

УДК (622.75.77+549):622.013.2

**МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РОССЫПИ**

М. А. Гурман, Л. И. Щербак, Р. В. Богомяков, Е. В. Вылегжанина

*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: mgurman@yandex.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Техногенные образования россыпных месторождений могут рассматриваться как важный резерв пополнения минерально-сырьевой базы золотодобычи Дальнего Востока России. Экспериментальные исследования выполнены с использованием технологической пробы, отобранной из гале-эфельных отвалов отработанной золотосодержащей россыпи. Приведена минералого-петрографическая характеристика продуктов обогащения. В составе золота выявлены примеси платины, серебра, титана, железа. Представлены результаты обогащения по гравитационной схеме с предварительной магнитной сепарацией. Выход магнитной фракции составил 39.77 %, в магнетите установлено присутствие титана. Извлечение золота в гравитационный концентрат составило 91.6 %, наряду с золотом в концентрате содержится 0.06 г/т платины и 57.7 г/т серебра.

Техногенные образования, золото, платина, извлечение, гравитационное обогащение, магнитная сепарация

Хабаровский край — один из ведущих регионов России по добыче благородных металлов. За счет освоения коренных месторождений доля рудного золота в общем объеме золотодобычи в настоящее время составляет 75–77 %. В связи с истощением запасов россыпных месторождений особую важность приобретают вопросы изучения и вовлечения в переработку золотосодержащего техногенного сырья. Большие запасы горной массы, увеличивающиеся ежегодно на 1.5–2 млрд т, прогнозные ресурсы золота техногенных россыпей, составляющие 4.5–5 тыс. т, характеризуют такие объекты как важный резерв пополнения минерально-сырьевой базы золотодобычи [1–9]. Аналитическими расчетами ресурсов золота 149 техногенных россыпных месторождений Хабаровского края суммарно определена вероятная их сырьевая база в 124.3 т [6].

По данным Иргиредмета, в техногенные россыпные образования в зависимости от способов отработки, обогащения и качества исходного сырья переходит от 10 до 50 % содержащегося в первичной россыпи золота [3]. В техногенных образованиях юга Дальнего Востока совместно с золотом встречаются платина, магнетит, титаномагнетит, ильменит, вольфрамит, касситерит, шеелит, хромит, циркон и др. Наличие попутных ценных компонентов существенно повышает промышленную значимость техногенных образований. Применительно к россыпным месторождениям золота техногенные образования включают отвальный комплекс (вскрышные породы, гале-эфельные отвалы), остаточные целиковые участки, невыбранные приплотиковые участки, хвосты переработки шлихового концентрата, современные аллювиальные отложения,

формирующиеся за счет размыва отвального комплекса и остаточных целиковых участков [5]. Эфельные отвалы считаются весьма перспективными для повторной переработки, содержание золота в разных частях отвалов может составлять $0.55 - 5.0 \text{ г/м}^3$ [3, 6–9]. Ресурсы галечных отвалов также учитываются при переоценке техногенных образований, в основании галечных отвалов массовая доля золота может достигать 2 г/м^3 . Техногенные россыпи представляют собой минеральное сырье, подготовленное к обогащению; проведена определенная дезинтеграция и классификация материала. Исследования возможности извлечения благородных металлов из гале-эфельных отвалов отработанной россыпи с учетом особенностей минерального состава, ситовых характеристик и морфологии золота являются весьма актуальными.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования выполнены с использованием технологической пробы, отобранной из гале-эфельных отвалов отработанной золотоносной россыпи в Комсомольском районе Хабаровского края. Изучение минерального состава исходной пробы и продуктов обогащения проводилось с применением петрографического и минералогического анализов с помощью оптической и электронной микроскопии (стереомикроскопы Stemi 2000C, Stemi DV4, Carl Zeiss и растровый электронный микроскоп LEO EVO 40HV, Германия). Перед минералогическим анализом осуществлялось гравитационно-магнитное фракционирование. Для количественного определения золота и металлов платиновой группы использованы пробирный, спектрохимический и эмиссионный спектральный, атомно-абсорбционный анализы (спектрограф PGS-2 (Carl Zeiss, Германия), спектрометры СТЭ-1; ДФС 8-2, ДФС 458; спектрометр AAnalyst-300 (Perkin Elmer, США)).

