 0,05$ мм. В составе техногенной самородной меди установлена минеральная фаза Au_3Cu с рентгеновской плотностью $\rho = 17,167$ г/см³; масс-спектры элементов-примесей: Fe, Zn, Ag, Au, Ir, Ba соответствуют спектру элементов руд «железных шляп» медно-колчеданных месторождений. Для шлаков перспективна гидрометаллургическая переработка гравитационного концентрата.

Пиритные огарки – твердые отходы сернокислотного производства ОАО «Минудобрения» (г. Мелеуз) в объеме 2,7 млн. т содержат: Zn – 1,25 %; Cu – 0,4 %; Au – 0,7–1,5 г/т; Ag – 20–25 г/т; вредную примесь As (0,2 %). Минеральные формы нахождения золота не установлены. Дисперсность золота не позволяет применять методы гравитационного обогащения; магнитная сепарация успеха не принесла. Хлорина-

ция пиритных огарков, используемая на ряде зарубежных предприятий, потребует надёжного обоснования экологической безопасности.

Гидравлический способ разработки россыпей золота обуславливает образование аллювиально-техногенных россыпей намывного типа. В россыпях Южного Урала золото мельче 0,1 мм может составлять до 90 % запасов; извлечение такого металла традиционно велось с использованием амальгамации. Золотины из эфельных отвалов нередко покрыты плёнкой техногенной амальгамы; выявлены фазы Au_6Hg_5 ($\rho=16,872$

г/см^3) и Au_5Hg_8 ($\rho=17,721 \text{ г/см}^3$).

Сегодня амальгамация золота, как экологически опасная технология, запрещена; широко используется гравитация (высокопроизводительные центробежные концентраторы, винтовые шлюзы и др.), применение которой позволит частично решить проблему демеркуризации отходов.

Весьма перспективным техногенным сырьём для получения золота являются отходы золотодобывающих предприятий – разнообразные по составу и объёмам хвосты амальгамации, перколяции, пиритной флотации (таблица).

Характеристика твёрдых отходов предприятий золотодобычи Республики Башкортостан [24]

