

Исследования обогатимости золотосодержащей руды

В работе приведены результаты исследований по обогащению и повышению извлечения золота в цикле флотации руды Васильковского месторождения.

Изучен вещественный состав исходной руды. По результатам минералогического рентгенофлуоресцентного, химического пробирного, атомно-абсорбционного, рентгенофазового, рационального анализов, золото обнаружено свободное, тонкодисперсное, связанное с сульфидами в халькопирите, пирите и арсенопирите, а также в тонковкрапленном состоянии в силикатных минералах. Установлено, что технологический тип исследуемой руды – золотокварцевый, золотосульфидный со свободным и цианируемым золотом.

Представлены результаты оптимизации реагентного режима флотации руды и класса крупности измельчения. В качестве собирателя использовали бутиловый ксантогенат, в качестве вспенивателя применяли С7, аэрофлот; сульфидизатор – сульфид натрия (Na_2S), так же дополнительно применён режим диспергации. Выяснено, что для повышения эффективности флотационного обогащения целесообразно увеличение показателя pH исходной пульпы до pH 9,0. Извлечения в концентрат золота – 82,49 %. Данным экспериментом и минералогическим анализом хвостов флотации были установлены оптимальная крупность флотируемого сырья, класс крупности -0,1+0,071 и -0,071 мм и нецелесообразность дополнительного измельчения из-за увеличения доли свободного золота, не переходящего в концентрат при последующей флотации. Минеральный анализ продуктов флотации показал, что основной сульфидный минерал концентратов – арсенопирит; обнаружены также пирит и халькопирит. В хвостах флотации содержится рудовмещающая жильная пустая порода; золото, обнаруженное в пробах хвостов флотации, имеет круглую и овальную форму, не эффективную для флотации.

Ключевые слова: флотация, сульфиды, тонковкрапленное золото, диспергация.

ТОКТАР ГУЛЬМИРА, PhD, научный сотрудник¹, Gulmiratoktar0@gmail.com

КАУМЕТОВА ДИНАРА СУЮНДИКОВНА, лектор кафедры «Горное дело, строительство и экология»², kaumetovadinara@mail.ru

КОЙЖАНОВА АЙГУЛЬ КАЙРГЕЛЬДЫЕВНА, кандидат технических наук, заведующий лабораторией спецметодов гидрометаллургии¹, a.koizhanova@satbayev.university, aigul_koizhan@mail.ru

МАГОМЕДОВ ДАВИД РАСИМОВИЧ, магистр, младший научный сотрудник¹, d.magomedov@stud.satbayev.university

АТАНОВА ОЛЬГА ВЯЧЕСЛАВОВНА, кандидат технических наук¹

АБДЫЛДАЕВ НУРГАЛИ НУРЛАНОВИЧ, бакалавр, ведущий инженер¹, nur.ab.kz@mail.ru; n.abdyldaev@satbayev.university

¹ Казахский национальный технический университет имени Сатбаева, АО «Институт металлургии и обогащения», г. Алматы, Казахстан

² Некоммерческое акционерное общество «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», г. Кокшетау, Казахстан.

Study of gold-bearing ore bonification ability

ТОКТАР G.¹, КАУМЕТОВА D. S.², КОИЖАНОВА A. K.¹, МАГОМЕДОВ D. R.¹, АТАНОВА O. V.¹, АБДЫЛДАЕВ N. N.¹

¹ Satbayev University, The Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

² Non-commercial joint stock company Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan.

The paper presents the study results on the gold bonification and increase of gold extraction in the flotation cycle of ore from the Vasilkovsky deposit.

The composition of the initial ores was studied. Based on mineralogical, XRF, chemical assay, atomic absorption, X-ray phase and rational analyses the following types of gold were identified: fine gold; gold associated with sulfides in chalcopyrite, pyrite and arsenopyrite; and fine-disseminated gold in silicates. It was established that the ore belongs to the gold-quartz and gold-sulfide types with free and cyanided gold.

Our results allow us to optimize the ore flotation reagent mode and the crushing size class. Butyl xanthate was used as a collector; C7, aeroflot, was used as a foaming agent; sodium sulfide (Na_2S) was used as a sulfidizer; dispersion mode was additionally applied. It was established that an increased pH value of the initial pulp up to 9,0 is required to boost the efficiency of flotation beneficiation. The gold extraction in the concentrate is 82,49 %. This experiment and mineralogical analysis of flotation tailings has established the optimal fineness of the fractions for flotation (0,1 +- 0,071 mm) as well as the inexpediency of additional milling, due to the fine free and quartz-embedded gold that does not pass into the concentrate during the subsequent flotation. The mineral analysis of the flotation products showed that the main sulfide mineral of the concentrates is arsenopyrite; pyrite and chalcopyrite. Flotation tailings contain host vein rock. Gold found in flotation tailings samples has round and oval shape, which is inefficient for flotation.

Key words: Flotation, sulfides, fine-disseminated gold, dispersion.

