

УДК 550.4: 622.7

ОСОБЕННОСТИ НАХОЖДЕНИЯ И ПОДВИЖНОСТЬ ЗОЛОТА В ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТАХ ЗОЛОТОИЗВЛЕКАТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ

Р.В. Борисов^{1,2}, В.И. Брагин^{1,2}, Н.Ф. Усманова^{1,2}, А.А. Плотникова^{1,2}

¹*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия, E-mail: vic.bragin@gmail.com*

²*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50/24, Красноярск, 660036, Россия, E-mail: roma_boris@list.ru*

Работа посвящена изучению форм нахождения золота в технологических пробах золотосодержащих хвостов ЗИФ. Изучены особенности гранулометрического и вещественного состава технологических проб лежалых хвостов сульфидных и окисленных руд. Определено распределение золота по классам крупности: более 50% золота содержится в тонких классах – 0.044 мм. Методом газовой адсорбции показано, что пробы хвостов имеют высокую удельную поверхность, которая может играть важную роль в процессах переосаждения и миграции золота и сопутствующих компонентов. Обнаружен факт корреляции золота с железосодержащими формами, что может быть использовано для его извлечения магнитными методами. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии показано отсутствие в пробах хвостов значимых количеств углистых веществ, которые могут сорбировать золото. Показана возможность образования в пробах хвостов нерастворимых осадков цианоферратов железа, на которые может происходить самопроизвольное осаждение подвижного золота в виде частиц микронных размеров.

Ключевые слова: золотосодержащие хвосты, вещественный состав, подвижное золото, геохимический анализ, магнитная сепарация

Интенсивное развитие золотодобывающей отрасли в предыдущие десятилетия привело к накоплению больших объемов техногенных отвалов, в которых содержатся значительные количества ценных компонентов. По мере снижения содержания золота в исходных рудах, а также вследствие высокой экологической нагрузки, оказываемой техногенными отвалами на

окружающую среду, растет востребованность в технологически эффективных и экономически целесообразных технологиях извлечения ценных компонентов из вторичного сырья [1, 2].

Разработка и освоение технологии извлечения золота из накопленных техногенных минеральных объектов (отвалов, хвостов и воды ЗИФ) весьма актуально для многих золотодобывающих предприятий. В связи с тем, что хвосты золотоизвлекательных фабрик отличаются низким содержанием золота и его нахождением в труднообогащаемой форме, вследствие процессов окисления, выщелачивания, переосаждения, то для их переработки необходимо как привлечение существующих современных методов обогащения, так и разработка новых оригинальных подходов [3 – 9]. В последние годы разрабатываются методы переработки хвостов, например, ультразвуковые и магнито-импульсные [4], агломерационной флокуляции с последующей флотацией [5], применение новых собирателей и модификаторов при флотации техногенного сырья [6 – 8], биогидрометаллургические технологии [9] и др.

Несмотря на актуальность задачи, работы по изучению форм нахождения и миграции элементов в хвостохранилищах ЗИФ немногочисленны [10 – 13]. В работе [10] установлено, что золото не распределено равномерно по объему заводского хвостохранилища, а сконцентрировано на локально обогащенных участках, соседствующих с местами слива пульпы. При изучении вещественного состава хвостовых отвалов следует учитывать, что свободное золото обычно покрыто пленками гидроксидов железа. Также авторы [10] рассматривают механизмы переноса золота, например, через процессы растворения – переосаждения на других минералах, либо на образовании коллоидного золота с последующей коагуляцией. Переходное, легко мигрирующее золото принято называть «невидимым». Особенности физико-химического состояния «невидимого» дисперсного золота рассмотрены в работе [11]. Коллоиды могут содержать очень высокие концентрации золота и принимать активное участие в образовании высокосортных накоплений золота в гипогенных системах [13]. Известно, что растворенное золото, находящееся в хвостохранилище в виде ионов, крайне легко восстанавливается с использованием как химических восстановителей, так и при различном облучении (ультразвук, ультрафиолет) [14]. Например, в присутствии ионов Fe^{2+} , ионы Au^{3+} могут восстанавливаться, образуя оксиды железа (ферригидриты, гетит) с наночастицами золота [15]. Подвижность благородных металлов в хранилищах хвостов наблюдали и авторы [12, 13]. Так в работе [13] авторы исследовали процессы миграции золота и серебра в Урском хвостохранилище. «Невидимое» золото обнаружено во взвешенной форме и в коллоидном состоянии. Так же авторы [13] обнаружили факт концентрирования золота (до 155 г/т) на торфяных органических веществах. В работе [16] авторами рассмотрены процессы

миграции подвижного золота в природных водных экосистемах. Обнаружено, что отдельные частицы золота становятся подвижными и впоследствии осаждаются на окислах железа и органических составляющих, которые тесно связаны с илистыми или глинистыми донными отложениями [16].

Таким образом, изучение форм нахождения золота в хвостах является актуальной задачей, как с точки зрения их повторной переработки, так и для оптимизации существующих технологий, применяемых на ЗИФ, с целью снижения потерь ценных компонентов.