Время образования; объём хвостов (т)	Состав хвостов (данные ГУП «Уралзолоторазведка»)		Минеральная форма нахождения золота
	Химический (%) (для Au и Ag, г/т – пробирный)	Минералы	
Ильинская перколяционная фабрика			
1926–1950 гг.; около 30000	SiO ₂ –66,44; Al ₂ O ₃ –6,91; MnO–0,11; Fe ₂ O ₃ –13,03; MgO–0,69; CaO–0,90; Na ₂ O–0,24; K ₂ O–1,25; P ₂ O ₅ –0,14; SO ₃ –1,44; TiO ₂ –0,41; Au–1,7; Ag–14,1	Кварц, альбит, серицит, хлорит, кальцит, пирит, сфалерит, халькопирит, галенит, гематит	Не исследована
Куль-Юрт-Таусская перколяционная фабрика			
1942–1957 гг.; около 23000	SiO ₂ –46,55; Al ₂ O ₃ –4,18; MnO–0,06; Fe ₂ O ₃ –39,82; MgO–<0,10; CaO–0,90; Na ₂ O–008; K ₂ O –0,15; P ₂ O ₅ –0,12; TiO ₂ – 0,41; SO ₃ –0,57; S _{общ} –1,12; Au –1,0; Ag –2,6	Кварц, серицит, гётит, гематит, гидрогётит, каолинит, пирит	—«—
Мало-Каранская амальгамационная фабрика			
1927–1947 гг.; около 40000	SiO ₂ –70,44; Al ₂ O ₃ –19,67; Fe ₂ O ₃ –2,48; FeO –0,37; MgO–0,40; CaO – 0,62; SO ₃ –0,03; S _{общ} –0,32; Au – 0,2; Ag –1,3	Кварц, альбит, барит, пирит, гётит, гидрогётит, галенит, пирит	—«—
Сиратурская амальгамационная фабрика			
1929–1949 гг.; около 4000	SiO ₂ –70,03; Al ₂ O ₃ –8,30; Fe ₂ O ₃ –4,31; FeO –2,88; MnO –0,22; MgO –1,17; CaO –1,39; Na ₂ O –0,25; K ₂ O –1,92; TiO ₂ –0,59; P ₂ O ₅ – 0,24; SO ₃ –<0,10; Au – 2,3; Ag – н.д.	Кварц, кальцит, доломит, серицит, пирит, арсенопирит	Основная масса «свободное» с кварцем
Тубинская амальгамационная и цианоиловая фабрика			
1916–1950 гг.; около 95000	SiO ₂ –78,13; Al ₂ O ₃ –3,87; TiO ₂ –0,18; FeO–1,15; Fe ₂ O ₃ – 8,21; MnO –0,05; MgO –1,17; CaO –0,90; Na ₂ O –0,06; K ₂ O–0,89; P ₂ O ₅ – 0,1; SO ₃ –1,0; Au–0,7		—«—
Байкаринская цианоиловая фабрика			
1924–1954 гг.; около 60000	SiO ₂ –52,46; Al ₂ O ₃ –4,24; TiO ₂ –0,31; Fe ₂ O ₃ –24,76; MnO –0,10; MgO –0,24; CaO – 0,44; Na ₂ O –0,13; K ₂ O –0,65; P ₂ O ₅ –0,2; SO ₃ –0,61; S _{общ} –3,57; Au –1,2; Ag –9,5	Кварц, альбит, каолинит, барит, гётит, пирит, сфалерит, халькопирит, гематит	—«—
Семёновская цианоиловая фабрика			
1935–1997 гг.; около 3000000	SiO ₂ –61,51; Al ₂ O ₃ –5,90; Fe ₂ O ₃ –17,01; FeO – 0,95; MnO –0,09; MgO –0,52; TiO ₂ –0,39; CaO –1,09; Na ₂ O –0,42; K ₂ O –0,79; P ₂ O ₅ –0,13; S _{общ} –2,20; Au – 1,3; Ag –17,5	Кварц, полевые шпаты, глинистые минералы, гётит, гидрогётит, пирит, самородное золото	—«—
Калкановская, Кускаровская, Ишбердинская цианоиловые фабрики			
1930–1950 гг.; до 60000	Данных нет	Исходное сырьё – золото-кварцевая руда	«Свободное» с кварцем
Миндякская флотационная фабрика			
1935–1997 гг.; около 3000000	SiO ₂ –45,95; Al ₂ O ₃ –15,29; Fe ₂ O ₃ –7,75; MnO–0,33; MgO –7,30; TiO ₂ –1,25; CaO –7,94; Na ₂ O –1,85; K ₂ O –1,56; P ₂ O ₅ –0,18; S _{общ} –0,65; Au–0,9; Ag–0,62	Пирит, гётит, гидрогётит, хлорит, доломит, кальцит, кварц, серицит, самородное золото	Основная масса «упорное» в пирите

Токсичность золотосодержащих (3 т) лежалых хвостов (2638,8 тыс. т) перколяции Семёновской золотоизвлекательной фабрики, включённой в программу «Экологическая безопасность России» как одна из «горячих экологических точек» РФ, определяют ртуть (58,8 т) и мышьяк (2076 т). Золото свободное, 75 % связано с классом – 0,074 мм; 42,9 % – в основном с кварцем. Центробежные концентраты обеспечили извлечение 65 % в концентрат с содержанием 45,6 г/т золота, а технология хлорного кучного выщелачивания (КВ) продуктивных растворов с содержанием 1,5 мг/дм³ золота при уровне извлечения – 85 % [27].

Требуют переработки 2600 тыс. т хвостов пиритной флотации, аккумулярованных Миндякским ГОКом за 1934–1998 гг. «Упорное» золото заключено в пирите, содержание которого в хвостах 1% (гидроксидов 5 %). Концентрат основной отсадки, содержащий 80 г/т золота, после доизмельчения цианируется, обеспечивая 65–70 % извлечения [9].

