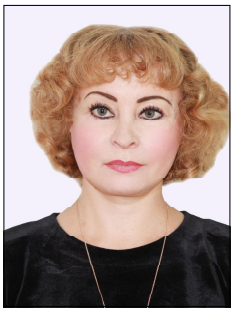
УДК 622.675
DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-1-68-79

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАГЕНТНОГО РЕЖИМА ПРИ ФЛОТАЦИИ ТРУДНООБОГАТИМЫХ СЕРЕБРО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

RESEARCH OF THE REAGENT MODE DURING REFRACTORY SILVER-POLYMETALLIC ORES FLOTATION



Л. В. Шумилова,
Забайкальский государственный университет, г. Чита
shumilovfalv@mail.ru

L. Shumilova,
Transbaikal State University, Chita

О. С. Костикова,
Забайкальский государственный университет, г. Чита
lis.kostikova@yandex.ru

O. Kostikova,
Transbaikal State University, Chita

В. Г. Черкасов,
Забайкальский государственный университет, г. Чита
cherkasov1948@yandex.ru

V. Cherkasov,
Transbaikal State University, Chita

Е. Т. Воронов,
Забайкальский государственный университет, г. Чита
voronov@mail.ru

E. Voronov,
Transbaikal State University, Chita

В. В. Лимберова,
Забайкальский государственный университет, г. Чита
limberovavv@gmail.com

V. Limberova,
Transbaikal State University, Chita

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что при обогащении серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» существуют технологические проблемы, связанные со значительными потерями с хвостами гравитационно-флотационного обогащения ценных компонентов. Работа направлена на совершенствование реагентного режима при флотации.

© Л. В. Шумилова, О. С. Костикова, В. Г. Черкасов, Е. Т. Воронов, В. В. Лимберова, 2020

Приведены результаты минералогического анализа 4-й рудной зоны месторождения «Гольцовое». Потери ценных компонентов с хвостами обогащения обусловлены полидисперсной вкрапленностью полезных минералов во вмещающих породах; тонкой вкрапленностью минералов серебра в сульфидах, окислах и силикатной породе при их тесном взаимном прорастании; наличием большого количества тяжелых окисленных минералов (прежде всего галенита и в меньшей степени сфалерита) и тесной ассоциацией их с серебросодержащими минералами; склонностью руды к ошламованию. Исследовано влияние на показатели обогащения флотационных реагентов (керосин, медный купорос, серная кислота).

Проведены поисковые опыты на малых технологических пробах в три этапа: первый – активация свинцовых серебросодержащих минералов, второй – активация цинковых серебросодержащих минералов, третий – активация окисленных серебросодержащих минералов марганца и железа. Выявлено, что дополнительная загрузка реагентов-активаторов (керосин и серная кислота) позволяет повысить флотационную активность серебросодержащих минералов и увеличить извлечение серебра до 81 %. Статистическая обработка данных позволила установить аналитические зависимости извлечения ценных компонентов (Ag, Zn, Pb) в концентрат от выхода концентрата, изменяющегося в диапазоне 2,0…10,8 %, исходя из номенклатуры применяемых реагентов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности снижения потерь ценных компонентов с хвостами обогащения посредством совершенствования реагентного режима

Ключевые слова: *серебро-полиметаллическая руда; полидисперсная вкрапленность; ошламование; реагенты-активаторы; флотация; реагентный режим; сульфиды; тяжелые окисленные минералы; хвосты обогащения; потери ценных компонентов*

The relevance of the fulfilled subject of the research is caused by the fact that during enrichment of silver – polymetallic ores of the Goltsovoye deposit there are technological problems, connected with considerable losses of valuable components with tails of gravitational and floatation enrichment. The work is focused on the improvement of the reagent mode during flotation.

