DOI: *10.25515/PMI.2018.2.160*

УДК 622.765

СУЛЬФИДИЗАЦИЯ СЕРЕБРО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ГОЛЬЦОВОЕ» ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ СЕРЕБРА С ХВОСТАМИ ОБОГАЩЕНИЯ

Л.В.ШУМИЛОВА[1], **О.С.КОСТИКОВА**[2]
[1] *Забайкальский государственный университет, Чита, Россия*
[2] *АО «Серебро Магадана», Магадан, Россия*

Приведены результаты лабораторных исследований на обогатимость серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» флотационным методом обогащения на Омсукчанской обогатительной фабрике. Представлены результаты ситового анализа отвальных хвостов экспериментальной пробы МТП № 101 (№ 7577-и), которые свидетельствуют о том, что большое количество серебра (123 г/т) теряется в классе крупности –0,040 мм (выход 50,25 %). По результатам минералогического анализа установлено, что основные потери благородного металла связаны с его тонкой вкрапленностью в оксидах, сульфидах и силикатной породе. Основные минералы серебра – акантит и полибазит, в классе –0,040 мм – кюстелит. Экспериментальные исследования проводились в два этапа. Цель первого этапа – выявить степень влияния тонины помола в питании флотации (при содержании готового класса –0,074 мм в диапазоне 60-95 %) на извлечение серебра при различных расходах бутилового ксантогената калия (50, 150, 300 г/т). Цель второго этапа – оценка эффективности применения сульфидизации при различном расходе сернистого натрия $Na_2S·9H_2O$ (50, 150, 200, 450, 750 г/т – 1 %-ного водного раствора) в условиях оптимального реагентного режима, установленного на первом этапе исследований. Представлены результаты опытов по определению оптимальной тонины помола и исследований на обогатимость серебро-полиметаллической руды при использовании сернистого натрия в качестве сульфидизатора. Дана оценка эффективности применения процесса сульфидизации. Установлены следующие экспериментальные зависимости извлечения серебра: от степени измельчения и расхода бутилового ксантогената калия; от изменения степени тонины помола и расхода сернистого натрия (при расходе бутилового ксантогената калия 150 г/т); от степени помола при оптимальном расходе сернистого натрия 150 г/т и бутилового ксантогената калия 300 г/т. Дана сравнительная оценка изменения показателя извлечения серебра от степени тонины помола до и после добавок сернистого натрия (расход собирателя 150 г/т). Приведены математические модели, описывающие зависимость извлечения серебра от технологических параметров, позволяющие управлять процессом флотации труднообогатимого сырья с большим количеством первичных шламов и склонностью руды к ошламованию при измельчении и обогащении (вторичные шламы). Экспериментально установлен оптимальный расход флотационных реагентов: сернистого натрия 150 г/т, бутилового ксантогената калия 300 г/т при рациональной тонине помола (содержание готового класса – 0,074 мм в питании флотации 85-95 %). Абсолютное извлечение серебра из руды серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое» по сравнению с технологическими показателями Омсукчанской обогатительной фабрики, перерабатывающей руды месторождения «Гольцовое» по стандартному режиму, повысилось на 14,1 % (с 70,7 до 84,8 %) при выходе концентрата 9,09 % за счет интенсификации извлечения серебросодержащих полуокисленных сульфидов с пониженной флотоактивностью и компенсации высокой поглотительной способности тонких частиц. Количество серебра в классе крупности –0,040 мм в пробе МПТ № 101 (№ 7698-и) после использования сульфидизации составило 83 г/т при выходе 72,01 %, что свидетельствует об эффективности процесса. Потери серебра с хвостами обогащения уменьшились на 40 г/т (32,52 %). Это доказывает возможность переработки серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» без шихтовки.

Ключевые слова: серебро-полиметаллические руды, первичные и вторичные шламы, сернистый натрий, сульфидизация, флотация, реагентный режим, извлечение тонких частиц серебра, ксантогенат, степень тонины помола

Как цитировать эту статью: Шумилова Л.В. Сульфидизация серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» для снижения потерь серебра с хвостами обогащения / Л.В.Шумилова, О.С.Костикова // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 160-166. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.160

Введение. В настоящее время для обеспечения долгосрочного развития технологии обогащения труднообогатимого сырья требуется оптимизация существующих технологических процессов и поиск новых более эффективных методов переработки минерального сырья. При этом разрабатываемые технологии должны обеспечивать полноту использования природного минерального сырья и отвечать экологическим требованиям.