Перспективным техногенным минеральным сырьём являются пески отсевов – отходы добычи песчано-гравийных материалов, содержащие минералы золота, платиноидов, рутил, ильменит, сфен, анатаз, циркон, концентрирующиеся в тяжёлой фракции мелких классов комплексного по составу техногенного минерального сырья. В самородном золоте выявлены фазы платины и иридия, что повышает ценность техногенного сырья; осложняют извлечение плотные, сплошные плёнки гидроксидов железа на золотинах.

Высокими значениями пробности отличается самородное золото древних кор выветривания (926–980 ‰), россыпей бассейнов Авзян (928–953 ‰) и Тарлау (934). Изменчивость и незначительная величина пробности характеризует рудное золото объектов «баймакского типа» Бакр-Тау, Таш-Тау (600–750 ‰), Балта-Тау (600–750 ‰), представленное «свободной» и «упорной» в сульфидах формами, что определяет выбор как традиционных (гравитация, цианирование в чанах и др.), так и новых инновационных (КВ и др.) технологий извлечения.

Наиболее распространенной примесью самородного золота является Ag, подчинённые постоянные примеси: Cu, Fe, Pb, Hg, реже встречаются примеси, обусловленные составом руд – As, Sb, Zn, Bi, Te, Se, как редкие отмечаются Pt, Pd, Os и Ir. Элементы-примеси в самородном золоте разнотипного сырья служат надёжными индикаторами среды минералообразования; признак сохраняется и в золоте россыпей, позволяя определять природу коренного источника металла.

При добыче золота из руд железных шляп на фабриках с законченным циклом обогащения на Учалинском и Сибайском месторождениях лишь за сезон 1948 г. трестом «Башзолото» было получено 600 кг попутной ртути. В бурых железняках медно-колчеданного месторождения Бакр-Узяк обнаружены мелкие 0,01–0,1 мм выделения самородного золота и амальгамы золота, близкой к фазе – Au_{0,81}Hg_{0,19} (рентгеновская плотность $\rho=1,854$ г/см³). Куприт, плотная плёнка которого покрывает поверхность выделений самородной меди, препятствует её контакту с раствором при гидрометаллургическом способе извлечения, существенно снижая эффективность КВ. Реликтовый золотосодержащий пирит отличается повышенными значениями параметра d/n и заметными примесями Au (9 г/т), Ag (916 г/т) и др.

С помощью растрового электронного микроскопа исследованы «рубашки» гидроксидов железа, снижающие технологические показатели КВ золота, впервые применённого на Урале НПФ «Полиметалл» (1996) на бурых железняках Западно-Озёрного месторождения. Плёнки гидроксидов железа ухудшают эффективность гравитационного обогащения.

Рудные, россыпные и техногенные месторождения Южного Урала и РБ в т.ч. комплексные по составу минерального сырья, что требует для их рационального освоения высокопроизводительных и щадящих для окружающей среды технологий, разработка и совершенствование которых невозможны без комплексного минералогического изучения.

Исследование самородного золота проводилось по методу Петровской Н.В. (1973) [26]. В Атласе самородного золота руд, россыпей и техногенных объектов РБ приведён новый и систематизирован имеющийся материал по типоморфизму и топоминералогии самородного золота разнотипного природного и техногенного минерального сырья объектов региона. В комплексе с традиционными методами минералогических исследований использованы прецизионные методы изучения вещества: рентгено-спектральный анализ, электронная микроскопия, вторично-ионная масс-спектрометрия, рентгеноструктурный анализ [21].

В рудных и россыпных месторождениях развиты выделения самородного золота идиоморфного (кристаллы, дендриты, дендритоиды), неправильного (интерстициальные, трещинные и др.) и смешанного (гемидиоморфные) морфологических типов (рис. 1, 2).