Исследования по обогатимости представленного материала (крупностью менее 2 мм) проводились в соответствии с данными минералогического анализа исходных проб. Учитывая наличие в пробах значительного количества магнетита (магнитная фракция ~40 %), применялись магнитные методы обогащения. Магнитная сепарация осуществлялась мокрым способом на магнитных сепараторах МБС-Л и ММС-2ПМ (магнитная индукция 900 и 250 мТл соответственно). Промпродукты магнитной сепарации направлялись на концентрационный стол для контроля содержания золота; продукты стола подвергались минералогическому анализу.

Обогащение немагнитной фракции выполняли методами отсадки, концентрации на столе, центробежной сепарации. Отсадку материала проводили в диафрагмовой машине “Омск” при следующих параметрах работы: частота хода — 75, амплитуда колебаний — 70, расход транспортной воды — $1.2 \text{ м}^3/\text{ч}$. Нижний слой надрешетного продукта и подрешетный продукт отсадки подвергали рассеву на классы: $-2 + 1$; $-1 + 0.5$; $-0.5 + 0.2$; $-0.2 + 0.0 \text{ мм}$; затем узко классифицированный материал последовательно подавался на концентрационный стол СКО-0.5. Верхний слой надрешетного продукта, хвосты отсадки и хвосты стола объединялись и направлялись на контрольное обогащение методом центробежной сепарации (концентратор Knelson 3, рабочее давление воды 3 атм).

Полученные продукты обогащения (головки, промпродукты и концентраты стола и центробежного концентратора) направлялись на минералогический анализ. После просмотра под биноклем и выделения зерен золота крупнее 0.05 мм золотосодержащие продукты обогащения также подвергались химическому анализу. При расчете баланса содержание золота в этих продуктах определялось по сумме минералогически выделенного Au и остаточного тонкого золота, определенного химическим анализом; хвосты обогащения также подвергались химическому анализу. Схема переработки пробы, отобранной из гале-эфельных отвалов золото-содержащей россыпи, приведена на рис. 1.