При обогащении серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» на Омсукчанской обогатительной фабрике значительная часть ценных компонентов теряется с хвостами гравитационно-флотационного обогащения. Потери ценных компонентов объясняются следующими причинами: тонкой вкрапленностью минералов серебра, сложностью их вскрытия при измельчении; значительной степенью окисленности минералов и необходимостью поиска приемов, улучшающих их флотационную активность; наличием большого количества первичных шламов и склонностью руды к ошламованию при измельчении и обогащении.

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.160

Решение проблем, связанных с обогащением труднообогатимого сырья, сводится к оптимизации режима измельчения и схемы обогащения [2], усовершенствованию реагентного режима за счет применения как новых, часто дорогих и дефицитных собирателей [1, 3, 4, 8, 13], вспенивателей и депрессоров, так и их композиций с доступными и дешевыми флотореагентами [5, 7, 16]; внедрению систем контроля ионного состава пульпы, для автоматического регулирования концентрации реагентов в процессе обогащения; введению в технологию обогащения новых методов обработки пульпы, таких как магнитная и электрическая обработка, биогетерокоагуляция; применению эффективного современного флотационного оборудования; раздельному обогащению песковой и шламовой фракций [10, 14].

Постановка проблемы. В настоящее время проблема вскрытия тонкодисперсного серебра, заключенного в силикатной породе, и по этой причине больших потерь благородного металла с хвостами обогащения – нерешенная задача для окисленных серебросодержащих руд.

Лабораторией технологических исследований АО «Серебро Магадана» проведен ряд исследований (оптимизация режима измельчения, усовершенствование технологической схемы обогащения, подбор шихты для переработки), позволивших улучшить технологию переработки руд месторождения «Гольцовое», но не решивших весь комплекс перечисленных проблем, связанных с потерей серебра с хвостами обогащения (50-60 %).

Сульфидизация – наиболее распространенный метод улучшения флотационной активности окисленных серебросодержащих минералов путем добавки в пульпу различных реагентов, например сернистого натрия [15, 17]. В результате сульфидизации значительно повышается гидрофобность минеральной поверхности [6]. В ранее проведенных работах определено, что с увеличением степени помола поглотительная способность тонких частиц возрастает [11, 12].

Объектом исследований являлись серебро-полиметаллические руды месторождения «Гольцовое».

Цель данной работы – оценка эффективности применения сульфидизации за счет добавок сернистого натрия при обогащении серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» флотацией для снижения потерь ценных компонентов с хвостами обогащения.

Методология. Изучение вещественного состава серебро-полиметаллической руды месторождения «Гольцовое». Исследуемая малая проба технологическая МПТ № 101 (№ 7417-и) массой 50 кг является материалом рудной зоны 4 серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое», отобрана геологической службой АО «Серебро Магадана» 26.05.2016 г.

Серебро-полиметаллические руды месторождения «Гольцовое» – труднообогатимое минеральное сырье – характеризуются следующими особенностями: сложным минеральным составом (рис.1), высокой степенью окисленности 40,3 %, склонностью к ошламованию – общее содержание тонкодисперсных выделений минералов серебра в материале ситового класса –0,5 + 0,074 мм оценивается около 40 % отн., полидисперсной вкрапленностью полезных минералов во вмещающих породах и тонкой вкрапленностью минералов серебра в сульфидах, оксидах и силикатной породе при их взаимном прорастании (размер включений минералов серебра варьируется от 0,002-0,2).

По результатам минералогического анализа хвостов флотационного обогащения установлено, что основные потери ценных компонентов связаны с их тонкой вкрапленностью в оксидах, сульфидах и силикатной породе. В минералогическом составе преобладают нерудные минералы – кварц, полевые шпаты, хлорит, родонит и глинистые минералы. Содержание сульфидов 0,9 % (в основном преобладают галенит, сфалерит). Основные минералы серебра – акантит и полибазит, в классе – 0,040 мм – кюстелит.