Введение. Для полноты комплексного использования сырья при разработке технологии извлечения целевого металла необходима информация о минеральном составе исходного сырья с диагностикой всех минеральных фаз, в том числе формы нахождения в исследуемом продукте полезного компонента (собственная минеральная фаза, изоморфное срастание в структуру минерала), количественной оценкой их содержания. Флотация золотосодержащих руд имеет ряд трудностей, связанных, в частности, с высокой плотностью самородного или свободного золота и его низкой концентрацией в руде, тонковкрапленной формой образования в сульфидах и кварцевой породе. Разработка эффективной технологии по повышению извлечения золота в цикле флотационного обогащения увеличивает рентабельность производства, комплексность использования сырья и способствует вовлечению в эксплуатацию месторождений золотых сульфидных, тонковкрапленных, бедных и комплексных руд.

Несмотря на значительные исследования по повышению эффективности извлечения золота, флотационное извлечение тонкодисперсного золота, ассоциированного с сульфидами и кварцем, не превышает 60–80%, а в ряде случаев 30–40%. Таким образом, исследования по повышению извлечения благородных металлов из минерального сырья являются *актуальными задачами*.

Среди важных технологических и эксплуатационных параметров флотационного цикла подготовки руды можно выделить: минералогию руды, крупность исходного материала, конструкционные ре-

шения машин флотации, режим скорости подачи исходного материала, плотность и температуру пульпы [1, 11–13].

Экспериментальные методы и результаты. Объектом исследований являлась золотосодержащая руда Васильковского месторождения ЗИФ АО «Altyntau Kokshetau» стадии крупного, среднего и тонкого дробления. Технологическая проба характеризуется золотосульфидно-кварцевой формацией вкрапленного типа. Рудная минерализация – пирит.

Для исследования проводилась стандартная пробоподготовка образцов, а именно: исходная проба руды была подвергнута дроблению, измельчению и усреднению (рис. 1). Форма нахождения золота в анализируемой пробе зависит от крупности помола и исходного класса крупности руды. Данная методика отбора позволяет определять содержание золота во всех продуктах по нескольким параллельным пробам, что повышает достоверность результатов. Фазовый анализ проводили последовательно в трёх фазах.

Для определения химического, фазового, минералогического составов руды использовались следующие методы анализов: атомно-абсорбционный и пробирно-гравиметрический. Анализы выполнялись на приборах: атомно-абсорбционный спектрометр «Varian» AA240 индуктивно-связанной плазмой «Varian Optica ISpectroscopy Instruments», рентгеновский дифрактометр Advance D8 «Bruker», рентгенофлуоресцентный волнодисперсионный спектрометр Venus 200 Axios PANalytical B. V., электронный растровый микроскоп с анализатором JEOL JXA-8230, оптический микроскоп Axio Scope.A1.



Рис. 1. Руда Васильковского ГОК в процессе рудоподготовки:

А – исходная руда; Б – после первого дробления на щековой дробилке; В – после второго дробления на щековой дробилке; Г – после измельчения на валковой дробилке до класса -2,5 мм

Для проведения исследований отобраны частные пробы из дроблённой и измельчённой на вибрационном истирателе ИВ 1 до крупности 98 % класса -0,071 мм руды.

Химический анализ показал следующие содержания основных компонентов: золото – 2,17 г/т, железо – 3,4%, мышьяк – 0,9%, сера – 0,696%. При этом, согласно данным паспорта пробы руды, содержание золота составляет 2,1 г/т, серы – 0,67%, железа – 2,52%. Содержание железа варьировалось в пределах 2,52–3,4%.

Далее изучен элементный и фазовый состав с помощью рентгенофлуоресцентного и рентгенофазового методов анализа. Результаты приведены в таблицах 1, 2.

Изучение вещественного состава руды осуществлялось методами минералогического анализа с применением оптической микроскопии и рентгенографии. Расшифровка проб и поиск фаз выполнялись по программе Search-match с использованием базы порошковых дифрактометрических данных PDF-2. Для минералогического исследования был изготовлен аншлиф из руды. Образец руды непрозрачен, и исследование проводилось на оптическом микроскопе в отражённом свете. Для нахождения форм золота был выполнен рациональный анализ исходной пробы руды крупностью -2,0 мм, пробы крупности 98 % класса -0,071 мм руды и измельченной руды крупностью класса -0,05 мм и +0,05 мм.

Исследования по флотации выполнены на лабораторных флотомашинах, в открытом цикле. Флотацию проводили для руды крупности 90 % класса -0,071 мм, и так же исследовалась руда, доизмельчённая в шаровой мельнице до класса +0,05 мм и -0,05 мм. Пульпа каждого класса крупности в последующем подвергалась флотационному обогащению при реагентном режиме 120 г/т ксантогената натрия, 60 г/т вспенивателя. Исследуемую руду распульповывают водой в режиме в соотношении Т:Ж = 1:3 (плотность пульпы 33%), доводят до необходимого значения pH, добавляя щёлочь NaOH. Во флотомашине, лабораторной с флотационной камерой, происходит стабильная генерация мелких пузырьков и интенсивное перемешивание воздуха с пульпой. Дисперсная подача воздуха осуществляется через керамические диспергаторы, встроенные по бокам флотокамеры. Это обеспечивает быструю и эффективную флотацию. Во время активации добавляются реагенты и снимается пенная фракция. Флотацию проводили в два цикла – основной и контрольный – в течении 10 и 7 минут соответственно. Концентраты объединяли для исследования, так же был проведён опыт с доочисткой концентрата, с ксантогинатом натрия и С7 при pH 9. Продукты флотации, концентрат и хвосты анализировали на вещественный и химический состав.