Цель работы - изучение вещественного состава и форм нахождения золота в лежалых хвостах ЗИФ одного из предприятий Красноярского края.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В 2016 году на изучаемом хвостохранилище были отобраны керновые пробы (65 шт.), из которых были сформированы три (ТПХ-1, ТПХ-2, ТПХ-3) усредненные технологические пробы хвостов сульфидных, смешанных и окисленных руд соответственно. Минералогический и химический состав проб изучен с использованием рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и пробирного анализов. Содержание элементов в водных фазах определяли методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и атомно-абсорбционным анализом. Гранулометрический состав был определен ситовым методом. Выделение фракций (-0,020+0,010, -0,010+0 мм) выполнено седиментационным анализом.

Микроскопические исследования проводили методом сканирующей электронной микроскопии на приборе TM3000 (Hitachi, Япония) с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия). Термогравиметрические (ТГ) кривые и кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) снимали на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 C/4/G Jupiter с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aëolos в проточной атмосфере аргона (30мл/мин) со скоростью нагрева 10°/мин в платиновых тиглях. Регистрация изотерм адсорбции азота для исследуемых проб была выполнена с помощью анализатора ASAP-2420 (Micromeritics, USA) при 77К. Расчет удельной поверхности образцов проводился с использованием модели BET.

С целью установления взаимосвязи золота с различными минеральными формами проводили геохимический анализ на классе крупности -0,074 мм по методике [17]. Для определения водорастворимых и обменных форм пробу обрабатывают ацетатом аммония в кислой среде. На втором этапе, в жидкую фазу выделяют карбонатную и сульфатную составляющие обработкой раствором уксусной кислоты. На третьем этапе, переводят в раствор

золото, связанное с органической составляющей, с применением пирофосфата натрия в щелочных условиях. Для определения аморфных оксидов используют раствор гидросиламин гидрохлорида в соляной кислоте, а для кристаллических оксидов применяют раствор $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в уксусной кислоте. На заключительной стадии остаток растворяют в «царской водке» для определения остаточной концентрации благородных элементов.

Тесты по магнитной сепарации проводили на роликовом сепараторе (ЭВС – 10/5) при напряжении магнитного поля 9А и на высокоградиентном сепараторе (ВГС) где в качестве магнитного носителя применялась дробь крупностью 3мм и 5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Материал хвостов представлен преимущественно дисперсной пылеватой фракцией. Цвет варьирует от светло-серого (продукты переработки неокисленных руд) до светло-бурого (хвосты обогащения окисленных руд). В преобладающей массе дисперсного материала присутствуют обломки горных пород (сланцев), единичные зёрна кварца и граната, единичные вторичные сростки пылеватых и песчаных частиц, сцементированные гипсом (для хвостов переработки сульфидных руд) и гидроокислами железа (для хвостов окисленных руд). По результатам исследований установлено, что главные минералы кварц, мусковит, биотит, кальцит, хлорит, второстепенные – доломит, альбит, гипс. Основной породообразующий элемент – кварц, содержание которого варьирует от 58 до 81 % при переходе от пробы ТПХ-1 к ТПХ-3. В таблице 1 представлен химический состав технологических проб.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав технологических проб

Компонент, %	Na_2O	MgO	Al_2O_3	K_2O	CaO	MnO	SiO_2
ТПХ-1	0.76	2.04	9.99	2.49	10.46	0.24	58.28
ТПХ-2	0.54	1.86	8.38	2.14	10.14	0.24	61.79
ТПХ-3	0.15	0.69	6.58	1.51	2.11	0.31	80.45
Компонент, %	P_2O_5	Fe_2O_3	S	Sb	TiO_2	Au, г/т	Ag, г/т
ТПХ-1	0.14	5.35	0.64	0.11	0.46	0.64	0.18
ТПХ-2	0.13	4.58	0.56	0.15	0.38	0.72	0.23
ТПХ-3	0.09	4.52	0.1	0.27	0.31	0.36	0.35

Гранулометрический состав проб (таблица 2) характеризуется высоким содержанием шламовой фракции: доля класса -0.044 мм – 50-65%; класса -0.020 мм – 14-27%. Седиментационным анализом обнаружено, что выход класса -0.010 мм составляет менее 0.3%. Данный факт можно объяснить либо выносом тонкого класса при формировании осадка

хвостов в глубь хвостохранилища, либо на его агломерацию в процессе хранения хвостов. Высокое содержание известия в хвостохранилище вполне может приводить к цементации хвостов.

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрический состав технологических проб

Классы крупности, мм	ТПХ-1		ТПХ-2		ТПХ-3	
	γ, %	ε _{Au} , %	γ, %	ε _{Au} , %	γ, %	ε _{Au} , %
+0.140	2.59	5.99	1.88	3.95	0.82	0.34
-0.140+0.100	4.92	6.81	6.65	7.63	5.23	6.75
-0.100+0.074	12.39	13.00	9.89	7.73	13.67	10.26
-0.074+0.063	2.04	1.97	3.27	1.77	5.01	3.55
-0.063+0.044	27.56	19.08	13.59	6.85	24.89	5.19
-0.044+0.020	23.35	26.79	49.48	54.18	35.58	40.03
-0.020+0.010	26.88	26.06	15.16	17.65	14.74	33.77
-0.010+0	0.27	0.30	0.09	0.24	0.06	0.11
Итого	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Распределение золота по классам крупности неоднородно, особенно, для хвостов переработки окисленных руд, в которых песчаные фракции резко обеднены. Среднее содержание золота в классе -0.044 мм составляет в пробах сульфидных, смешанных и окисленных хвостов соответственно 0.61 г/т, 0.76 г/т, 0.44 г/т; а в классе $-0.100+0.044$ мм – 0.41 г/т, 0.41 г/т, 0.21 г/т. Золото концентрируется в тонких классах: извлечение его в класс -0.044 мм составляет 53%, 72%, 74% в пробах ТПХ-1, ТПХ-2, ТПХ-3 соответственно.