Характерной чертой руд месторождения «Гольцовое» является наличие большого количества пор, заполненных охристо-глинистым материалом (15,5 %). Промышленную ценность в серебро-полиметаллических рудах месторождения «Гольцовое» представляют серебро, свинец.

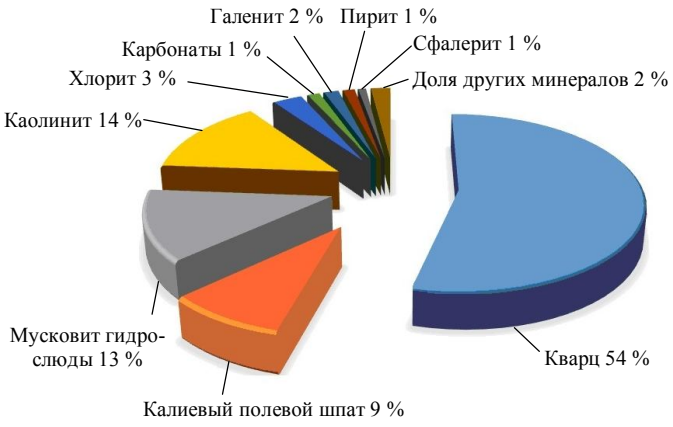


Рис.1. Минеральный состав технологической пробы №7417-и

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.160

Минеральный состав хвостов флотационного обогащения следующий:

Минералы	Содержание, %	Минералы	Содержание, %
Кварц	7	Арсенопирит	0,9
Полевые шпаты	60	Магнетит, рутил, апатит	0,1
Гидрослюды	25	Лимонит	5,5
Биотит	25	Ярозит	5,5
Хлорит	25	Оксиды Mn	0,4
Минералы Ag	0,1	Каламин	0,4
Самородные Sb и As	0,1	Церуссит, англезит, малахит	0,5
Пирит, марказит, галенит, сфалерит, халькопирит, ковеллин	0,9	Другие вторичные минералы	0,5
Блеклая руда	0,9	Сумма	100

Ситовой анализ хвостов флотационного обогащения № 7577-и (табл.1) показал, что значительное количество серебра (123 г/т) находится в классе – 0,040 мм, выход которого составляет 50,25 %.

Таблица 1

Ситовой анализ хвостов флотационного обогащения № 7577-и

Классы крупности, мм	Выход				Содержание, г/т		Распределение, %	
	г	%	% по плюсу	% по минусу	Pb	Ag	Pb	Ag
+0,074	124,8	27,17	27,17	100,00	1,35	81,4	15,87	20,92
–0,074 +0,040	103,7	22,58	49,75	72,83	2,45	96,6	23,93	20,63
–0,040	230,8	50,25	100,00	50,25	2,77	123	60,20	58,45
Итого	459,3	100	–	–	2,31	105,7	100	100

Обсуждение результатов. Обогащение серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» на Омсукчанской обогатительной фабрике осуществляется по гравитационно-флотационной схеме. Поисковые опыты по флотационному обогащению выполняли на флотомашинах ФМ-1М и ФМ-2М (рис.2).