Для ряда россыпных месторождений отмечается весьма существенная, в отдельных случаях до 75 % и более, доля весьма мелкого (–0,25 +

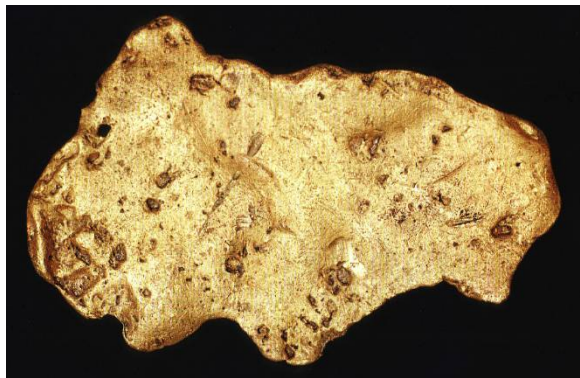


Рис. 1. Самородок золота «Ирендыкский медведь» найден в 1992 г. в Баймакском районе при вспашке поля. Масса – 4788 г. Размеры (см): длина – 31, ширина – 18,5, толщина – от 0,5 до 15. Хранится в хранилище Национального банка Республики Башкортостан



Рис. 2. Дендриты и дендритоиды самородного золота из карстовых карманов плотика Непряхинской россыпи. Учалинский рудно-россыпной район

0,1 мм), тонкого ($-0,1 + 0,05$ мм) и пылевидного ($-0,05 + 0,01$ мм) классов самородного золота от общей массы металла. Такое золото гидравлическим способом не извлекается и накапливается в эфельных отвалах, формируя техногенные месторождения и ранее его на Урале традиционно извлекали с применением амальгамации. Современные центробежные концентраторы и винтовые шлюзы отличаются высокой производительностью при минимальном техногенном воздействии на окружающую среду.

В комплексной россыпи Тарлау (бассейн р. Урал) выявлены важные в генетическом отношении агрегаты минеральных фаз: туламинита Pt_2FeCu в сростках с хромпикотитом $(Mg,Fe)Cr_2O_4$; самородного иридия с ферроплатиной (Pt_3Fe) ; самородного иридия с серпентином $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$; рутенистого осмия с форстеритом $Mg_2[SiO_4]$; иридиевого осмия с форстеритом, а также отдельных фаз рутенистого иридия и самородного осмия. Иридоосмин из этой рос-

сыпи содержит (мас. %): Ru (8,53-9,56), незначительные примеси Cu (0,6) и Fe (0,42). В самородном золоте установлено присутствие фаз платиноидов. Мелкое самородное золото древних конгломератов хребта Шатак обладает интерстициальной морфологией и магнитными свойствами, что может вызвать потери металла при обогащении. Ассоциирующие с золотом в цементе конгломератов гематит и магнетит золотоносны (соответственно 8,28 и 4,9 г/т).

Использование технологии КВ, впервые для Уральского региона применённой на окисленных рудах железной шляпы Западно-Озёрного месторождения (Учалинский рудно-россыпной район), обеспечивает сквозное извлечение из окисленных руд золота на уровне 70 % и серебра соответственно – 40 %. Высокое содержание золота в исходном минеральном сырье, значительная доля «упорного» золота, наличие теллуридов золота, часто свойственные рудам медноколчеданных месторождений, могут привести к технологическим потерям металла и образованию техногенных месторождений, представленных твёрдыми отходами процесса КВ.

Недостаточная изученность форм нахождения золота в рудах, его распределение по минеральным фазам и ассоциациям, неадаптированность принятых технологий к извлечению обуславливают низкие (10–20 %) показатели извлечения его из медно-цинковых руд Урала [31].

Результаты исследований распределения и форм нахождения золота в колчеданных рудах месторождений Учалинского ГОКа и промпродуктах их переработки с целью повышения извлечения [5] указывают на наличие здесь наночастиц золота, изучение которых сегодня весьма актуально [12].

Оптимизация региональных минералогических исследований сегодня требует сочетания возможностей ГИС- и нанотехнологий.

Дальневосточный регион. Разнообразная информация о морфологии, крупности, составе, структуре и других свойствах самородного золота Якутии обобщена в двух монографиях по Верхнеиндигирскому и Куларскому горнодобывающим районам [1, 20].