В ходе работы было обнаружено расхождение между содержанием золота в исходных пробах (прямой анализ) и содержанием, определенным по балансу классов крупности гранулометрического анализа, которое было ниже на 15-35%. Данный факт может указывать на наличие подвижных форм золота в хвостохранилище, когда при гранулометрическом расसेве с водой могут вымываться коллоидные и подвижные формы золота.

В результате изучения вещественного состава хвостов установлен ряд особенностей по формам нахождения золота. В большинстве случаев золото образует тонковкрапленные вроски в арсенопирите, замещаемом пирротинном. При замещении происходит концентрирование невидимого золота в отдельные части кристалла арсенопирита и формирование дисперсных его частиц. Присутствие повышенного содержания золота в хвостах неокисленных руд косвенно указывает на арсенопирит как основной носитель золота в хвостах.

Обнаружено достаточно высокое содержание золота в тонких фракциях, обогащенными гидроокислами железа, что может быть связано с сорбцией золота на активной поверхности

лимонита. Основной компонент лимонита – гётит способен осаждать на своей поверхности золото из раствора [15, 18]. В тонких классах обнаружено увеличение содержания железа, с возрастанием доли рентгеноаморфной составляющей, что связано с накоплением высокодисперсного лимонита, а также вторично образованные минералы сурьмы и мышьяка. Измерения текстурных характеристик подтвердили высокую удельную поверхность материалов хвостов (таблица 3), которая составила более 3.9 м²/г. Принимая форму частиц близкую к сферической и допущение, что частицы имеют одинаковый размер, был оценен диаметр частиц в хвостах, значения которого составили меньше мкм. Развитая удельная поверхность может быть обусловлена присутствием либо углеродсодержащих веществ с высокой пористостью, либо шламовых частиц менее 50 нм, которые могут давать такой значительный вклад в поверхность.

ТАБЛИЦА 3. Текстуальные характеристики технологических проб

Проба	Крупность, мм	S _{уд} , м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Размер пор, нм	Средний диаметр частиц (оценка), мкм
ТПХ-1	-0.010+0	22.1	0.08	14	0.12
ТПХ-1	-0.100+0	4.3	0.03	30	0.61
ТПХ-2	-0.100+0	4.5	0.03	28	0.58
ТПХ-3	-0.010+0	23.1	0.07	14	0.11
ТПХ-3	-0.100+0	3.9	0.03	12	0.67

Для выяснения присутствия высокопористых органических форм был проведен термический анализ проб в крупности –100+0 мкм и –10+0 мкм. Для технологических проб крупностью –100 мкм в атмосфере воздуха обнаружены эндотермические эффекты в интервале 100–110°С связанные с потерей воды, и при 574°С без потери массы, связанные с фазовым переходом альфа-бета кварц. На пробе ТПХ-3 в крупности -100+0 мкм в интервале 240–320°С обнаружен эндотермический пик (рис. 1а), сопровождающийся потерей массы -0.32%. Данный эффект может быть обусловлен дегидратацией гетита. В случае материала ТПХ-3 в крупности -10 мкм присутствует экзотермический эффект при 320°С (рис 1б), сопровождающийся потерей массы более 1%, что может быть обусловлено окислением органических форм. При этом масспектрометрическим анализом зафиксирован отлет углекислого газа. Обобщая полученные результаты по количеству оплетаемых при нагреве газов, а также с учетом низкого выхода фракции -10 мкм, можно заключить, что в исходных пробах хвостов наличие значимых количеств органических форм маловероятно. Таким образом, наиболее вероятная причина высокой удельной поверхности хвостов – это образование вторичных минералов железа и сурьмы в дисперсном состоянии.

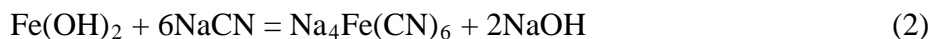
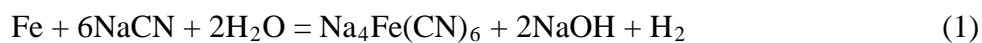
Подвижное золото и связи его с минералами хвостов изучались с помощью геохимического анализа методом последовательного растворения селективными растворителями. Результаты связи золота с различными формами приведены на рисунке 2. Золото в обменных и карбонатно-сульфатных формах, является хорошо мигрирующим элементом, который в зависимости от pH среды хвостохранилища может находиться в растворенном состоянии, либо осаждаться на различных минеральных формах. В относительно подвижных формах находится до 23% золота в хвостах сульфидных и смешанных руд, и до 10% в окисленных. Согласно геохимическому анализу, также обнаружен факт связи золота с кристаллическими оксидами железа, особенно, в пробе хвостов окисленных руд. Связи золота с аморфными оксидами железа, согласно геохимическому анализу, отсутствуют.