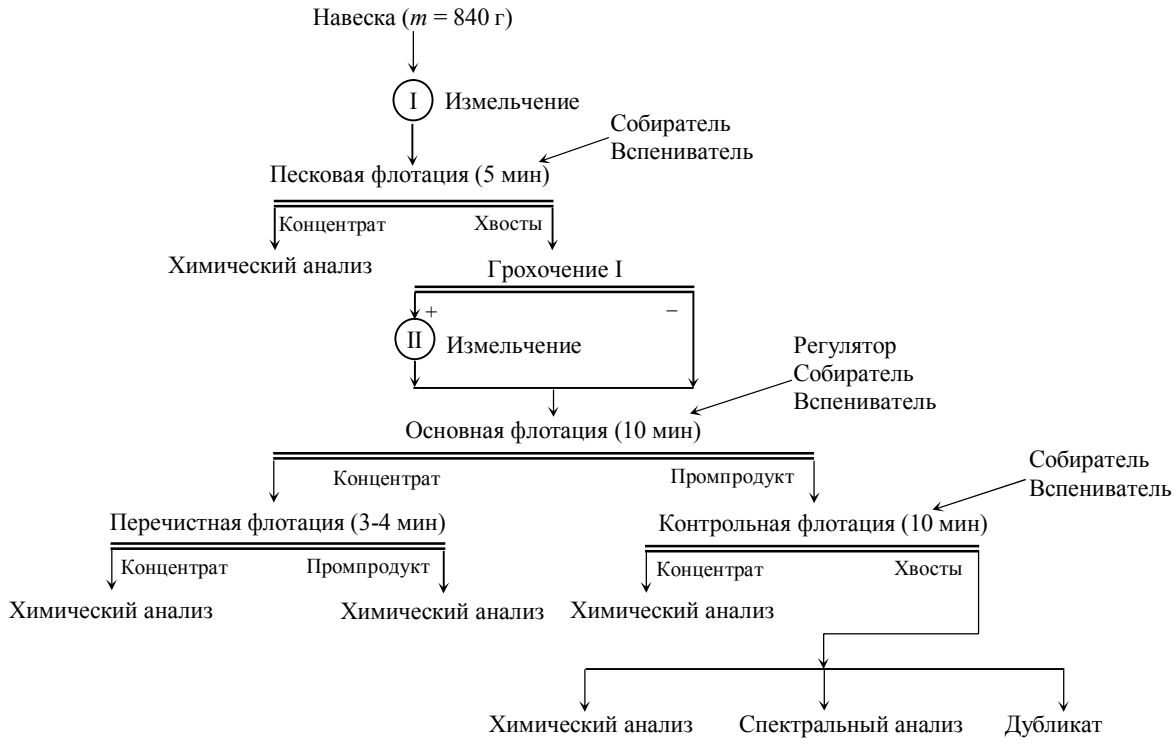


Рис.2. Схема проведения флотационных опытов

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.160

Основная флотация выполнялась в камерах объемом 2,0-3,0 л, для перечистных операций использовались камеры вместимостью 0,5-1,0 л.

Реагентный режим: основной собиратель – бутиловый ксантогенат калия (50, 150, 300 г/т – 1 %-ный водный раствор, точки подачи – песковая, основная и контрольная флотации), второй собиратель – ИМА-И-413 (10 г/т – 1 %-ный водный раствор, точки подачи – песковая, основная и контрольная флотации), вспениватель – ФРИМ 2ПМ (15 г/т – без разбавления, точки подачи – песковая, основная и контрольная флотации).

Опыты по оценке эффективности применения сульфидизации проводили при различном расходе сернистого натрия $Na_2S{\cdot}9H_2O$ (50, 150, 200, 450, 750 г/т – 1 %-ный водный раствор, точки подачи – основная флотация). Плотность питания песковой флотации 38-42 % твердого, основной флотации 25-27 % твердого, диапазон изменения содержания готового класса 0,074 мм, в питании песковой флотации – 45-55 %, основной флотации – 60-95 %.

Результаты опытов анализировались с помощью рентгенофлуоресцентного, атомно-абсорбционного и пробирного методов анализа.

Характеристика используемых реагентов представлена в табл.2.

Таблица 2

Характеристика используемых реагентов

Вид реагента	Реагент	Краткая характеристика
Собиратель	Бутиловый ксантогенат калия C_4H_9OCSSK	Производные угольной (H_2CO_3) кислоты. Класс сульфгидрильных собирателей. Обладает коллектирующей способностью по отношению к самородным металлам
	ИМА-И413	Смесь аэрофлотов. Класс сульфгидрильных собирателей. Обладает вспенивающими свойствами, способствует извлечению тонких классов. Наиболее эффективен в сочетании с ксантогенатами
Вспениватель	ФРИМ 2ПМ	Состоит из спиртов нормального и изостроения со средней молекулярной массой 94±14. Близок по флотационным свойствам к МИБК
Регулятор среды	Кальцинированная сода Na_2CO_3	Белые кристаллы плотностью 2,53 г/см^3, при 20 °С хорошо растворимы в воде; pH ≤ 10,5. Применяется как регулятор среды
Активатор	Сернистый натрий $Na_2S{\cdot}9H_2O$	Сульфидизатор окисленных серебросодержащих минералов свинца и цинка

Исследования по определению оптимального расхода сернистого натрия и сопутствующих параметров обогащения проводились в несколько этапов.