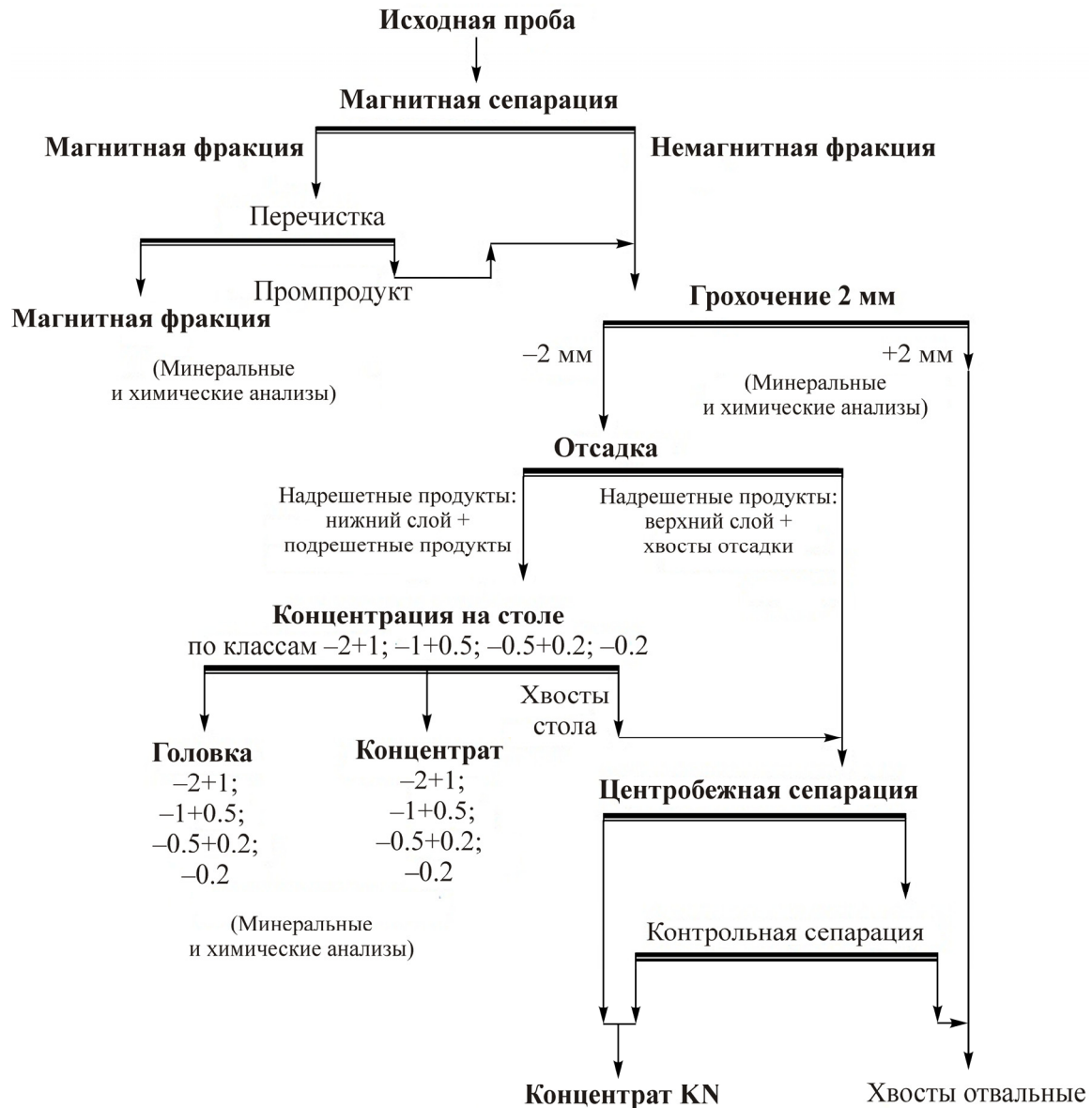


Рис. 1. Схема переработки пробы из галле-эфельных отвалов золотосодержащей россypi

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных минералого-технологических исследований выявлено, что в составе технологической пробы содержатся углисто-кремнистые и кремнистые сланцы; интрузивные ультраосновные породы: дуниты и пироксениты (нередко с включениями магнетита, ильменита, хромита), иногда для них характерны сидеронитовые структуры; базальты, диабазы, пегматиты. В пробе установлено золото, магнетит, титаномагнетит, ильменит, хромит, шеелит, вольфрамит, касситерит. Основной ценный компонент пробы — золото, массовая доля которого (по данным химического анализа исходных проб и расчетам технологического баланса) составляет 1.8–2.07 г/т. Размеры золотин варьируют от 0.05 до 1 мм, преобладают знаки размером 0.2–0.5 мм. Цвет золотин — желтый, красновато-желтый, отмечаются налеты гидрокислов железа. Золото наблюдается в сростании с кварцем, магнетитом, титаномагнетитом, иногда с оливином, характерны сростки с вмещающими породами (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты минералогического и электронно-микроскопического исследования золота, выделенного из продуктов обогащения