1. Результаты рентгено-флуоресцентного анализа пробы руды

Элемент	Содержание, %
O	47,51
Na	1,192
Mg	1,394
Al	6,334
Si	23,871
P	0,061
S	0,236
Cl	0,015
K	1,608
Ca	2,552
Ti	0,261
Mn	0,033
Fe	2,62
Cu	0,02
Zn	0,01
Ga	0,002
As	0,783
Rb	0,013
Sr	0,015
Zr	0,007

2. Результаты рентгенофазового анализа руды

Компонент	Формула
Кварц	SiO ₂
Альбит (кальциевый)	(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈
Микроклин	K _{0,92} Na _{0,08} Al _{0,99} Si _{3,01} O ₈
Мусковит-2МI	KAl ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Эденит	NaCa ₂ Mg ₃ AlSi ₇ O ₂₂ (OH) ₂
Клинохлор-1МIв	(Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈
Пирит	FeS ₂
Арсенорипит	FeAsS
Ильменит	FeO·TiO ₂
Магнетит	FeO·Fe ₂ O ₃

Обсуждение результатов. Вещественный состав сырья определяет методы и технологию получения целевого металла. Исследование элементного состава и минералов, непосредственных носителей золота, количество и равномерность их распределения указывает на возможность применения определённых методов обогащения.

Выполнение данной работы включало:

- определение основных причин потерь в процессе коллективной флотации ценного компонента – золота;
- проведение исследований по повышению извлечения золота в цикле флотации.

Качество руд определяется их минералогическим и химическим составом, физико-химическими свойствами, текстурно-структурными особенностями руд и размерами минеральных агрегатов. Химический и минералогический анализы позволяют получить полное представление о вещественном составе руд, наличии в их составе ценных и вредных компонентов. В пробе руды, по результатам рентгено-флуоресцентного анализа, преимущественно содержатся (в %): кислород – 47,51, кремний – 23,871, железо – 2,62, сера – 0,670 и мышьяк – 0,783 (см. табл. 1). Можно предположить, что руда преимущественно состоит из кварца, оксидов железа и сульфидных соединений, что подтверждается фазовым и минералогическим анализами, и относится к технологическому типу золотокварцевый, золотосульфидный со свободным и цианируемым золотом. Наличие тонковкрапленного золота в сульфидах является одной из основных причин технологической упорности минерального сырья. В то же время тонковкрапленное золото обнаружено в кварце, слоистых алюмосиликатах и органическом веществе, в которых оно распределено неравномерно.

По итогам фазового анализа золота, в руде присутствует в основном в свободном виде. Результаты ситового анализа показали максимальное содержание ценного компонента в классе крупности $-0,1+0,071$ мм и $-0,071$ мм – 2,7 и 2,8 г/т соответственно.

Упорные руды, содержащие тесные ассоциаты золота с кварцем, сульфидами, при наличии в рудах теллуридов, пирротинов, цианируются неэффективно, с повышенным расходом цианида. Также ржавое золото, золото, покрытое плёнками железистых соединений, гидратированных оксидов железа, не переходит в раствор при прямом цианировании. Флотационный метод обогащения позволяет оптимизировать процесс извлечения золота методом цианирования [2, 6, 10, 18].

В соответствии с результатами рентгенофазового анализа подтверждено, что руда состоит преимущественно из кварца, который определяется как пустая порода, и силикатных минералов, таких как

альбит, микроклин, мусковит, эденит и клинохлор (см. табл. 2).

Для определения форм золота в рудах, характера его взаимосвязи с рудными компонентами и оценки высвобождаемости в процессе измельчения был выполнен фазовый (рациональный) анализ пробы руды. Важным фактором, определяющим эффективность флотационного обогащения, являются крупность исходного материала и степень раскрытия сростков; оптимальная степень измельчения руды при флотационном обогащении определяется опытным путём на основании лабораторных исследований. Сульфидные руды отличаются чрезвычайно тонким вкраплением и взаимопроращением минералов, что не исключает образование сростков после тонкого их измельчения. Верхний предел крупности частиц при измельчении руды определяется прочностью прилипания к воздушным пузырькам. Нижний предел крупности измельчения определяется характером сростания минералов друг с другом. Степень раскрытия сростков возрастает с увеличением степени измельчения руды. Золото было обнаружено в свободном виде и в виде мелких зёрен в сульфидах (халькопирит, пирит), а также в тонковкрапленном состоянии в силикатных минералах. Результаты которого приведены в таблице 3. По результатам анализа следует, что в пробе исходной руды крупности класса 2,0 мм количество свободного золота – 40,09%, в том числе золота с чистой поверхностью – 18,43%, покрытого плёнками золота – 21,66%, золота в сростках с сульфидами – 15,21%. В пробе руды класса крупности $-0,071$ мм количество свободного золота увеличилось незначительно – с 19,35 до 41,01% и покрытого плёнками – до 20,66%; так же показано некоторое увеличение доли золота в сростках с сульфидами – до 17,51%, что может быть объяснено проращением минералов и высвобождением при измельчении сульфидных минералов. При дальнейшем измельчении руды до класса крупности 0,05 мм и $+0,05$ мм доля свободного золота значительно увеличилась, до процентного соотношения свободного золота к золоту в сростках, равного 78,8 к 21,2%; золото в сростках с сульфидами не обнаружено. По данным исследования можно сделать вывод, что дополнительное измельчение до крупности 0,05 мм и $+0,05$ мм неблагоприятно для обогащения сырья флотацией.