The results of the mineralogical analysis of the 4th ore zone of the Goltsovoye deposit are given. Losses of valuable components with tails of enrichment are caused by: polydisperse shots of useful minerals in the containing rocks; thin shots of silver minerals in sulfides, oxides and silicate rock in the process of their close mutual germination; existence of a large amount of heavy oxidized minerals (firstly of galena and to a lesser degree – sphalerite) and their close association with argentiferous minerals; tendency of ore to slime formation. The influence of floatation reagents (kerosene, copper vitriol, sulphurian acid) on enrichment indicators was studied.

The search experiences on small technological tests are carried out in three stages: the first – activation of lead argentiferous minerals, the second – activation of zinc argentiferous minerals, the third – activation of the oxidized argentiferous minerals of manganese and iron. It is revealed that additional loading of reagents activators (kerosene and sulphurian acid), allows to increase floatation activity of argentiferous minerals as well as to increase extraction of silver to 81 %. Statistical data processing has allowed to establish analytical dependences of valuable components extraction (Ag, Zn, Pb) into a concentrate from output of the concentrate, changing in the range of 2,0…10,8 % depending on the nomenclature of the applied reagents. The results of the conducted researches testify a possibility of decrease in losses of valuable components with enrichment tails by means of improvement of the reagent mode

Key words: *silver-polymetallic ore; polydisperse impregnation; scald; reagents-activators; flotation; reagent mode; sulfides; heavy oxidized minerals; tailings enrichment; loss of valuable components*

Введение. 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 решивший весь комплекс проблем, связанных с потерей серебра с хвостами обогащения (50…60 %).

Поиск новых более эффективных методов переработки труднообогатимых руд является актуальной задачей, направленной на обеспечение комплексности использования природного минерального сырья.

Флотация – основной метод обогащения серебро-полиметаллических руд, позволяющий извлекать большинство серебряных и

серебросодержащих минералов. Особенно флотоактивны теллуриды серебра, акантит, полибазит, стефанит, прустит, самородное серебро с чистой поверхностью. Извлечение серебряных и серебросодержащих минералов повышается при стадиальной флотации, использовании смесей различных классов собирателей, флотации обесшламленного материала, более длительной обработке пульпы реагентами – собирателями (20...30 мин). Кроме того, флотируемость серебряных и серебросодержащих минералов зависит от присутствия в пульпе других минералов (особенно пирита, галенита, халькопирита) и наличия глинистых шламов, форм нахождения серебра в руде (свободные минералы серебра или в сростках с другими минералами).

Ранее рядом исследований [1–7; 11; 16; 17] определено, что для эффективной флотации минерала собиратель на его поверхности должен быть представлен двумя формами сорбции при их оптимальном соотношении в зависимости от степени гидрофобности минерала (хемосорбированным собирателем, поверх которого располагается рыхлый слой валентно-насыщенного соединения собирателя и каплями физически сорбированного собирателя). Роль физически сорбированного собирателя при флотации различных минералов играет диксантогенид – продукт окисления ксантогената, образующийся на поверхности минерала, аполярные собиратели (керосин), реагенты-активаторы (медный купорос, серная кислота).

Следовательно, для обеспечения успешной флотации минералов с низкой флотационной активностью требуется дополнительная загрузка реагентов, выполняющих роль физически сорбированного собирателя и повышающих извлечение этих минералов в концентрат.

Постановка проблемы. При переработке труднообогатимых серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» на Омсукчанской обогатительной фабрике значительная часть ценных компонентов (серебро, свинец) теряется с хвостами гравитационно-флотационного обогащения.

Технологическими проблемами, в связи с которыми не обеспечивается получение достаточной степени извлечения основных ценных компонентов, являются:

– полидисперсная вкрапленность полезных минералов во вмещающих породах и тонкая вкрапленность минералов серебра в сульфидах, окислах и силикатной породе при их взаимном прорастании (размер включений минералов серебра варьируется в диапазоне 0,002...0,2);

– наличие большого количества тяжелых окисленных минералов, прежде всего галенита и в меньшей степени сфалерита, и их тесная ассоциация с серебросодержащими минералами;

– склонность руды к ошламованию.