Продукты обогащения	Содержание Au, мг/зн	Размеры, мм	Морфологические признаки и электронно-микроскопические спектры
Надрешетные продукты отсадки — концентрация на столе			
– 1 + 0.5 мм Концентрат стола	2.780/1	1.5×0.5	Форма удлинненно призматическая; поверхность бугорчатая, края резко зазубрены. Цвет желтый, присутствует налет белого и бурого цвета. 1) $Au_{91.9}Pt_{8.1}$; 2) $Au_{86.36}Pt_{6.12}Rb_{1.68}O_{5.84}$; 3) Au_{100} ; 4) $Au_{83.12}C_{6.22}O_{9.34}Fe_{1.32}$
– 1 + 0.5 мм Промпродукт стола	0.0001/1	1.5×0.5	Уплотненная пластинка; на поверхности выступы оглаженных ромбооктаэдров и кубов; края мягко изрезаны; на краях знака — налет гидроокислов железа. Цвет желтый. 1) $Au_{93.61}Pt_{6.39}$; 2) $Au_{64.66}Pt_{6.39}Ta_{5.93}Fe_{2.57}Al_{1.62}O_{20.83}$; 3) $Au_{86.75}Fe_{1.6}O_{11.4}$
Подрешетные продукты отсадки — концентрация на столе			
– 1 + 0.5 мм Головка стола	1.904/12	0.1 – 0.5	Форма лепешковидная, уплотненная и 1 знак — лента 0.3×7 мм. Цвет желтый, красновато-желтый
– 1 + 0.5 мм Концентрат стола	5.577/5	1×1	Лепешковидная форма с отростком, изометричное зерно. Цвет красновато-желтый. 1) $Au_{90.37}Fe_{1.86}O_{7.76}$; 2) $Au_{79.56}Fe_{5.22}O_{15.22}$; 3) $Au_{75.81}Fe_{3.11}O_{14.4}C_{6.68}$
		1×0.3	Сложная лепешковидная форма, с налетом гидроокислов железа. Цвет желтый
		0.5×2	Плоская лепешковидная форма, края сглажены. Ярко желтый цвет
		1×0.5	Квадратная пластина с выступами и бугристой поверхностью. Цвет красновато-желтый
		1×0.5	Комковидная сложная форма в сростке с дунитом. Цвет красновато-желтый. Сросток с дунитом
– 1 + 0.5 мм Промпродукт стола	1.363/1	0.2×1	Дендритовидная комковидная форма, в сростке с кварцем. Цвет желтый. 1) $Au_{88.18}Pt_{6.85}O_{4.97}$; 2) Au_{100}
– 0.5 + 0.2 мм Головка стола	16.847/28	0.05 – 0.3	Лепешковидные, комковидные с бугристой поверхностью, с налетом гидроокислов железа. Желтый, красновато-желтый цвет. Все золотины в сростках с титаномagnetитом, кварцем, оливином. 1) $Au_{3.9}Fe_{65.31}Ti_{30.79}$; 2) $Au_{6.1}Fe_{66.87}Ti_{27.03}$; 3) $Au_{97.34}Fe_{2.66}$; 4) $Au_{85.29}Pt_{7.11}Ag_{4.95}Fe_{2.65}$; 5) $Fe_{23.94}Ti_{18.5}O_{57.56}$; 6) $Au_{85.18}Pt_{6.54}Ag_{8.28}$; 7) $Au_{87.63}Pt_{5.89}Fe_{2.38}Ti_{0.95}O_{3.15}$
– 0.2 + 0.0 мм Головка стола	2.641/32	0.1 – 0.2	Лепешковидные, комковидные с бугристой поверхностью, края изрезанные. Цвет желтый, красновато-желтый. Все золотины в сростках с magnetитом, кварцем, лимонитом, оливином
– 0.2 + 0.0 мм Концентрат стола	0.865/14	0.1 – 0.1	Пластинчатая форма. Поверхность бугристая, края изрезанные. Цвет желтый
Концентрат KN	1.36/2	0.1 – 0.2	Пластинчатая форма. Цвет желтый

Формы золотины крайне разнообразны: пластинчатые, комковидные, а также изометричные, сферические, октаэдрические, ромбододекаэдрические и кубовидные. Поверхность часто бугристая, края зерен изрезанные, иногда остро зазубренные, что дает основание полагать о непродол-

жительном перемещении материала россыпи. При исследовании золота на электронном микроскопе в его составе в ряде зерен выявлено присутствие платины, серебра, титана, железа. На рис. 2 представлены электронно-микроскопические изображения золота “зазубренных” форм с примесью данных элементов. Отмечаются золотины мягко окатанных форм с примесью платины (рис. 3).