На первом этапе для определения поглотительной способности минералов серебра в представленной для исследований технологической пробе по отношению к собирателю и влияния степени тонины помола на извлечение серебра проведены опыты с различным расходом бутилового ксантогената калия (50, 150, 300 г/т) и содержанием готового класса в питании флотации 60-95 % [9]. В результате опытов получены зависимости извлечения серебра от степени тонины помола и расхода бутилового ксантогената калия (рис.3).

Статистическая обработка данных позволила установить аналитические зависимости извлечения серебра в концентрат от различной степени тонины помола:

$$\varepsilon_1 = -0{,}05x_2 + 6{,}35x - 162{,}43;$$
$$\varepsilon_2 = -0{,}08x_2 + 11{,}40x - 364{,}23;$$
$$\varepsilon_3 = -0{,}05x_2 + 8{,}60x - 301{,}9,$$

где ε_1–ε_3 – извлечение серебра при расходе бутилового ксантогената калия 50; 150; 300 г/т и различной степени измельчения соответственно, %; x – содержание класса 0,074 мм в питании флотации, %.

Коэффициенты корреляции составили: $R_1 = 0{,}92$; $R_2 = 0{,}94$; $R_3 = 0{,}94$, относительная погрешность измерений $\delta_1 = \pm 1{,}84$ %; $\delta_2 = \pm 1{,}42$ %; $\delta_3 = \pm 1{,}73$ %.

Зависимости извлечения серебра от степени тонины помола при различном расходе бутилового ксантогената показали следующее. Зависимость при расходе 50 г/т имеет регрессирующий характер, что свидетельствует о недостатке расхода собирателя при высокой поглотительной способности флотоактивных минералов, увеличивающейся при повышении степени тонины помола. Максимальное извлечение серебра 61,8 % получено при $\beta_{кл.0,074} = 63$-65 % в питании флотации при расходе собирателя 50 г/т, где $\beta_{кл.0,074}$ – содержание класса – 0,074 мм.

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.160

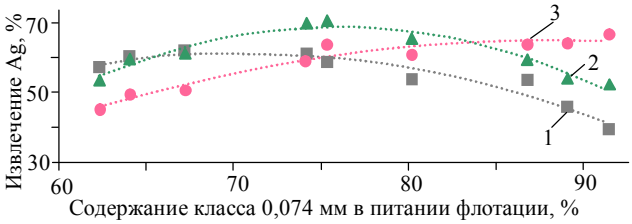


Рис.3. Зависимости извлечения серебра от степени измельчения и расхода бутилового ксантогената калия
1 – 50 г/ т; 2 – 150 г/т; 3 – 300 г/т

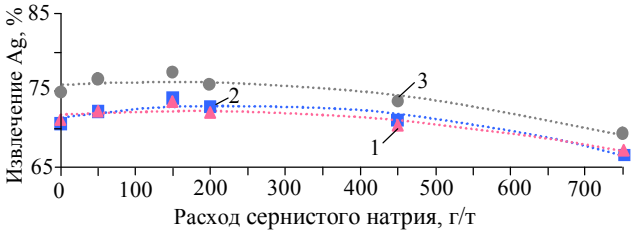


Рис.4. Зависимость извлечения серебра от степени тонины помола и расхода сернистого натрия (расход бутилового ксантогената калия 150 г/т)
1 – 65-75 %; 2 – 75-85 %; 3 – 85-90 %

При увеличении расхода бутилового ксантогената калия до 300 г/т зависимость извлечения серебра от степени тонины помола приобретает прогрессирующий характер. Максимальное извлечение серебра 66,9 % при расходе собирателя 300 г/т получено при $\beta_{кл.0,074}$ = 88-90 % в питании флотации.

Параболический характер зависимости извлечения серебра от степени тонины помола при расходе бутилового ксантогената калия 150 г/т свидетельствует об оптимальной степени помола. Максимальное извлечение серебра при расходе собирателя 150 г/т достигается при содержании готового класса в питании флотации 72-75 % и составляет 70,7 % (выход 6,16 %).