Отвальные хвосты складируются в хвостохранилище № 2. Остаточное содержание драгметаллов в хвостах варьируется в зависимости от типа руды. Среднее содержание серебра в лежалых хвостах составляет 60 г/т, золота – 0,10 г/т, при переработке сырья труднообогатимых рудных зон содержание серебра достигает 150 г/т, золота – 0,30 г/т. Высокое содержание драгметаллов в хвостах обогащения предопределяет необходимость поиска способа, позволяющего доизвлечь ценные компоненты.

Основными собирателями серебросодержащего галенита являются ксантогенат и дитиофосфат. Наиболее распространенный аполярный собиратель – керосин. Для цинковых минералов, находящихся в сростках с серебром в качестве активатора флотации применяют сульфат меди (медный купорос) [8–15]. Для окисленных минералов железа и марганца основными собирателями являются дитиофосфаты, диксантогенид. В качестве активатора флотации применяют серную кислоту.

В этой связи возрастает роль правильно подобранного реагентного режима, позволяющего получать высокие технологические показатели при обогащении труднообогатимого минерального сырья.

Цель исследрвания – исследование реагентного режима при флотации труднообогатимых серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» с целью снижения потерь ценных компонентов с хвостами обогащения.

Объект исследования – серебро-полиметаллические руды месторождения «Гольцовое».

Предмет исследования – процесс флотации серебросодержащих минералов на основе дополнительного использования реагентов-активаторов.

Методология исследования. 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.

По результатам минералогического анализа (табл. 1, рис. 1, 2) 4-й рудной зоны месторождения «Гольцовое» установлено, что основными минералами – носителями тонкодисперсного серебра являются вторичные минералы свинца и черных металлов и нерудные породообразующие минералы. В минеральном составе пробы содержится 1,8 % сульфидов (главным образом – галенита) и более 15 % – вторичных минералов цветных и черных металлов. В группе минералов серебра акантит Ag_2S (95 % отн.) преобладает над другими минеральными формами – серебром самородным, пираргиритом Ag_3SbS^3, полибазитом $(Ag,Cu)_{16}Sb_2S_{11}$ и штромейеритом $Ag_{1-x}CuS$. Гранулометрический состав минералов серебра пониженный. Около 40 % их запаса в пробе находятся в выделениях размером в первые микроны и менее. Галенит – основной минерал концентратор свинца, характеризующийся повышенным содержанием серебра, присутствием железа, сурьмы, цинка, висмута и олова.

Таблица 1 / Table 1

Минеральный состав 4-й рудной зоны месторождения «Гольцовое» / Mineral composition of the 4th ore zone of the deposit «Goltsovoye»

Минералы / Minerals	**Химическая формула / Chemical formula**	**Содержание, % / Content, %**
Серебро / Silver	Ag	~0,1
Кварц / Quartz	SiO_2	58
Полевые шпаты / Feldspar	$K[AlSiO_3O_8]$	
Гидрослюды / Hydromicas	Kx(Al, Mg, Fe)2-3 • (Si4xAlxO10 • $(OH)_2$ • nH2O, где x- 0,5, n 1,5	23,8
Каолинит / Kaolinite	Al4[Si4O10](OH)8	
Галенит / Galena	PbS	1,7
Пирит / Pyrite	FeS_2	ед. вкл.
Сфалерит / Sphalerite	ZnS	ед. вкл.
Халькопирит / Chalcopyrite	$CuFeS_2$	ед. вкл.
Касситерит / Cassiterite	SnO_2	0,1
Рутил, лейкоксен, сфен / Rutile, leucoxene, sphene	TiO_2, $TiO_{2\,n}\cdot n H_2O$, $CaTiSiO_5$	0,1
Циркон / Zircon	$ZrSiO_4$	ед. вкл.
Родохрозит / Rhodochrosite	$MnCO_3$	0,1
Кальцит / Calcite	$CaCO_3$	0,5
Сидерит / Siderite	$FeCO_3$	0,5
Англезит / Anglesite	$PbSO_4$	1,2
Церуссит / Cerussite	$PbCO_3$	1,5
Коронадит / Coronadite	$PbMn_7O_{16}$	0,5
Гематофанит / Hematogenic	$Pb_5Fe_4O_{16}(Cl,OH)$	ед. вкл.
Смитсонит / Smithsonite	$ZnCO_3$	0,5
Халькофанит / Chalcophanite	$ZnMn_3O_7\cdot 3H_2O$	0,4
Гетеролит / Heterolith	$ZnMn_2O_4$	0,2