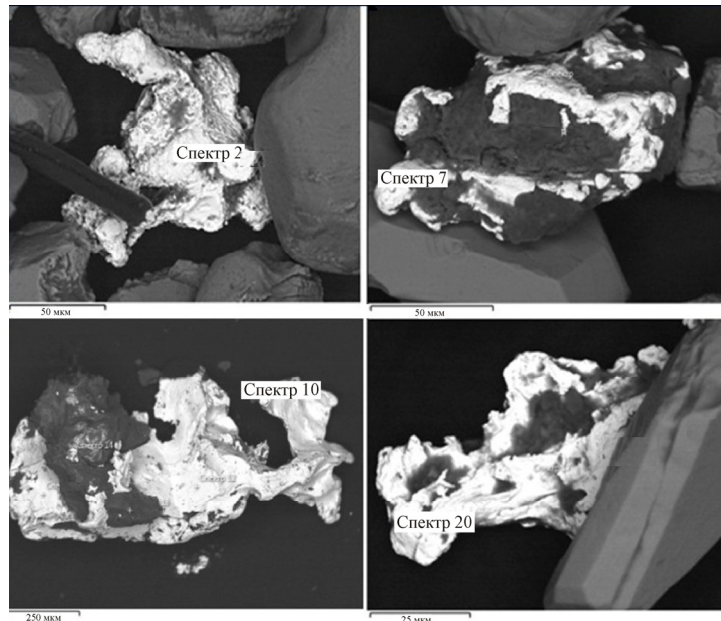


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения золота “зазубренных” форм с примесью платины, серебра, титана, железа: спектр 2 — $\text{Au}_{85,3}\text{Pt}_{7,1}\text{Ag}_5\text{Fe}_{2,6}$; спектр 7 — $\text{Au}_{85,2}\text{Ag}_{8,3}\text{Pt}_{6,5}$; спектр 10 — $\text{Au}_{91,9}\text{Pt}_{8,1}$; спектр 20 — $\text{Au}_{97}\text{Fe}_3$

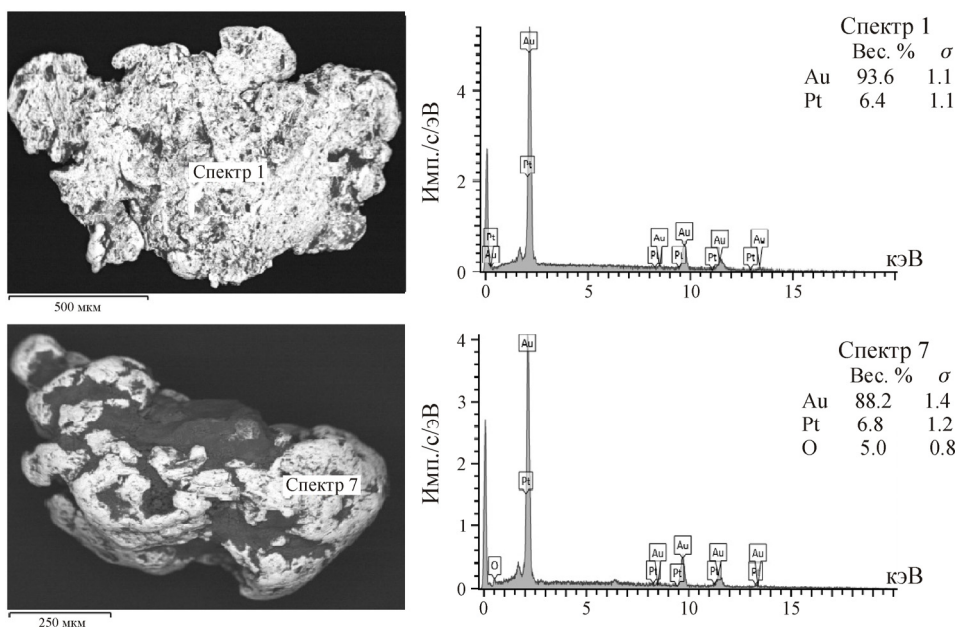


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения золота окатанных форм с примесью платины

Минералого-петрографическим анализом выявлено значительное количество дунитов и пироксенитов в золотовмещающих породах, что позволяет судить о расположении отработанной россыпи в поле развития осадочных и магматических пород, среди которых немалое место

принадлежит ультраосновным. Об этом же свидетельствует комплекс рудных минералов: магнетит, титаномагнетит, хромит, ильменит и примеси платины, железа, титана в золоте. Морфология золота указывает на то, что россыпь неперемещенная. Данные особенности являются прямыми поисковыми признаками коренного месторождения благородных металлов.