Альтернативными источниками пополнения ресурсов золотодобывающей отрасли ДФО могут стать техногенные россыпи, прогнозные ресурсы которых оцениваются в 4–4,5 тыс. т. Порядка 30 % техногенных россыпей Хабаровского края характеризуются высокой степенью глинистости и значительным содержанием тонкого и мелкого золота. К труднообогатимым отнесены россыпи с высоким до $16,4 \text{ кг/м}^3$ содержанием минералов тяжелой фракции и до 368 г/т золота в концентрате; доля объектов такого типа в общем балансе не более 1 %.

Мониторинг техногенных ресурсов ДФО важен для планирования стратегии освоения месторождений золота с извлечением всех ценных компонентов [29].

Минерально-сырьевая база Якутии по золоту, учтенная Государственным балансом запасов золота Республики Саха (Якутия), включает балансовые запасы промышленных категорий в количестве 558 т (59 %) и категории С₂ – 668 т (79 %); в 7 комплексных соответственно 53 т (6 %) и 116 т (18 %); в 772 россыпных – 294 т (35 %) и 16 т (3 %).

Мировая практика свидетельствует, что отходы обогащательного производства, в том числе золотосодержащие, могут эффективно перерабатываться современными геотехнологическими и гидрометаллургическими методами. Капитальные затраты на производство золота при этом могут быть снижены в 3–4 раза, себестоимость – в 1,5–2 раза [13].

По оценкам экспертов, в каждой из отработанных россыпей осталось золото, так как полностью извлечь его невозможно: в некоторых – 10–15% от добытого, в других – все 50 %. Большое количество техногенных россыпей образовано в Магаданской, Иркутской, Читинской областях, в Якутии, Бурятии, на Чукотке и в других регионах РФ. Отмечается, что среднее содержание в большинстве техногенных россыпей низкое – 100–150 мг/м³. Почти в каждой техногенной россыпи есть участки, содержащие золото для рентабельной добычи, необходимо их выделить и подобрать подходящую технологию.

В геологическом отношении техногенные россыпи состоят из ряда отличающихся по многим признакам элементов: отвалов вскрышных пород, эфельных отвалов промытых песков, галечных отвалов, илов в отстойниках технологической воды, недоработок пласта по мощности, внутриконтурных целиков, законтурных целиков, отходов ШОУ и ШОФ [8].

За десятилетия отработки россыпных месторождений на территории Республики Саха (Якутия) сформировались значительные объемы техногенного сырья, оценка ресурсной базы которого как источника восполнения минерально-сырьевой базы золотодобычи представляется весьма актуальной. В интервью журналу «Золото и технологии» (№ 2, июнь 2016 г.) заместитель министра промышленности РС (Я) Андрей Синяков отметил, что по состоянию Государственным балансом запасов полезных ископаемых региона учтены 810 месторождений с запасами 1,7 тыс. т золота, в распределенном фонде участков недр состоят более 200 месторождений, содержащих 80 % всех учитываемых ба-

лансовых запасов золота по РС(Я). Значительной (на уровне 50 %) остается доля россыпных месторождений в общем объеме добычи драгоценных металлов.

Председатель созданного в апреле 2017 г. Союза золотопромышленников РС (Я), генеральный директор АО «Корпорация развития Южной Якутии» Михаил Брук в интервью журналу «Восток России» (23.05.2017 г.) особо подчеркнул, что в 2016 г. регион с добычей 23,653 т золота занял пятое место в РФ. Масштаб сырьевой базы позволяет обеспечить добычу на уровне 40 т золота в год, чему благоприятствуют сложившаяся на сегодня ценовая ситуация на мировом рынке драгоценных металлов и оптимистичный прогноз на ближайшие пять лет (цена золота на Лондонской бирже металлов 10 ноября 2017 г. составила 1284,45 \$ за унцию). Необходим учет при налогообложении отработки техногенных запасов. Насущной является задача сохранения существующих кадров, имеющих опыт работы в области разведки и добычи драгметаллов. В связи с проблемой кадровой политики авторы данной статьи считают целесообразным включить в учебные планы профессиональной подготовки недропользователей высшей квалификации дисциплину «Технологическая минералогия».