Минералы-носители золота в золотосодержащих рудах обычно имеют весьма неравномерную вкрапленность – от 1000 долей микрометра до десятков микрометров. Составляющим критерия упорности является также наличие мышьяка и сульфидных минералов в золотосодержащих рудах. Поэтому сложные фазовый и минеральный составы золотосодержащих руд определяют необходимость минералогического исследования.

3. Формы нахождения золота и характер его связи с рудными компонентами

Формы нахождения золота и характер его связи с рудными компонентами	Исходная проба крупностью класса -2,0 мм		Проба измельчения 98 % класса -0,071 мм		Проба измельченная крупностью класса -0,05 мм и +0,05 мм	
	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
Золото свободное с чистой поверхностью	0,40	18,43	0,42	19,35	1,25	60,6
Золото свободное покрыто плёнками	0,47	21,66	0,47	20,66	0,42	18,2
Золото в сульфидах	0,33	15,21	0,38	17,51	–	–
Золото в сростках (цианируемое)	0,20	9,22	0,24	7,87	0,31	12,1
Золото в нерастворимых в царской водке минералах и кварце	0,77	35,48	0,73	33,64	0,19	9,1
Всего	2,17	100,0	2,17	100	2,17	100

Минералогический анализ показал, что основным ценным компонентом в руде является золото. Общая масса сульфидов не превышает 5%, сульфидные минералы находятся в мелких, тонких и тонкодисперсных зёрнах и рассеяны по массе пород. Золото ассоциирует с кварцем и сульфидами. Сульфиды представлены халькопиритом, пиритом, арсенопиритом (рис. 2).

Значительная масса свободного золота является тонкодисперсной (0,5–10,0 мкм). Форма золотинок неправильная, компактная, комковатая, изометрично-пластинчатая. Поверхность большей части золота покрыта охрами, плёнками и корочками гидроксидов железа, сульфидов, карбонатов и силикатов (рис. 3).

Сульфидные минералы, присутствующие в сырье, – арсенопирит As_2S_3 , пирит FeS_2 ,

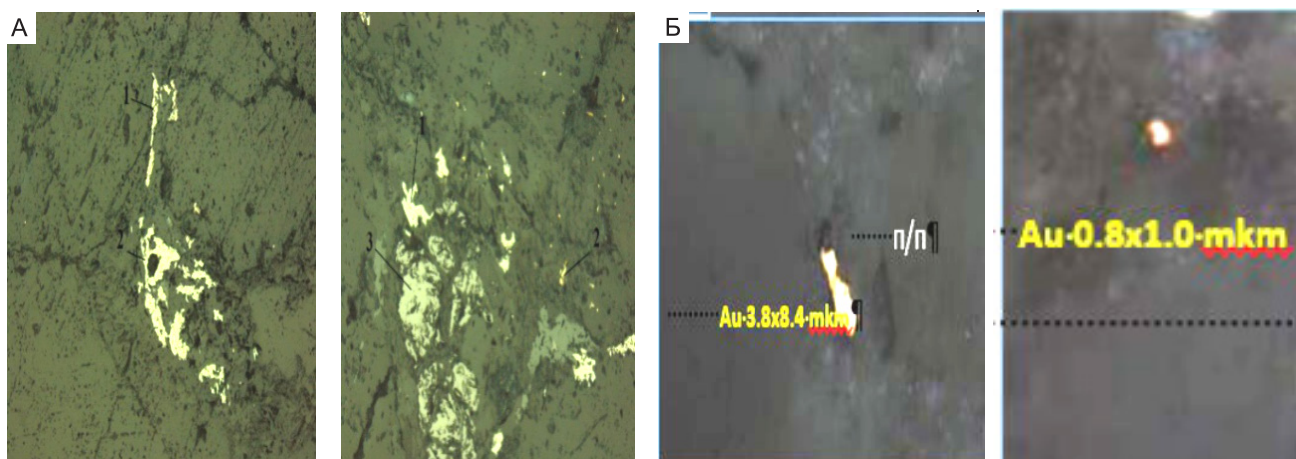


Рис. 2. Результаты минералогического анализа исходной руды:

А – зёрна халькопирита и пирита в сростке с нерудной массой; Б – золото в сростках с кварцем, сульфидами



Рис. 3. Свободное золото с чистой поверхностью и золото, покрытое плёнками в руде

халькопирит Cp ($CuFeS_2$), пирротин $Pirr$ (Fe_1xS) – находятся в мелких, тонких и тонкодисперсных зёрнах (рис. 4).