Таким образом, проведенные исследования по определению поглотительной способности минералов серебра руд месторождения «Гольцовое» по отношению к бутиловому ксантогенату калия и влиянию степени помола на извлечение серебра позволили установить:

1) оптимальный расход бутилового ксантогената калия 150 г/т, степень измельчения 72-75 % класса – 0, 074 мм;

2) увеличение тонины помола (свыше 85 %) для раскрытия тонкодисперсного серебра на данном этапе не обеспечивает прироста по извлечению серебра из-за окисленных минералов;

3) повышение расхода собирателя (300 г/т) для флотации серебросодержащих полуокисленных сульфидов с пониженной флотоактивностью на данном этапе нерационально. Снижение расхода собирателя (50 г/т) нецелесообразно.

На втором этапе определено влияние расхода сернистого натрия на извлечение серебра при полученном на первом этапе исследований оптимальном реагентном режиме. Кроме того, установлено влияние содержания готового класса в питании флотации на эффективность применения сернистого натрия при расходе собирателя 150 г/т.

В ходе проведения испытаний получены экспериментальные зависимости извлечения серебра, показывающие изменение поглотительной способности минералов серебра при различном расходе сернистого натрия, и влияния степени тонины помола на эффективность применения сернистого натрия (рис.4).

Статистическая обработка данных позволила установить аналитические зависимости извлечения серебра в концентрат от расхода сернистого натрия при различной степени тонины помола:

$$\varepsilon_1 = 0{,}01x + 71{,}50;$$

$$\varepsilon_2 = 0{,}01x + 71{,}92;$$

$$\varepsilon_3 = 0{,}01x + 75{,}77,$$

где ε_1–ε_3 – извлечение серебра при степени тонины помола 65-75; 75-85; 85-95 % соответственно; x – расход сернистого натрия, г/т.

Коэффициенты корреляции составили: R_1 = 0,96; R_2 = 0,95; R_3 = 0,97, относительная погрешность измерений $\delta_1 = \pm 0{,}92$ %; $\delta_2 = \pm 1{,}03$ %; $\delta_3 = \pm 0{,}93$.

Добавки сернистого натрия позволяют вести процесс флотации при более тонкой степени помола, что способствует повышению извлечения серебра (на 6,7 %) до 77,4 % при выходе 7,60 % относительно извлечения 70,7 %, полученного при стандартном режиме обогащения (без сульфидизации, $\beta_{кл.0,074}$ = 65-75 % в питании флотации) (рис.5).

Таким образом, добавки сернистого натрия при увеличении степени помола свыше 85 % позволили повысить извлечение серебра до 77,4 %.

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.160

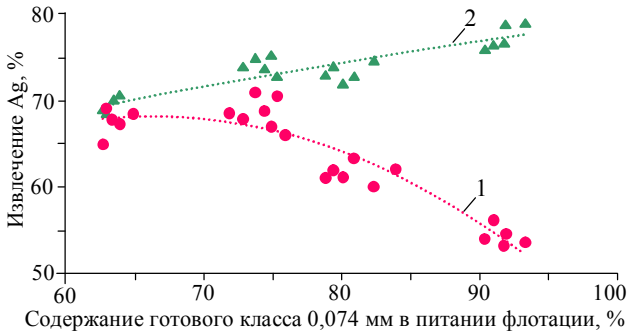


Рис.5. Сравнительная диаграмма по изменению извлечения серебра при увеличении степени помола до и после добавок сернистого натрия при расходе собирателя 150 г/т
1 – без добавок; 2 – с добавками

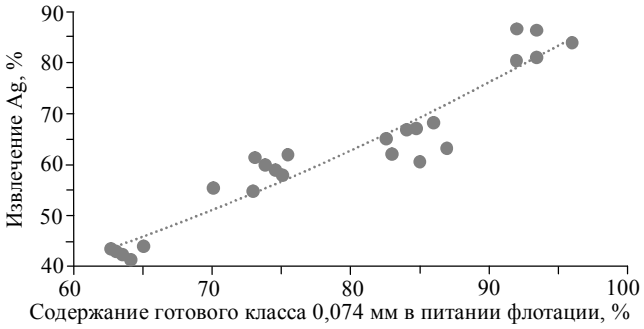


Рис.6. Зависимость извлечения серебра от степени помола при оптимальном расходе сернистого натрия 150 г/т и расходе бутилового ксантогената калия 300 г/т

Проведены опыты при увеличенном расходе бутилового ксантогената калия до 300 г/т с ранее определенным оптимальным расходом сернистого натрия (150 г/т) и различной степенью помола. В результате получена зависимость изменения извлечения серебра при расходе ксантогената 300 г/т и сернистого натрия 150 г/т в зависимости от содержания готового класса в питании флотации (рис.6).