Согласно современным оценкам и литературным данным, современные старательские артели, использующие традиционные промывочные приборы, могут терять от 20 до 50 % золота. Применение шлюзов мелкого наполнения или отсадочной технологии позволяет уменьшить потери, однако проблему потерь не решает, поскольку извлечение золота мелких классов остается низким: $-0,25 + 0,1 - 76\%$, $-0,1 + 0,05 - 48\%$ и $-0,05 - 18\%$ [2].

Для россыпных месторождений золота Дальнего Востока РФ в качестве основных геологических и производственных параметров, определяющих ресурсный потенциал техногенных образований, выделены: морфология и гранулометрический состав металла; его первичные содержания в песках; количество тяжелых минералов в шлихе исходных песков; гранулометрический состав исходных песков; литологический состав песков; особенности плотика россыпей; оборудование и техника, используемые при добыче; человеческие возможности; оборудование, используемое при доводке шлихов; время года осуществления промывки песков; качество разведки; оборудование доводки шлиховых концентратов; послеотрабочные мероприятия. Реальные ресурсы техногенных образований зависят от сохранности их разновидностей в постотрабочном пространстве, состояния мероприятий рекультивации [19].

В монографии «Техногенное золото Якутии» изложены результаты исследований особенностей извлечения золота из разнотипных техногенных образований. Последовательно характеризуются природа золотосодержащего техногенного минерального сырья, технологические свойства техногенного золота, особенности обогащения песков с мелким и тонким золотом, результаты исследования потерь золота в хвостах, технологии доводки и цианирования золотосодержащих шлихов. Отмечается, что из-за некачественной дезинтеграции глинистых песков потери золота с галей на обогатительных установках золотодобывающих предприятий Северо-Востока РФ достигали 22 %, а потери золота с хвостами шлюзов крупностью менее 1 мм – 32 % [10].

Применительно к отходам обогащения Аллах-Юньской ЗИФ с содержанием золота до 1,6 г/т разработана технологическая схема обогащения, спроектирована и сдана в эксплуатацию промышленная установка производительностью 30 т/ч, позволяющая методом активного выщелачивания извлекать до 96 % золота с выходом «золотой головки» до 2 кг/сут и содержанием химически чистого золота 1000 г/т и более 1400 кг/сут промпродукта с содержанием 900 г/т [15].

В долинах бассейнов рек Уяндина, Томмот и др. ранее отрабатывались мелкозалегающие долинские россыпи золота, техногенные отходы которых мощностью до первых до 15–20 м сохранились в долинах рек Хатыннах-Сала, Дадыка, Тарынг-Юрях и др. на площади более 5 км². Применение современных установок улавливания мелкого и тонкого золота выявило расхождение оценок учтенных потерь золота в эфелях 3–5 % и реального количества «потерянного» золота, достигающего 10–20 % (реже до 40 %), которые обуславливаются ситовыми характеристиками металла. Золото россыпи руч. Нимгеркан, размером менее 0,5 мм, в техногенных отложениях составляет 85 %, при среднем содержании 1,07 г/м³. Использование современных установок может увеличить извлечение на 20–30 %.

Арктический регион РФ, выделяемый как полиминеральная и полигенная мегапровинция [14], представлен широким спектром минеральных и генетических типов россыпных месторождений, многие из которых в значительной части выработаны, однако оставшиеся ресурсы, рассматриваемые в качестве перспективных на сегодня техногенных объектов, сопоставимы с масштабами промышленных месторождений. Приоритет отдаётся техногенным россыпям, содержащим в составе удалённых фаций мелкое и тонкое золото.

Заключение

Инвестиционная привлекательность объектов недропользования определяется полнотой технологических характеристик как природного, так и техногенного минерального сырья, изучение которого предполагает комплексное исследование его свойств для оптимальной реализации современных экологических, постоянно совершенствующихся технологий переработки, включая энергосберегающие – гидрометаллургию, бактериальное выщелачивание и др.