Проведенными технологическими исследованиями установлена возможность переработки техногенного материала с целью извлечения золота по гравитационной схеме с предварительной магнитной сепарацией. Выход магнитной фракции составил 39.77 %, массовая доля магнетита в ней 95 %. Электронно-микроскопическими исследованиями в составе магнетита обнаружено присутствие титана (16–28 %) — титаномагнетит (рис. 4). Отмечается наличие висмута самородного, шеелита.

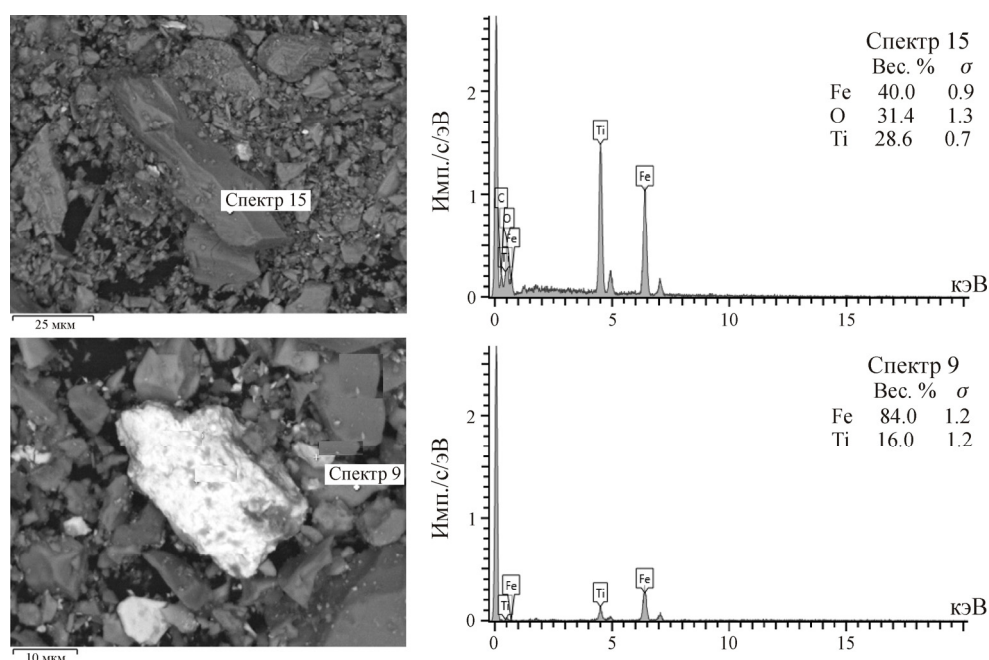


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения титаномагнетита: спектр 15 ($\text{Fe}_{40}\text{O}_{31.4}\text{Ti}_{28.6}$); спектр 9 ($\text{Fe}_{84}\text{Ti}_{16}$)

При обогащении немагнитной фракции методами отсадки и концентрации на столе классифицированного материала по фракциям $-1+0.5$ мм, $-0.5+0.2$, $-0.2+0.0$ мм получены концентраты с содержанием золота 102.32; 331.55 и 338.49 г/т соответственно, при объединении которых общее содержание золота в концентрат составило 220.75 г/т, извлечение — 89.58 %, выход — 0.84 %. Контрольное обогащение центробежной сепарацией надрешетных продуктов и хвостов отсадки позволило дополнительно извлечь 2.02 % золота. Таким образом, общее извлечение золота по схеме гравитационного обогащения с предварительной магнитной сепарацией достигло 91.6 % при содержании 215.46 г/т. В гравитационном концентрате, наряду с золотом, установлено содержание платины — 0.06 г/т, серебра — 57.7 г/т. Потери золота с магнитной фракцией составили 3.83 % при содержании Au — 0.2 г/т, с хвостами гравитационного обогащения — 4.57 % при содержании 0.16 г/т. Недоизвлеченное в процессе обогащения золото является преимущественно тонкодисперсным; часть его представлена тонкими включениями в порообразующие минералы. Извлечение такого золота предполагает применение гидрометаллургической переработки [10–13]. Технологические показатели переработки пробы и минералого-петрографическая характеристика продуктов обогащения приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Технологические показатели переработки пробы гале-эфельных отвалов и минералого-петрографическая характеристика продуктов обогащения