Зависимость извлечения серебра при расходе сернистого натрия 150 г/т и собирателя 300 г/т от степени тонины помола носит прогрессирующий характер. Наилучшее извлечение серебра получено при содержании готового класса в питании флотации свыше 85 %. Повышение расхода собирателя целесообразно при добавках сернистого натрия и высокой степени измельчения.

Результаты ситового анализа хвостов флотационного обогащения после применения сульфидизации и оптимизации режима измельчения приведены в табл.3. Количество серебра в классе крупности – 0,040 мм в контрольной пробе № 7698-и после использования сульфидизации составило 83 г/т при выходе 63,45 %, следовательно, уменьшилось на 40 г/т.

Таблица 3

Ситовой анализ хвостов флотационного обогащения № 7698-и после применения сульфидизации

Классы крупности, мм	Выход				Содержание, г/т		Распределение, %	
	г	%	% по плюсу	% по минусу	Pb	Ag	Pb	Ag
+0,074	54,1	12,18	12,18	100,00	0,49	50	4,05	8,33
–0,074 + 0,040	108,3	24,38	36,55	87,82	1,11	59	18,38	19,67
–0,040	281,9	63,45	100,00	63,45	1,8	83	77,57	72,00
Итого	444,3	100	–	–	1,47	73,1	100	100

Получена математическая зависимость

$$\varepsilon = 0{,}01x^2 - 0{,}04x + 11{,}51,$$

где ε – извлечение серебра при расходе бутилового ксантогената калия 300 г/т, сернистого натрия 150 г/т и различной степени измельчения, %; x – содержание класса 0,074 мм в питании флотации, %.

Коэффициент корреляции $R = 0{,}95$ и относительная погрешность измерений $\delta = \pm 1{,}61$ %.

Значительное увеличение выхода концентрата на 2,93 % относительно выхода, полученного при проведении предыдущих опытов с использованием реагентного режима, применяемого на обогатительной фабрике (без сульфидизации), не способствовало повышению извлечения серебра. При проведении параллельной серии опытов с увеличенным выходом концентрата, но без добавок сернистого натрия, извлечение серебра составило порядка 70 %.

Регрессивные модели, полученные экспериментальным путем, подвергались следующим проверкам:

– статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии;

– общего качества уравнения регрессии.

Таким образом, проведенные исследования на обогатимость руд серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое» позволили установить:

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.160*

– оптимальный расход сернистого натрия – 150 г/т. Увеличение расхода сернистого натрия (до 750 г/т) приводит к депрессии минералов серебра;

– максимальную эффективность сернистый натрий проявляет при высоком содержании готового класса 0,074 мм (свыше 85 %) в питании флотации. Это связано с тем, что увеличение степени тонины помола позволяет раскрыть тонкодисперсное серебро, заключенное в оксидах, сульфидах и силикатной породе, которое после сульфидизации успешно флотируется;

– оптимальный расход бутилового ксантогената калия составил 300 г/т;

– извлечение серебра повысилось до 84,8 % при выходе 9,09 %.

Заключение. Повышение извлечения серебра из руды серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое» составило 14,1 % относительно извлечения 70,7 %, полученного при стандартных параметрах. После сульфидизации потери серебра в хвостах обогащения с тонкими классами уменьшились на 32,52 % за счет интенсификации извлечения серебросодержащих полуокисленных сульфидов с пониженной флотоактивностью и компенсации высокой поглотительной способности тонких частиц.

Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения сульфидизации. Однако для более полной оценки эффективности усовершенствованного реагентного режима необходима экономическая оценка с точки зрения целесообразности повышения степени помола и расхода бутилового ксантогената калия для достижения извлечения серебра 84,8 %. Также необходимо провести анализ разработанного реагентного режима для определения влияния повышения степени помола на производительность отделения обезвоживания и соответствие гранулометрического состава получаемых концентратов техническим условиям (ТУ 201-2015) при данном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов А.А.* Принципы конструирования селективных реагентов-собирателей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 1. С. 90-104.