Для подтверждения связи золота с фазами железа проведены исследования методом магнитной сепарации. На рисунке 3 приведены данные по выходам магнитных и немагнитных продуктов и распределению в них золота. Полученные результаты подтверждают факт тесной связи золота с оксидами железа, особенно в пробе ТПХ-3. При токе 9А содержание золота в магнитном продукте составляет 1.41 г/т в то время как в исходном 0.36 г/т. Выход магнитной фракции для пробы ТПХ-3 составил 9,6% с извлечением золота 37,5%. Поэтому для хвостов переработки окисленных руд можно рекомендовать использование магнитных методов обогащения. Для хвостов переработки сульфидных руд (ТПХ-1) использование магнитных методов нецелесообразно – извлечения золота составило 22,8% при выходе магнитной фракции 14,8%.

Для выявления легкоподвижных и дисперсных форм золота, например, связанных с железосодержащими фазами, проведена серия экспериментов по обработке исходных проб хвостов слабощелочным раствором. При контакте пробы хвостов переработки сульфидных руд (ТПХ-1) в течение 24 часов при 25°C с 0.1 М раствором гидроксида натрия происходит выщелачивание в раствор некоторых элементов: мышьяка (73 ± 15 мг/л), кальция (190 ± 30 мг/л), железа (22 ± 5 мг/л), калия (150 ± 25 мг/л), меди (0.5 ± 0.1 мг/л), золота (0.09 ± 0.03 мг/л). Переход указанного количества золота соответствует 15%, что согласуется с ранее указанным несоответствием содержания золота при прямом анализе и при гранулометрическом расसेве. Раствор, отделенный от твердой фазы фильтрованием под вакуумом (размер пор фильтра 3-5 мкм), имеет слегка желтоватую окраску и pH 12. В твердой фазе, согласно пробирному анализу, содержание золота снизилось с 0,64 до 0,56 г/т.

Согласно литературным данным, растворимость $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в воде составляет 0.5 мг/л и 0.0002 мг/л соответственно [19]. Следовательно, железо присутствует в растворе не в

виде гидроксида, а в виде комплексного иона, предположительно гексацианоферрата $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$. Образование данного иона может быть записано схематично следующими реакциями:



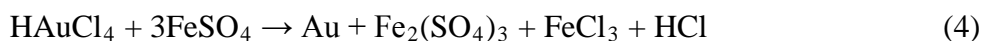
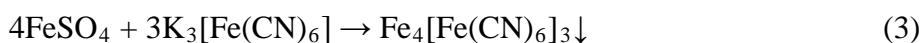
Образование и переход данного комплексного иона в раствор при подщелачивании проб хвостов вполне вероятен, ввиду наличия остаточных количеств циан-иона в хвостохранилище, вследствие использования в схеме обогащения гидрометаллургических операций (цианирование и сорбция на ионообменную смогу или уголь). При этом цианиды могут сорбироваться на фазах, обладающих развитой удельной поверхностью, таких как гидраты окиси железа (гётит, лимонит), коллоидных веществах, вторичных илах и впоследствии участвовать в процессах растворения тонкого золота в хвостохранилище.

При добавлении серной кислоты (до pH 1.3) раствор приобретает сине-зеленую окраску и постепенно образуется осадок синего цвета, вероятно, берлинская лазурь, а также выпадает белый осадок гипса (рис. 4). После образования осадка ионов золота в растворе методом масспектрометрии с индуктивно связанной плазмой не обнаружено, а концентрация железа составляет 2 мг/л. Вероятно, золото из раствора восстанавливается, например ионами Fe^{2+} [14, 15]. Рентгеноспектральным микроанализом обнаружены частицы золота микрометровых размеров на гипсе (рис. 4) и гексацианоферратах железа (рис. 5).

Для проб хвостов переработки окисленных руд (ТПХ-3) образование аналогичных осадков гексацианоферратов железа практически не наблюдается, что может быть связано с более низкой концентрацией циан-иона и другим химическим составом материала в нижних слоях хвостохранилища, например, с течением времени железо присутствует только в окисленной малорастворимой трехвалентной оксидной форме. Действительно, в растворе после выщелачивания концентрация железа составляет менее 1.6 мг/л. В то же время обнаружен переход в раствор золота (0.23 ± 0.08 мг/л), а так же кальция (57 ± 15 мг/л), мышьяка (175 ± 30 мг/л), сурьмы (15 ± 5 мг/л) и вольфрама (38 ± 10 мг/л). Данная концентрация соответствует переходу в раствор 38% золота. Что удовлетворительно согласуется с содержанием золота в твердой фазе (0.24 г/т), определенное пробирным анализом. Можно предположить, что в этом случае в раствор переходит золото двух типов, связанное (сорбированное) с вторичными дисперсными фазами, содержащими мышьяк и сурьму и коллоидное свободное золото. После нейтрализации до (pH 1.3) серной кислотой происходит образование незначительных количеств осадка гипса. Однако, обнаружить на осадке частицы золота не удалось. И

действительно осаждения золота не происходит, концентрация золота, сурьмы и мышьяка в растворе практически не изменилась. Данный факт косвенно подтверждает механизм осаждения золота соединениями железа.