Мониторинг технологических свойств разнотипного золотосодержащего минерального сырья необходим для успешной реализации ресайклинга золота ввиду его неоднородности во всём диапазоне от макро- до наноуровня [1, 12, 20].

Необходимо создание региональных банков минералогических данных технологических особенностей самородного золота разнотипного природного и техногенного минерального сырья. Такой подход оптимизирует управление процессами ресайклинга как уже имеющегося техногенного сырья, так и способен обеспечить возможность стратегического прогнозирования формирующегося и потенциального.

Комплексные научные и прикладные минералогические исследования полезных компонентов в составе разнотипного техногенного сырья целесообразно организовать в рамках программ Некоммерческого партнёрства «Технологической платформы Твёрдые полезные ископаемые» (НП ТП ТПИ), участниками которой являются СВФУ им. М.К.Аммосова, БашГУ и другие учебные и научные центры. НП ТП ТПИ создана для обеспечения в кратко-, средне- и долгосрочной перспективе повышения эффективности добычи, глубокой переработки и комплексного использования твердых полезных ископаемых, качества, конкурентоспособности и доли добавленной стоимости в выпускаемой товарной продукции, снижения объемов промышленных отходов.

Ресайклинг техногенного минерального сырья с использованием инновационных подходов и передовых технологий, основанных на отечественных разработках, наряду с коммерческой выгодой снижает экологические риски недропользования, чем способствует созданию позитивного имиджа территории, обеспечивая реализацию политики устойчивого развития, как старых горнорудных районов, так и регионов нового освоения.

Литература

1. Амузинский В.А., Анисимова Г.С., Жданов Ю.Я. Самородное золото Якутии. Новосибирск: Наука, 1992. 184 с.