Окончание табл. 1

Минералы / Minerals	Химическая формула / Chemical formula	Содержание, % / Content, %
Каламин / Calamine	$Zn_4(OH)_2Si_2O_7 \cdot H_2O$	ед. вкл.
Цинкит / Zincite	ZnO	ед. вкл.
Ковеллин / Covellite	CuS	0,05
Тенорит / Tenorite	CuO	0,05
Малахит / Malachite	$Cu_2(OH_2)CO_3$	ед. вкл.
Вторичные минералы As и Sb / Secondary minerals As and Sb		0,2
Пиролюзит / Pyrolusite	MnO_2	0,7
Вернадит / Vernadite	$MnO_2 \cdot {}_nH_2O$	
Манганит / Manganite	MaOOH	
Гетит / Goethite	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$	8,0
Гидрогетит / The hydrogoethite	α- FeOOH	
Гидрогематит / Hydrogenated	$Fe_2O_3 \cdot {}_nH_2O$	
Ярозит / Jarosite	$KFe_3(OH)_6[SO_4]_2$	1,5
Другие вторичные минералы / Other secondary minerals		0,3
Сумма / Total sum		100

Как показывает практика, если серебро тонкодисперсное и связано с минералами цветных и черных металлов, успех в извлечении серебросодержащего минерала обеспечивает максимальное извлечение серебра. Максимального извлечения серебра в форме собственных минералов можно достичь путем гравитационного обогащения и флотацией без подавителей.

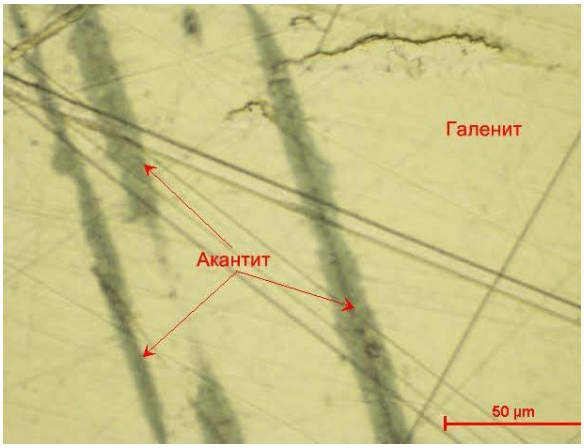


Рис. 1. Замещение галенита акантитом / Fig. 1. Replacement of galena with acanthite

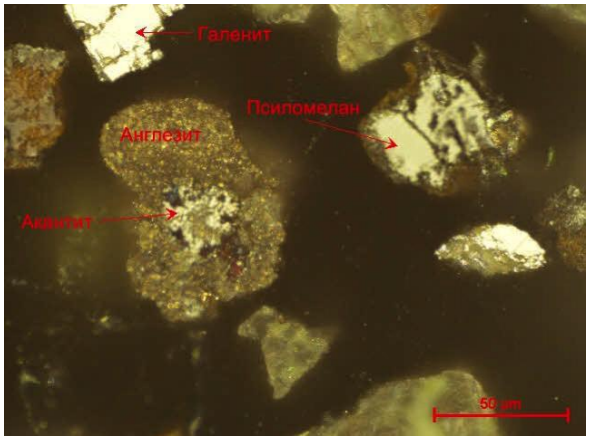


Рис. 2. Включение пираргирита в галените / Fig. 2. Inclusion of pyrargyrite in galena

Результаты исследования и их обсуждение. Проведен анализ реагентов, применяемых для извлечения различных минералов цветных и черных металлов (галенит, сфалерит, пирит), связанных с серебром, и составлены рекомендации по возможности применения этих реагентов для повышения извлечения серебра из руд серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое».