Из окисленных железных минералов выявлены (в г/т): магнетит Mgt (Fe_3O_4), гётит ($HFeO_2$), гидрогётит ($HFeO_2 \cdot ag$); гематит (αFe_2O_3) (см. рис. 4).

Из литературных источников известно, что флотация свободного золота эффективна для золотин неправильной формы. Оксиды железа как пенообразователи способствуют процессу флотации. Наличие сульфидов и оксидов железа предполагает возможность применения флотационного метода обогащения с учётом применения сульфатизатора [2].

Процесс флотации осуществляется в перемешиваемой водной минеральной суспензии (флотационной пульпе), в которую тем или иным способом вводят пузырьки воздуха. Успех флотации зависит от того, насколько отличаются по смачиваемости минералы, подлежащие разделению [14, 17, 19]. Набор флотационных реагентов достаточно широк, что позволяет подобрать селективные реагенты для большинства природных минералов. Это делает флотационный метод обогащения универсальным, то есть пригодным для обогащения большинства природных руд. В исследованиях для снижения затрат процесса флотации, основываясь на данных научной

литературы, были использованы эффективные и доступные реагенты невысокой стоимости. В качестве собирателя использовали бутиловый ксантогенат натрия, который является достаточно сильным коллективным собирателем. В качестве вспенивателя применяли С7, который широко распространён. В ходе экспериментов по флотации были выполнены 5 вариантов режимов обогащения при разных средах пульпы: рН 8,0, 9,0, 10,0 и с применением сульфидизатора (Na_2S) и дополнительной диспергации пульпы [3, 4, 8–9].

Результаты экспериментов по флотации руды крупностью 0,071 мм: при рН = 8 массовый выход итогового концентрата составил 14,3% с концентрацией золота 10,0 г/т, что дало извлечение 82,07%. Похожий результат с извлечением (82,79%) наблюдался при повышении рН до 9,0, при общем массовом выходе концентрата, равном 9,45%, с содержанием золота 15,3 г/т. Доочистка наработанного концентрата при оптимальном режиме при рН 9 поднимает извлечение до 90,3% (табл. 4).

Флотационное исследование доизмельчённой до классов крупности $\pm 0,05$ мм показало нецелесообразность помола исходного сырья до $-0,05$ мм. Извлечение золота в концентрат составило немногим более 65% против 89,94% при крупности $+0,05$ мм.

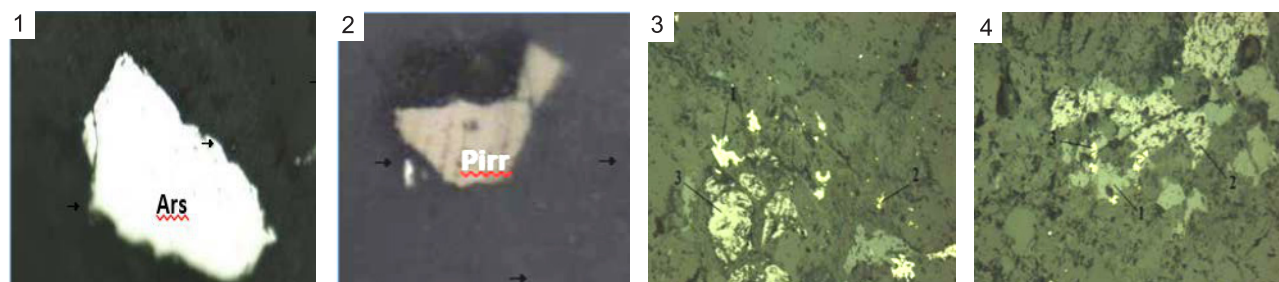


Рис. 4. Сульфидные и железные минералы, содержащиеся в руде:

вкрапление: 1 – зёрен арсенипирита, 2 – пирита, 3 – ильменита и 4 – магнетита

5. Результаты флотации исходного сырья классов крупности ±0,05 мм

Наименование продуктов	Выход		Содержание	Извлечение	Примечание
	в г	в %	Au, г/т	Au, %	
Объединённый концентрат	400,0	40	4,0	65,22	-0,05 мм
Хвосты	600,0	60	1,42	34,78	
Объединённый +0,05 мм концентрат	179,4	17,94	6,8	89,94	+0,05 мм
Хвосты	820,6	82,06	0,17	10,06	

При тонком измельчении в пульпе появляется большое количество тонких шламов, которые ухудшают флотацию за счёт уменьшения скорости и избирательности флотации и увеличения расхода реагентов. Ухудшение селективности флотации тонкозернистых частиц происходит вследствие ряда причин, основные из которых связаны с уменьшением вероятности контакта тонких частиц с пузырьками [5, 15, 16].