Продукты обогащения	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %	Минералого-петрографическая характеристика
Магнитная сепарация				
Магнитная фракция	39.77	0.20	3.83	Магнетит ~95 %, титаномагнетит, ильменит, хромит, киноварь, шеелит
Промпродукт магнитной фракции	9.54	0.46	2.13	Магнетит ~3 %; титаномагнетит, ильменит ~5 %; дуниты с включениями магнетита
Немагнитная фракция	50.69	3.84	94.04	Дуниты мелкозернистые, базальты, пегматиты, сланцы; кварц, оливин, шеелит, вольфрамит, хромит, титаномагнетит, гранат
Итого проба	100.00	2.07	100.00	Дуниты, пироксениты, базальты, пегматиты; золото, магнетит, титаномагнетит, ильменит, хромит, шеелит, вольфрамит, касситерит
Гравитационное обогащение (отсадка и концентрация на столе)				
Поступило: Немагнитная фракция	50.69	3.84	94.04	Дуниты, базальты, пегматиты, углисто-кремнистые сланцы; магнетит, титаномагнетит, ильменит, хромит, оливин, гранат
Промпродукт магнитной фракции	9.54	0.46	2.13	
Всего	60.23	3.31	96.17	
Продукты				
Концентраты стола: -1+0.5мм	0.41	102.32	20.07	Au своб.; ильменит, магнетит, метамагнетит ~90 %; гранаты, циркон ~10 %
-0.5+0.2мм	0.24	331.55	38.44	Au своб.; титаномагнетит, ильменит, шеелит, магнетит, киноварь ~95 %; нерудные минералы ~5 %
-0.2+0.0мм	0.19	338.49	31.07	Au своб.; титаномагнетит, ильменит, шеелит, магнетит, вольфрамит, касситерит ~95 %; циркон, сфен, гранаты, оливин ~5 %
Итого концентрат	0.84	220.75	89.58	Au своб.; титаномагнетит, ильменит, шеелит, магнетит, вольфрамит, касситерит; циркон, сфен, горный хрусталь, гранаты, оливин ~5 %
Хвосты	59.39	0.23	6.59	Углисто-кремнистые сланцы; дуниты, базальты, пегматиты, диабазы
Итого	60.23	3.31	96.17	
Центробежная сепарация хвостов				
Поступило: Хвосты	59.39	0.23	6.59	Дуниты, пироксениты, пегматиты, диабазы, сланцы ~96 %; кварц, гранаты, нефрит, оливин, пироксен
Продукты: Концентрат КN	0.04	104.54	2.02	Au своб., рудные минералы ~95 %, нерудные минералы ~5 %
Хвосты КN	59.35	0.16	4.57	Дуниты, пироксениты, пегматиты, диабазы, сланцы ~96 %; кварц, гранаты, нефрит, оливин, пироксен
Итого	59.39	0.23	6.59	

Окончание табл. 2.

Конечные продукты				
Магнитная фракция	39.77	0.20	3.83	Магнетит ~ 95 %, титаномагнетит, ильменит, хромит, киноварь, шеелит
Золотосодержащий концентрат	0.88	215.46 Pt – 0.06 г/т, Ag – 57.7 г/т	91.60	Au своб.; титаномагнетит, ильменит, шеелит, магнетит, вольфрамит, касситерит ~ 95 %; циркон, сфен, гранаты, оливин ~ 5 %
Хвосты обогащения	59.35	0.16	4.57	Дуниты, пироксениты, пегматиты, диабазы, углисто-кремнистые сланцы ~ 96 %; кварц, гранаты, нефрит, оливин, пироксен
Всего проба	100.00	2.07	100.00	

Проведенный гранулометрический анализ свидетельствует о том, что большая часть выделенного золота (86.1 %) сосредоточена во фракции $-1+0.2$ мм, в том числе 52.2 % приходится на класс крупности $-0.5+0.2$ мм, таким образом, доля мелкого золота — менее 0.2 мм составляет 13.9 %. Гранулометрический состав золота представлен на рис. 5.