2. *Афанасенко С.И., Лазариди А.Н.* Золотая жила техногенных отвалов // Золотодобывающая промышленность. 2010. №1.
3. *Беневольский Б.И., Блинова Е.В., Бражник А.В. и др.* Оценка прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Вып. Золото. М.: ЦНИГРИ, 2002. 182 с.
4. *Верчеба А.А., Маркелов С.В.* Техногенные месторождения, способы их формирования и переработки: Учебное пособие. М.: МГТУ, 2003. 66 с.
5. *Викентьев И.В.* Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. М.: Научный мир, 2004. 344 с.
6. *Горбатова Е.А.* Минералого-технологическая оценка отходов обогащения колчеданных руд Южного Урала: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. М.: ВИМС, 2013. 41 с.
7. *Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 г.»*. М.: ИПР РФ, 2015. 473 с.
8. *Кавчик Б.К., Пятаков В.Г.* Геологическое строение техногенных россыпей и его влияние на выбор способа отработки // Золотодобыча. 2010. № 135, февраль.
9. *Казаков П.В.* К выбору рационального способа переработки техногенного золотосодержащего сырья: Геологический сборник №10. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2013. С. 257–262.
10. *Ковлеков И.И.* Техногенное золото Якутии. М.: МГТУ, 2002. 303 с.
11. *Комаров М.А.* Техногенные минерально-сырьевые ресурсы / Под ред. В.В. Караганова и Б.С. Ушкенова и др. М.: Алматы, 2003. 204 с.
12. *Конеев Р.И.* Наноминералогия золота эпitherмальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан). СПб.: DELTA, 2006. 220 с.
13. *Кычкин А.Е.* Разработка технологии извлечения золота из техногенных отвалов Аллаш-Юньской ЗИФ: Дис. ... к.т.н. Иркутск, 2001. 124 с.
14. *Лаломов А.В., Бочнева А.А., Чефранов Р.М. и др.* Россыпные месторождения Арктической зоны России: современное состояние и пути развития минерально-сырьевой базы. Арктика: экология и экономика. 2015. № 2. С. 66–77.
15. *Логачев А.В.* Упрочнение сырьевой базы производства золота выщелачиванием металлов на заключительном этапе разработки месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. С. 86–92.
16. *Лодейщиков В.В.* Золотоизвлекающие фабрики мира: Аналитический обзор/ОАО «Иргиредмет». Иркутск, 2005. 447 с.
17. *Малютин Ю.С.* Техногенные минерально-сырьевые ресурсы цветной металлургии России и перспективы их использования // Маркшейдерия и недропользование. 2001. № 1, июль–сентябрь. С. 21–25.
18. *Мелентьев Г.Б.* Техногенный потенциал: в ожидании промышленного освоения // Редкие земли. 2014. 29 августа. С. 34–40.
19. *Мирзеханов Г.С.* Оценочные критерии ресурсного потенциала техногенных образований россыпных месторождений золота Дальнего Востока России // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1, вып. № 23. С. 129–150.
20. *Москвитин С.Г., Анисимова Г.С., Жданов Ю.Я.* Самородное золото Якутии (Куларский район). Новосибирск: Наука, 1997. 198 с.
21. *Мустафин С.К.* Атлас самородного золота руд, россыпей и техногенных объектов Южного Урала (на примере Республики Башкортостан) // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований: Материалы конференции, посвященной 100-летию Н.В. Петровской. Т. II. М.: ИГЕМ РАН, 2010. С. 67–69.
22. *Мустафин С.К.* Задачи минералогических исследований природных и техногенных объектов старых горнорудных регионов Южного Урала // Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития геологической отрасли Республики Узбекистан: Материалы Международной научно-технической конференции. Ташкент: ИМР, 2014.
23. *Мустафин С.К.* Техногенное минеральное сырье горнорудных регионов: проблемы и перспективы рационального комплексного освоения: Материалы VI Международной научной конференции «Современные проблемы регионального развития». Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН, 2016. С. 72–75.
24. *Мустафин С.К., Бойков Г.В.* Техногенное сырье золотодобычи. Образование, состав, экологические проблемы переработки // Сб. трудов научно-практической конференции «Использование отходов горнодобывающей и перерабатывающей промышленности». Челябинск: Дом ученых, 2004. С. 50–55.
25. *Пановко Г.Я.* Повышение ресурсо- и энергоэффективности основных технологических и транспортных агрегатов для переработки минерального и техногенного сырья в горнодобывающих и металлургических производствах // Материалы итоговой конференции «Рациональное природопользование». М.: Моск. гос. ин-т инженерной экологии, 2009. С. 51.
26. *Петровская Н.В.* Самородное золото: общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса. М.: Наука, 1973. 348 с.
27. *Провалов С.А.* Комбинированная гравитационно-гидрохлоридная технология переработки

ки лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик: Дис. ... к.т.н. Магнитогорск: МГТУ, 2007. 164 с.

28. Рудой Г.Н., Волкова Н.А., Шадрунова И.В., Зелинская И.В. Технологические, экономические и экологические аспекты переработки техногенного сырья горно-металлургических предприятий (Плаксинские чтения 2011). Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2011. С.6–9.

29. Рассказов И.Ю., Пономарчук Г.П., Литвинцев В.С. и др. Анализ состояния золотодобычи из россыпей юга Дальнего Востока по результатам экспертизы нормативов потерь полезных ископаемых // Недропользование – XXI век. 2009. № 3. С.66–70.

30. Трубецкой К.Н., Чантурия В.А., Каплунов Д.Р. и др. Комплексное использование и глубокая переработка минерального сырья. М.: Наука, 2010. 437 с.

31. Чантурия Е.Л. Развитие теории и методов модификации технологических свойств минералов в разделительных процессах обогащения труднообогатимых руд цветных и редких металлов. Дис. ... д.т.н. М., 2006. 338 с.

32. U.S. Geological Survey, 2017, Mineral commodity summaries 2017: U.S. Geological Survey. 202 p.

33. Litvintsev V.S., Bانشchikova T.S., Leonenko N.A. and Alekseev V.S. Effective Methods for Gold Recovery from Mining Wastes at Placers // Journal of Mining Science. 2012. Vol. 48, no. 1. P. 198–202.

Поступила в редакцию 03.11.2017