Минералогический анализ концентратов флотации, полученных в экспериментах с максимальными показателями извлечения – при pH пульпы, равном 9, а также при добавлении сульфида натрия и диспергации, показал, что основной сульфидный минерал концентратов – арсенопирит. Он характеризуется всеми присущими ему свойствами – цветом, отражательной способностью, анизотропией. Содержание его в пробах соответственно порядка 18–19 и 16–17%. Обнаружены также пирит и халькопирит. Содержание пирита соответственно в пробах поряд-

ка 6–7 и 4–5%. Халькопирит в пробе флотоконцентрата, полученного при pH = 9, составляет 3–4%, в пробе с диспергацией и добавлением сульфида натрия – менее 0,2%.

В хвостах флотации (рис. 5), по результатам минералогического анализа, содержится рудовмещающая жильная пустая порода (полевые шпаты разной классификации, кварциты, карбонат кальция, слюды, хлорит, теллуриды и в меньшей степени темноцветные минералы, такие как апатит, оливин, плагиоклазы). Из рудных компонентов проба представлена арсенопиритом, пиритом, халькопиритом и редко пирротинном, висмутином, оксидами и гидроксидами железа (магнетитом, гётитом). Обнаруженное в пробах хвостов флотации золото имеет круглую и овальную форму, не эффективную для флотации.

После проведённых исследований можно сделать выводы, что исследуемая руда упорного типа, кварцевая, с содержанием сульфидов около 5%. Технологический тип исследуемой руды – золотокварцевый,

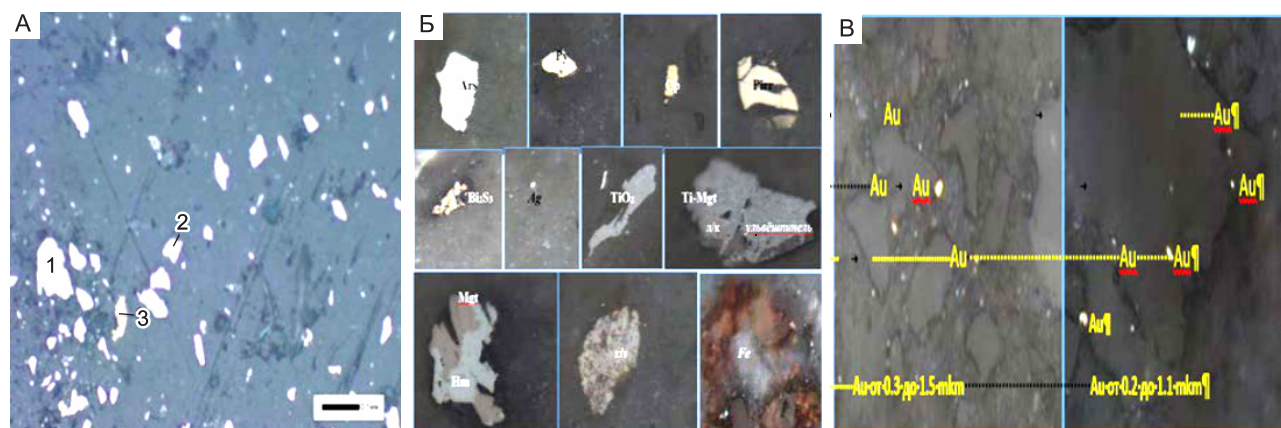


Рис. 5. Минералогическое исследование продуктов флотации:

А – в концентрате: 1 – арсенопирит, 2 – пирит, 3 – халькопирит; Б – рудные компоненты, содержащиеся в хвостах флотации; В – золото свободное и в сростках с пустой породой в хвостах флотации

золотосульфидный со свободным и цианируемым золотом. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом и арсенопиритом, а также пирротинном; из минералов, содержащих железо, в руде содержится магнетит и ильменит. Золото находится преимущественно в свободной форме (40 %) и в сростках с кварцем и сульфидами. По дисперсности золото тонкодисперсное. Потери золота в цикле флотации происходят за счёт перехода в хвосты золота в сростках с кварцем и золотин овальной и круглой формы. Наибольшая полнота перехода золота в концентрат (84,42 %) наблюдается при крупности руды класса 0,07 мм.

Рекомендованный режим флотации для извлечения золота: крупность руды 0,071 мм, в соотношении Т:Ж = 1:3 (плотность пульпы 33 %), реагентный режим 120 г/т бутилового ксантогената натрия в ка-

честве собирателя, 60 г/т вспенивателя С7, сульфатизатор Na_2S , при кислотностях пульпы pH 8,0–9,0, с использованием дополнительной диспергации.

Дополнительное измельчение исходной руды до -0,005 мм нецелесообразно, извлечение золота составило 65,22 %. Потери золота происходят с мелким шламом.

Для дальнейшей переработки сырья с целью извлечения золота может проводиться цианирование полученного концентрата чановым способом с сорбцией и активацией процесса, хвосты флотации кучным цианидным выщелачиванием с применением бактериальных окислителей.