С целью установления морфологических особенностей формирования металлических частиц золота были проведены эксперименты по восстановлению золота (III) железом (II), моделирующие образование осадка берлинской лазури. Для этого в водный раствор красной кровяной соли добавляли раствор HAuCl_4 и вносили концентрированный раствор сульфата железа (II). Данный процесс схематично можно описать следующими уравнениями:



При приведении в контакт указанных реагентов происходит образование осадка темно-синих кристаллов нерастворимых в воде. На рисунке 5 приведены результаты электронно-микроскопических исследований высушенного осадка. Обнаружены многочисленные дисперсные частицы золота с размерами от 0,1 до 1 мкм. Аналогичные процессы вполне могут протекать в условиях хвостохранилища при изменении химического состава и кислотности среды.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате исследования золотосодержащих хвостов переработки сульфидных и окисленных руд установлено, что для хвостов характерна высокая удельная поверхность, которая составляет 3.9–4.3 м²/г для хвостов в исходной крупности, которая обусловлена присутствием дисперсных вторичных минералов железа, сурьмы и мышьяка. Более половины золота приходится на шламовые фракции (–0.044 мм), что может быть связано с его осаждением на дисперсных вторичных минералах. Геохимическими исследованиями технологических проб установлено, что до 30 % золота в хвостах связано с обменными и карбонатно-сульфатными формами, для которых характерна подвижность в обводненных условиях хвостохранилища. Методом магнитной сепарации в пробе хвостов переработки окисленных руд обнаружен факт связи золота с железосодержащими фазами, что позволяет рассмотреть возможности применения магнитных для его извлечения. Показано, что подвижность золота в хвостах переработки сульфидных руд может быть обусловлена высоким содержанием в них циан иона, в том числе сорбированного на фазах с высокой удельной

поверхностью. Предложен механизм осаждения золота в присутствии соединений железа (II), который проявляется в пробах хвостов переработки сульфидных руд. В хвостах переработки окисленных руд обнаружено более 30% подвижного золота, коллоидного и связанного с высокодисперсными вторичными минералами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. **Чантурия В. А., Козлов А. П., Матвеева Т. Н., Лавриненко А. А.** Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного, труднообогатимого и техногенного минерального сырья // ФТПРПИ.– 2012.– №5.– С. 144-156. (**Chanturia V.A., Kozlov A.P., Matveeva T.N., Lavrinenko A.A.** Innovative technologies and extraction of commercial components from unconventional and difficult-to-process minerals and mining-and-processing waste, Journal of Mining Science, 2012, Vol. 48, Issue 5.– P. 904-913.)
2. **Комогорцев Б.В., Вареничев А.А., Потапов И.И.** Технологии и методы ресурсосбережения минерально-сырьевая база золота России // Экономика природопользования.–2015.– №3. – С. 89-112.
3. **Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Провалов С. А.** Адаптивные методы доизвлечения золота из хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик //Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №. 9.– С. 21-27.
4. **Гурин К.К., Башлыкова Т.В., Ананьев П.П., Бобоев И.Р., Горбунов Е.П.** Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики от переработки упорных руд смешанного типа //Цветные металлы.– 2013.– № 5.– С. 41-45.
5. **Алгебраистова Н. К., Макшанин А. В., Бурдакова Е. А., Маркова А. С.** Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики с использованием процесса агломерационной флокуляции // Горный информационно-аналитический бюллетень.– 2013. – №12. – С. 56-61.
6. **Брагина В. И., Коннова Н.И.** Извлечение ценных минералов из хвостов обогащения //Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №. 12.– С. 165–167.
7. **Кондратьев С. А., Бурдакова Е. А.** Роль физической формы сорбции во флотационном процессе //ФТПРПИ. – 2017. – №. 4. – С. 135-144. (**Kondrat'ev S. A., Burdakova E. A.** Physical Adsorption Validity in Flotation, Journal of Mining Science, 2018, Vol. 53, Issue 4. – P. 734-742.)

8. **Брагин В.И., Бурдакова Е.А., Кондратьева А.А., Плотникова А.А., Бакшеева И.И.** Исследование на обогатимость флотационным методом лежалых золотосодержащих хвостов // ФТПРПИ. – 2018.– №4.– С.152-160.
9. **Койжанова А. К., Арыстанова Г. А., Седельникова Г. В., Есимова Д. М.** Исследование биогидрометаллургической технологии извлечения золота из хвостов сорбции золотоизвлекательной фабрики // Цветные металлы.– 2016.– №9.– С. 52-57.
10. **Меретуков М. А., Гурин К.К.** Поведение золота в хвостовых отвалах //Цветные металлы. – 2011. – №. 7. – С. 27-31.
11. **Hough R. M., Noble R. R. P., Reich M.** Natural gold nanoparticles, *Ore Geology Reviews*, 2011, Vol. 42, Issue 1. – P. 55-61.
12. **Михайлов А. Г., Харитоновна М. Ю., Вашлаев И. И., Свиридова М. Л.** Исследование подвижности водорастворимых форм цветных и благородных металлов в массиве лежалых хвостов обогащения.// ФТПРПИ.– 2013.– №3.– С. 188-196. (**Mikhailov A.G., Kharitonova M.Y., Vashlaev I.I., Sviridova M.L.** Mobility of water-soluble nonferrous and precious metals in aged mineral processing waste, *Journal of Mining Science*, 2013, Vol. 49, Issue 3.–P. 514-520.)
13. **Myagkaya I. N., Lazareva E. V., Gustaytis M. A., Zhmodik S. M.** Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: migration in water flow, *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, Vol. 160.– P. 16-30.
14. **Daniel M. C., Astruc, D.** Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology, *Chemical reviews*, 2004, Vol. 104, Issue 1.– P. 293-346.
15. **Greffié C., Benedetti M. F., Parron C., Amouric M.** Gold and iron oxide associations under supergene conditions: An experimental approach, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, Vol. 60, Issue 9. – P. 1531-1542.
16. **Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J. E., Parsons J. M., Southam G.** Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments, *Chemical Geology*, 2017, Vol. 450. – P. 154-164.
17. **Piatak N. M., Parsons M. B., Seal II R. R.** Characteristics and environmental aspects of slag: a review, *Applied Geochemistry*, 2015, Vol. 57. – P. 236-266.
18. **Berrodier I., Farges F., Benedetti M., Winterer M., Brown Jr, G. E., Deveughèle M.** Adsorption mechanisms of trivalent gold on iron-and aluminum-(oxy) hydroxides. Part 1: X-ray absorption and Raman scattering spectroscopic studies of Au (III) adsorbed on ferrihydrite, goethite, and boehmite, *Geochimica et cosmochimica acta*, 2004, Vol. 68.– P. 3019-3042.