2. *Аксенов Б.В.* Процесс песковой флотации как часть универсальной схемы обогащения, устойчивой к изменениям свойств перерабатываемых руд / Б.В.Аксенов, А.Ю.Галютин, А.В.Бабук // Золотодобывающая промышленность. 2009. № 1. С. 4-9.

3. Испытание и применение эффективных собирателей при флотации руд, содержащих золото и серебро / В.В.Голиков, В.И.Рябой, В.А.Шендерович, В.А.Царелунго // Обогащение руд. 2008. № 3. С. 15-17.

4. *Кондратьев С.А.* Оценка флотационной активности реагентов-собирателей // Там же. 2010. № 4. С. 24-30.

5. *Мелик-Гайказян В.И.* Конкурирующие представления в работах по пенной флотации и перспективы их применения для подбора реагентов / В.И.Мелик-Гайказян, Н.П.Емельянова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 6. С. 355-366.

6. Разработка математической модели процесса сульфидирования арсенат-кальциевых кеков / В.А.Луганов, М.А.Утегенов, Г.Д.Гусейнова, Е.О.Килибаев // Вестник КазНТУ. 2008. № 2(65). С. 65-68.

7. *Рябой В.И.* Применение пенообразователя ФРИМ-2ПМ при флотации сульфидных руд // Обогащение руд. 2002. № 3. С. 17-18.

8. *Чантурия В.А.* Повышение селективности процесса флотации золота на основе применения новых реагентов-собирателей / В.А.Чантурия, Т.А.Недосекина, А.О.Гапчич // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 6. С. 106-115.

9. *Шумилова Л.В.* Анализ влияния вещественного состава руды серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое» на показатели обогащения / Л.В.Шумилова, О.С.Костикова // Вестник ЗабГУ. 2015. № 5 (120). С. 46-55.

10. *Шумилова Л.В.* Влияние режимных параметров на эффективность работы флотомашины «Jameson Cell» / Л.В.Шумилова, О.С.Костикова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 6. С. 207-212.

11. *Fan M.* Nanobubble generation and its application in froth flotation. Part I: Nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions. / M.Fan, D.Tao, R.Honaker, Z.Luo // Mining Science and Technology. 2010. Vol.20. № 1. P.1-19. Part II: Fundamental study and theoretical analysis. № 2. P.159-177.

12. *Miettinen T.* The limits of the particle flotation. / T.Miettinen, J.Ralston, D.Fornasiero // Minerals Engineering. 2010. Vol.23. № 5. P.420-437.

13. *Pan Lei.* A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interaction / Pan Lei, Jung Sunghwan, Yoon Rol-Hoan // Int. J. Miner. Process. 2012. Vol. 106-109. P. 37-41.

14. *Pascual R.L.* Determination of floatability distribution from laboratory batch cell tests / R.L.Pascual, W.J.Whiten // Minerals Engineering. 2015. Vol. 83. November. P. 1-12.

15. Patent 7922788 US B2. Process for recovering gold and silver from refractory ores / Barun Gorain, Daniel Hillier, Jacques McMullen; Original Assignee Barrick Gold Corporation. Apr. 12, 2011.

16. *Ryaboy V.* The usage of dialkyldithiophospates in flotation of sulphide ores / V.Ryaboy, V.Kretov, E.Smirnova // Proc. of XV Balkan Mineral Processing Congress. Sozopol, Bulgaria. June 12-16, 2013. Vol. 1. P. 419-422.

17. Ying Gu. The value of automated mineralogy / Gu Ying, R.P.Schouwstra, C.Rule // Mineral Engineering. 2014. Vol.58. P. 100-103.

Авторы: **Л.В.Шумилова**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *shumilovalv@mail.ru* (*Забайкальский государственный университет*, *Чита*, *Россия*), **О.С.Костикова**, *инженер-технолог*, *lis.kostikova@yandex.ru* (*АО* «*Серебро Магадана*», *Магадан*, *Россия*).

Статья принята к публикации 25.06.2017.