Министерство образования и Науки Республики Казахстан оказало финансовую поддержку данной работе в рамках грантового финансирования AP08051925.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А. А.* Флотационные методы обогащения. – 3-е изд. – М.: МГГУ, 2008. – 670 с.
2. *Богудлова А. И., Войлошиников Г. И., Матвеева Т. М.* Повышение эффективности переработки золотосодержащей сульфидной руды // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 12 (131). – С. 195–202.
3. *Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Алексейчук Д. А.* Новые научные подходы к выбору композиций сульфгидрильных собирателей, механизму их действия и обоснованию условий селективной флотации сульфидных минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 10. – С. 59–66.
4. *Воробьев Н. И.* Обогащение полезных ископаемых: пособие для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 01 01 «Технология производства минеральных удобрений, солей и щелочей» / Н. И. Воробьев, Д. М. Новик. – Минск: БГТУ, 2008. – 174 с.
5. *Глембоцкий В. А., Класен В. И.* Флотационные методы обогащения. – М.: Недра. – 1981. – С. 238–250.
6. *Ерденева 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.
7. *Игнаткина В. А.* Выбор селективных собирателей для флотации сульфидных минералов // Цветные металлы. – 2009. – № 6. – С. 14–19.
8. *Кондратьев С. А.* Оценка флотационной активности реагентов-собирателей // Обогащение руд. – 2010. – № 4. – С. 24–30.
9. *Лодейщиков В. В.* Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: монография. В 2 томах. Том 1. – Иркутск: Ирригредмет, 1999. – 342 с.
10. *Матвеева Т. Н.* Современные реагентные режимы флотации платины и золотосодержащих руд // Проблемы освоения недр в XXI в. глазами молодых: материалы 5-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-во ИПКОН РАН, 2008. – С. 12–15.
11. *Матвеева Т. Н., Чантурия В. А., Ганчич А. О.* Извлечение тонкодисперсных микро- и наночастиц золота с применением термоморфного полимера с функциональной группой дифенилфосфина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 3. – С. 131–140.
12. *Рябой В. И.* Проблемы использования и разработки новых флотореагентов в России // Цветные металлы. – 2011. – № 3. – С. 7–14.
13. *Рябой В. И., Шендерович В. А., Кретов В. П.* Применение аэрофлотов при флотации руд // Обогащение руд. – 2005. – № 6. – С. 43–44.
14. *Чантурия В. А., Задорожный В. К.* Флотация тонкокрапленых руд. – Л. [СПб.]: Наука, 1985. – 139 с.
15. *Основа пенной флотации* [Электронный ресурс]. – URL: <https://zolotodb.ru/article/11335>. Дата обращения 16.11.2022.
16. *Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J.* Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 112. – P. 19–26.
17. *Fairthorne G., Fornasiero D., Ralston J.* Interaction of thionocarbamate and thiourea collectors with sulphide minerals: a flotation and adsorption study // International Journal of Mineral Processing. – 1997. – Vol. 50, Iss. 4. – P. 227–242.
18. *Koizhanova A. K., Toktar G., C. E. Banks, Magomedov D. R., Kubaizhanov A. A.* Research of hydrometallurgical method of leaching gold from flotation tails with using bio-oxidation // Complex Use of Mineral Resources. – 2020. – № 3 (314). – P. 28–39.
19. *Wiese J., Harris P., Bradshaw D.* Investigation of the role and interactions of a dithiophosphate collector in the flotation of sulphides from the Merensky reef // Minerals Engineering. – 2005. – Vol. 18, Iss. 8. – P. 791–800.
20. *Kliwer R.* Persistence Leads to Over a Pound of Gold [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icmj.com/magazine/article/persistence-leads-to-over-a-pound-of-gold-4004/>. Дата обращения 16.11.2022.