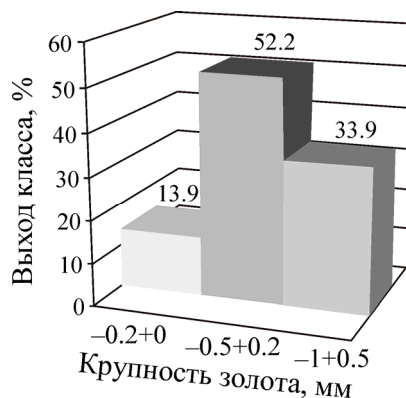


Рис. 5. Гранулометрический состав золота, выделенного из продуктов обогащения пробы, отобранной из гале-эфельных отвалов отработанной россыпи

ВЫВОДЫ

Наличие в составе проанализированных проб золота, магнетита, титаномагнетита, ильменита, а в золоте — примеси платины указывает, что на данном участке следует искать коренные месторождения этих металлов.

Экспериментально подтверждена возможность переработки пробы по гравитационной схеме с предварительной магнитной сепарацией. Выход магнитного продукта составил 39.77 % при содержании магнетита 95 %. В магнетите установлено присутствие титана, что приближает его к титаномагнетиту.

Общее извлечение золота в концентрат составляет 91.6 % при содержании Au 215.46 г/т, платины — 0.06 г/т, серебра — 57.7 г/т. Большая часть выделенного свободного золота (86.1 %) представлена зернами крупностью $-1+0.2$ мм, доля мелкого золота — менее 0.2 мм составляет 13.9 %. В составе золота определено присутствие платины, серебра, титана, железа. Содержание золота в хвостах обогащения 0.16 г/т.

В целом гале-эфельные отвалы отработанной россыпи представляются перспективными в качестве объектов повторной переработки с целью извлечения благородных металлов. Выявленное широкое развитие ультраосновных пород, а также комплекс рудных минералов, примеси платины, железа, титана в золоте являются прямыми признаками коренного месторождения благородных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чантурия В. А.** Развитие физико-химических основ и разработка инновационных технологий глубокой переработки техногенного минерального сырья // Горн. журн. — 2014. — № 7. — С. 79–84.
2. **Быховский Л. З., Спорыхина Л. В.** Техногенные отходы как резерв пополнения минерально-сырьевой базы: состояние и проблемы освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2011. — № 4. — С. 15–20.
3. **Кавчик Б. К.** Геологическое строение техногенных россыпей и его влияние на выбор способа отработки // Золотодобыча. — 2010. — № 135. — С. 14–19.
4. **Чемезов В. В., Тальгамер Б. Л.** Техногенные россыпи (образование, оценка и эксплуатация). — Иркутск: ИрГТУ, 2013. — 239 с.
5. **Шило Н. А.** Учение о россыпях. Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 576 с.
6. **Мамаев Ю. А.** Техногенные россыпи благородных металлов Дальневосточного региона России и их рациональное освоение. — М.: Горная книга, 2010. — 309 с.
7. **Ван-Ван-Е А. П.** Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений. — М.: Горная книга, 2010. — 268 с.
8. **Литвинцев В. С.** Проблемы рационального освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в восточных районах России // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 97–104.
9. **Мирзаханов Г. С.** Оценочные критерии ресурсного потенциала техногенных образований россыпных месторождений золота Дальнего Востока России // Вестн. Краунц. Науки о Земле. — 2014. — № 1. — С. 139–150.
10. **Гурман М. А., Щербак Л. И., Рассказова А. В.** Извлечение золота и мышьяка из продуктов обжига упорных пирит-арсенопиритовых концентратов // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 145–150.
11. **Рассказов И. Ю., Александрова Т. Н., Гурман М. А., Литвинова Н. М.** Инновационные технологии переработки благороднометалльного минерального сырья Дальневосточного региона // Недропользование XXI век. — 2014. — № 2. — С. 38–43.
12. **Рассказов И. Ю., Гурман М. А., Александрова Т. Н., Щербак Л. И.** Минералого-технологические особенности и перспективы переработки упорных золотомышьяковых руд Учаминского месторождения // Тихоокеан. геология. — 2014. — № 4. — С. 75–83.
13. **Гурман М. А., Александрова Т. Н., Кондратьев С. А.** Проблемы извлечения золота из упорных руд Дальневосточного региона России и некоторые пути их решения // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 124–135.

Поступила в редакцию 29/XI 2015