19. Справочник химика Т. 1/ Ред. кол.: Никольский Б.П. и др.. – М.-Л.: Химия, 1966.
–1072 с.

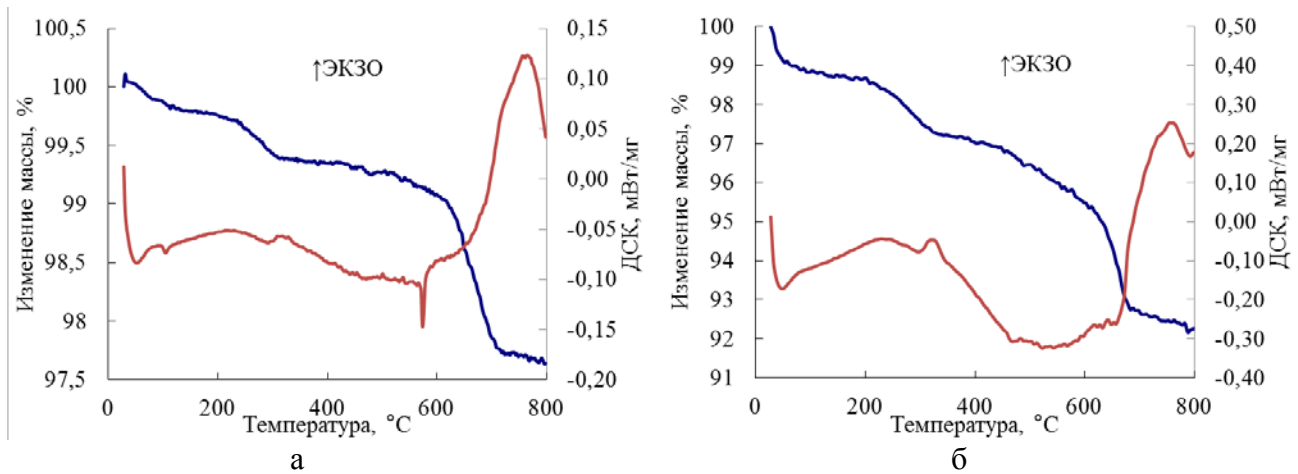


Рис.1

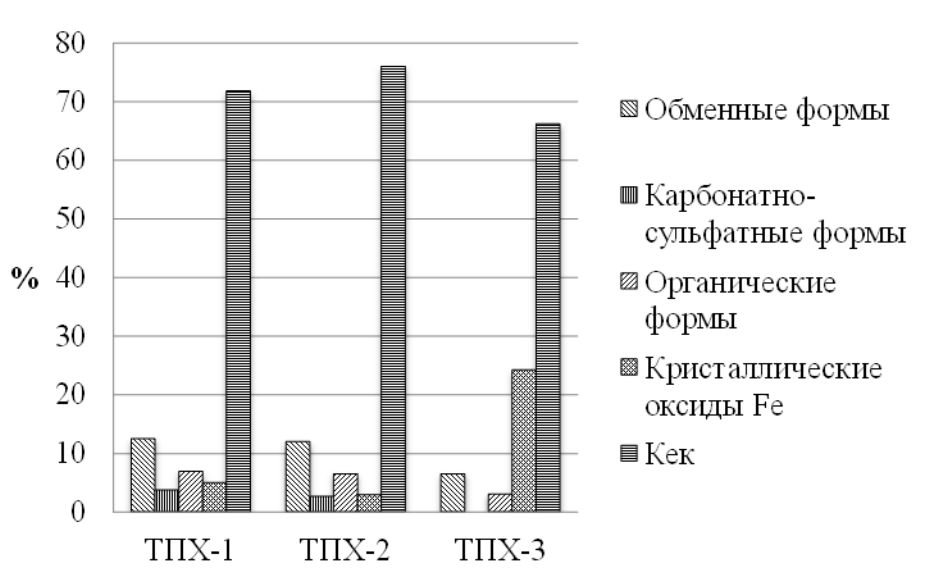


Рис.2

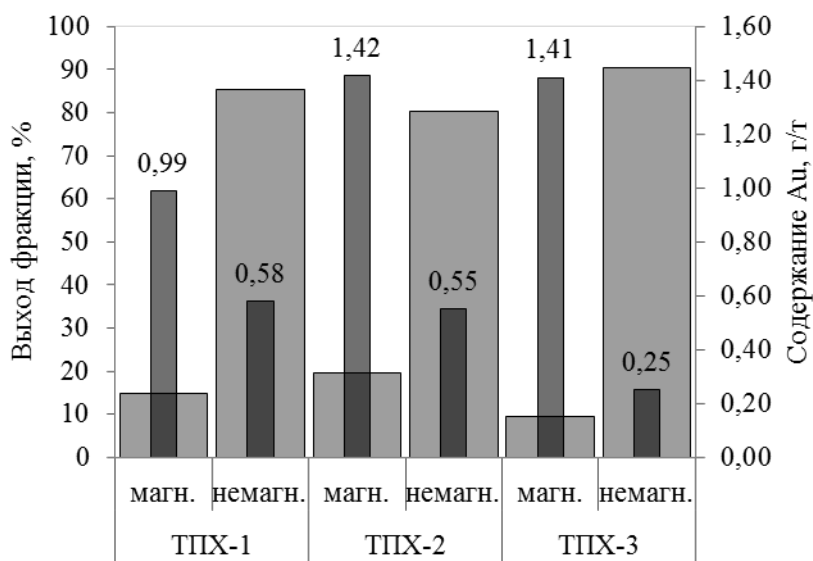


Рис.3

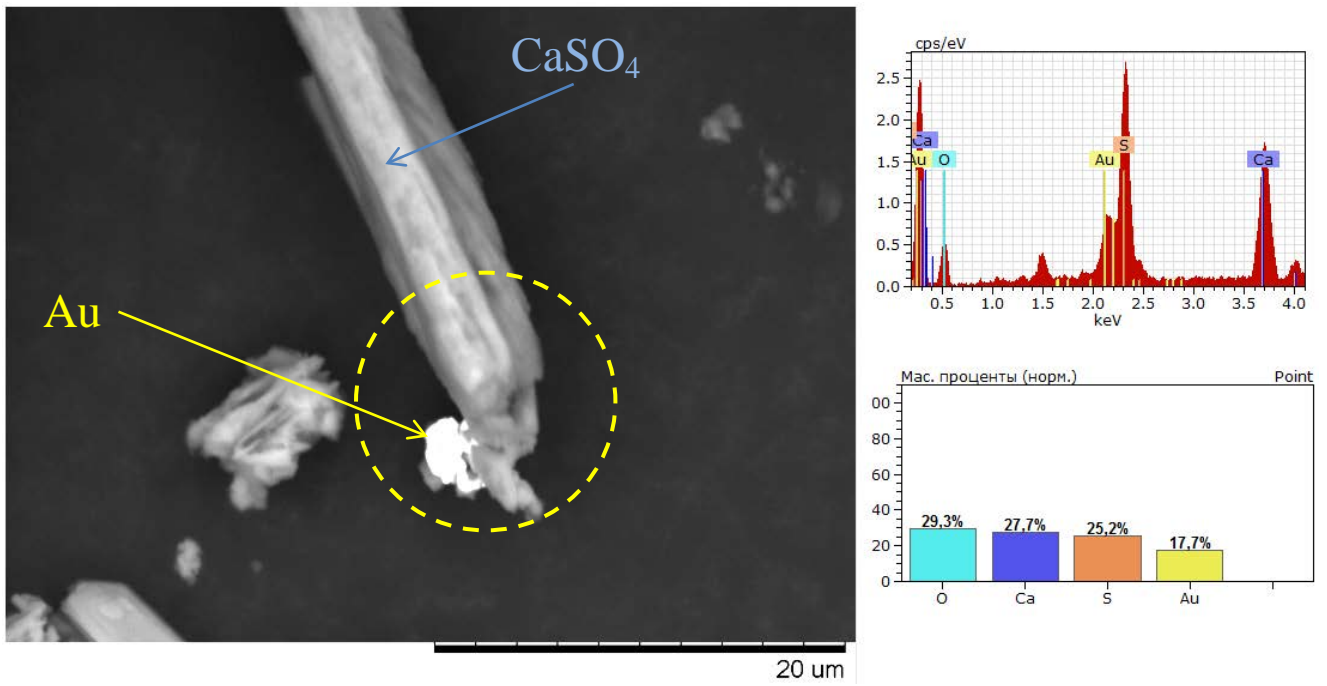


Рис.4

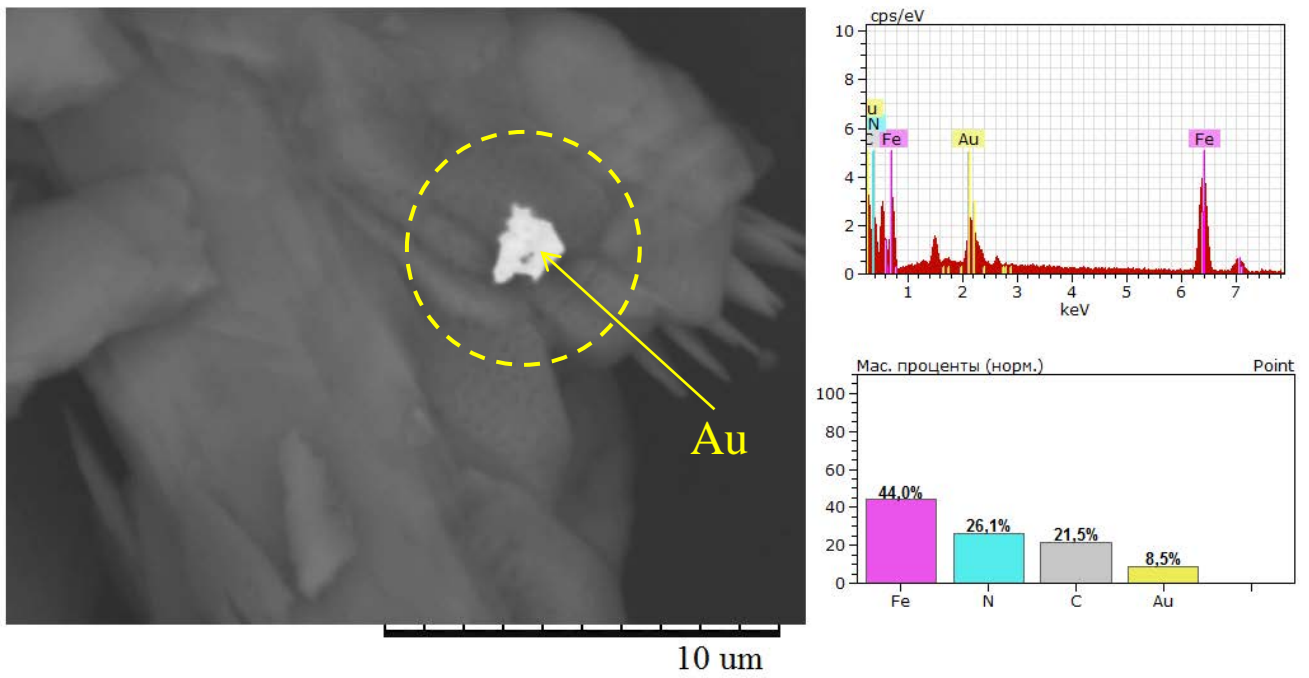


Рис.5

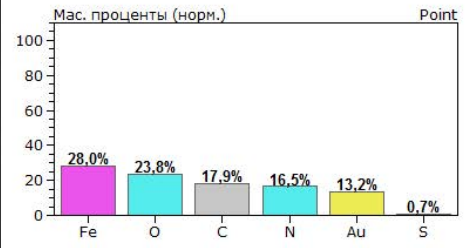
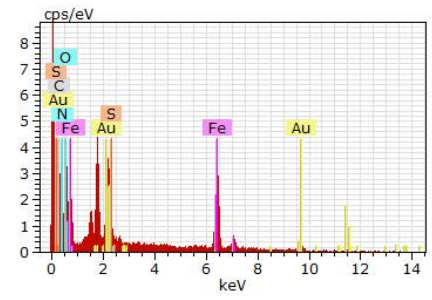