REFERENCES

1. *Abramov A. A.* Flotatsionnyye metody obogashcheniya [Flotation methods of enrichment]. 3rd ed., Moscow, MGGU publ., 2008, 670 p. (In Russ.)
2. *Bogudlova A. I., Voyloshnikov G. I., Matveyeva T. M.* Povysheniye effektivnosti pererabotki zolotosoderzhashchey sul'fidnoy rudy [Improving the efficiency of processing gold-bearing sulfide ore]. Vestnik irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2017, V. 21, No. 12 (131), pp. 195–202. (In Russ.)
3. *Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Alekseychuk D. A.* Novyye nauchnyye podkhody k vyboru kompozitsiy sul'fgidril'nykh sobirateley, mekhanizmu ikh deystviya i obosnovaniyu usloviy selektivnoy flotatsii sul'fidnykh mineralov [New scientific approaches to the choice of compositions of sulfhydryl collectors, the mechanism of their action and the justification of the conditions for selective flotation of sulfide minerals]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten', 2013, No. 10, pp. 59–66. (In Russ.)
4. *Vorob'yev N. I.* Obogashcheniye poleznykh iskopayemykh: posobiye dlya studentov spetsial'nosti "Khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv, materialov i izdeliy" spetsializatsii "Tekhnologiya proizvodstva mineral'nykh udobreniy, soley i shchelochey" [Mineral enrichment: a manual for students of specialty «Chemical technology of inorganic substances, materials and products» specialization «Technology of production of mineral fertilizers, salts and alkalis»]. N. I. Vorob'yev, D. M. Novik, Minsk, BGTU publ., 2008, 174 p. (In Russ.)
5. *Glembotskiy V. A., Klassen V. I.* Flotatsionnyye metody obogashcheniya [Flotation enrichment methods]. Moscow, Nedra publ., 1981, pp. 238–250. (In Russ.)
6. *Yerdenova M. B., Koyzhanova A. K., Kamalov E. M., Abdylidayev N. N., Abubakriyev A. T.* Doizvlecheniye zolota iz otkhodov pererabotki zolotosoderzhashchikh rud Kazakhstana [Re-extraction of gold from waste processing of gold-bearing ores in Kazakhstan]. Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya [Complex use of mineral raw materials], 2018, No. 2, pp. 12–20. (In Russ.)
7. *Ignatkina V. A.* Vybor selektivnykh sobirateley dlya flotatsii sul'fidnykh mineralov [Choice of selective collectors for flotation of sulfide minerals]. Tsvetnyye metally [Nonferrous metals], 2009, No. 6, pp. 14–19. (In Russ.)
8. *Kondrat'yev S. A.* Otsenka flotatsionnoy aktivnosti reagentov-sobirateley [Evaluation of the flotation activity of reagents-collectors]. Obogashcheniye rud [Enrichment of ores], 2010, No. 4, pp. 24–30. (In Russ.)
9. *Lodeyshchikov V. V.* Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud: Monografiya [Technology of extraction of gold and silver from persistent ores: Monograph]. In 2 volumes, V. 1, Irkutsk, Irgiredmet, 1999, 342 p. (In Russ.)
10. *Matveyeva T. N.* Sovremennyye reagentnyye rezhimy flotatsii platiny i zolotosoderzhashchikh rud [Modern reagent modes of flotation of platinum and gold-bearing ores]. Problemy osvoyeniya nedr v XXI v. glazami molodykh: materialy 5-y Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov. Moscow, IPKON RAN publ., 2008, pp. 12–15. (In Russ.)
11. *Matveyeva T. N., Chanturiya V. A., Gapchich A. O.* Izvlecheniye tonkodispersnykh mikro- i nanochastits zolota s primeneniyyem termomorfnoy polimera s funktsional'noy gruppoy difenilfosfina [Extraction of finely dispersed micro- and nanoparticles of gold using a thermomorphic polymer with a functional group of diphenylphosphine]. Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh [Physical and technical problems of mineral development]. 2017, No. 3, pp. 131–140. (In Russ.)
12. *Ryaboy V. I.* Problemy ispol'zovaniya i razrabotki novykh flotoreagentov v Rossii [Problems of use and development of new flotation reagents in Russia]. Tsvetnyye metally [Nonferrous metals], 2011, No. 3, pp. 7–14. (In Russ.)
13. *Ryaboy V. I., Shenderovich V. A., Kretov V. P.* Primeneniye aeroflotov pri flotatsii rud [Application of aeroflots in ore flotation]. Obogashcheniye rud [Enrichment of ore], 2005, No. 6, pp. 43–44. (In Russ.)
14. *Chanturiya V. A., Zadorozhnyy V. K.* Flotatsiya tonko vkraplennykh rud [Flotation of finely disseminated ores]. Leningrad, Nauka publ., 1985, 139 p.
15. *Osnovy pennoy flotatsii [Fundamentals of Froth Flotation]*, available at: <https://zolotodb.ru/article/11335>. (16.11.2022)
16. *Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J.* Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation. Minerals Engineering, 2017, Vol. 112, pp. 19–26.
17. *Fairthorne G., Fornasiero D., Ralston J.* Interaction of thionocarbamate and thiourea collectors with sulphide minerals: a flotation and adsorption study. International Journal of Mineral Processing, 1997, Vol. 50, Iss. 4, pp. 227–242.
18. *Koizhanova A. K., Toktar G., C. E. Banks, Magomedov D. R., Kubaizhanov A. A.* Research of hydrometallurgical method of leaching gold from flotation tails with using bio-oxidation. Complex Use of Mineral Resources, No. 3 (314), pp. 28–39.
19. *Wiese J., Harris P., Bradshaw D.* Investigation of the role and interactions of a dithiophosphate collector in the flotation of sulphides from the Merensky reef. Minerals Engineering, 2005, Vol. 18, Iss. 8, pp. 791–800.
20. *Kliewer R.* Persistence Leads to Over a Pound of Gold, available at: <https://www.icmj.com/magazine/article/persistence-leads-to-over-a-pound-of-gold-4004/>. (16.11.2022)

Статья поступила в редакцию 20.07.22; одобрена после рецензирования 20.10.22; принята к публикации 21.10.22.
The article was submitted 20.07.22; approved after reviewing 20.10.22; accepted for publication 21.10.22.