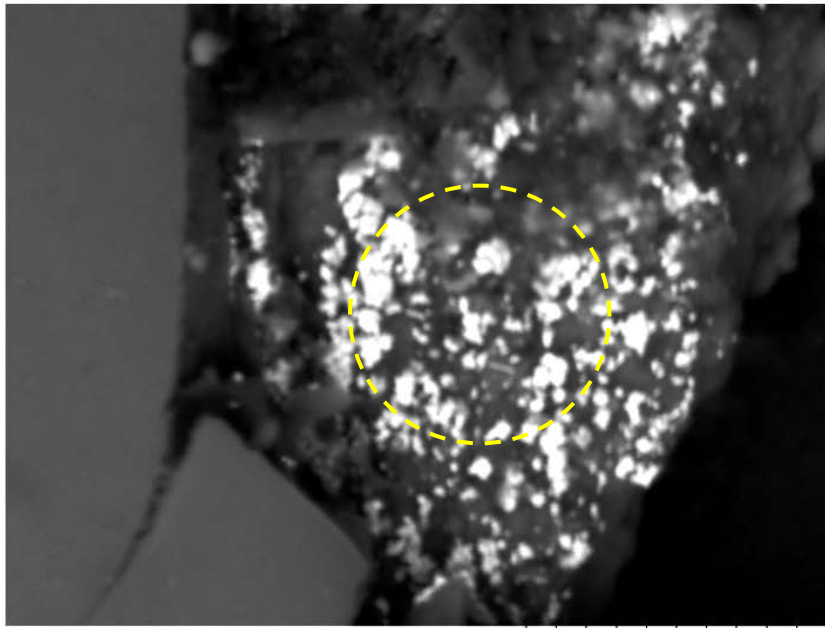


рис.6

Подписи к рисункам:

Рис. 1. ДСК-ТГ-кривые нагрева пробы ТПХ-3 разной крупности на воздухе: а– -100мкм, б– -10мкм.

Рис. 2. Распределение золота по формам нахождения

Рис. 3. Распределение золота по продуктам магнитной сепарации

Рис. 4. СЭМ-изображение частицы золота на гипсе в осадке, сформировавшемся после обработки пробы ТПХ-1 щелочным и кислым раствором и результаты рентгеноспектрального анализа с выделенной области

Рис. 5. СЭМ-изображение осадка гексацианоферрата железа с частицей золота и результаты рентгеноспектрального анализа с выделенной области

Рис. 6. СЭМ-изображение частиц золота (светлые частицы), образующихся на осадке, представляющем смесь сульфата железа и гексацианоферратов (темный), и результаты рентгеноспектрального анализа с выделенной области.