Для исследования влияния реагентов-активаторов на показатели обогащения проведена серия опытов. Опыты проводи-

лись в три этапа. Первый этап – активация свинцовых серебросодержащих минералов. Второй этап – активация цинковых серебросодержащих минералов. Третий этап – активация окисленных серебросодержащих минералов марганца и железа. Поисковые опыты по флотационному обогащению выполняли на флотомашинах ФМ–1М и ФМ–2М согласно схеме, приведенной на рис. 3. Основная флотация выполнялась в камерах объемом 2,0...3,0 л, для перечистных операций использовались камеры объемом 0,5...1,0 л.

Реагентный режим: основной собиратель – бутиловый ксантогенат калия (20, 40, 50, 120, 150, 300 г/т – 1 %-ный водный раствор, точки подачи – основная и контрольная флотации), второй собиратель – ИМА-И-413 (10, 15, 20, 60 г/т – 1 %-ный водный раствор, точки подачи – основная и контрольная флотации), вспениватель – ФРИМ 2ПМ (15 г/т – без разбавления, точки подачи – основная и контрольная флотации), сульфидизатор – $Na_2S{\cdot}9H_2O$ (150 г/т – 1 %-ный водный раствор, точки подачи – основная флотация).

Подача реагентов-активаторов: керосин (20...300 г/т, без разбавления, в виде эмульсии, точки подачи – основная флотация), медный купорос (100 г/т, 10 %-ный водный раствор, точки подачи – основная флотация), серная кислота (20 мл, концентрация 1 %, точки подачи – основная флотация).

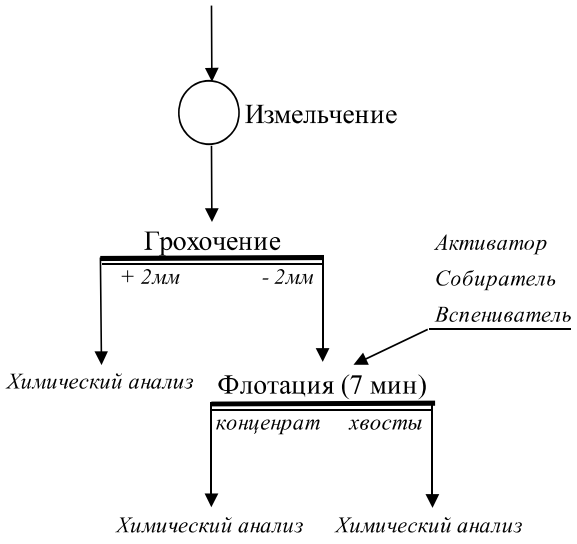


Рис. 3. Схема проведения флотационных опытов / Fig. 3. Circuit of flotation experiments

Плотность питания основной флотации 25...27 % твердого, содержание готового класса 0,074 мм в питании флотации 65...90 %. Результаты опытов анализировались с помощью рентгенофлуоресцентного, атомно-абсорбционного и пробирного методов анализа.

В табл. 2 представлена номенклатура используемых реагентов и их назначение.

Таблица 2 / Table 2

Номенклатура реагентов и их назначение / Nomenclature of reagents and their purpose

Номенклатура / Nomenclature	**Назначение / Purpose**	**Поверхность закрепления / Surface fixings**	**Химическая формула / Chemical formula**
Серная кислота / Sulfuric acid	Активатор пиритных минералов / Pyrite mineral activator	Минерал – вода / Mineral – water	H_2SO_4
Сернистый натрий / Sodium sulphide	Сульфидизатор / Sulfidization	Минерал – вода / Mineral – water	Na_2S
Медный купорос / Copper sulphate	Активатор цинковых минералов / Activator of the zinc minerals	Минерал – вода / Mineral – water	$CuSO_4$
Бутиловый ксантогенат калия / Butyl ksanthate kalia	Собиратель гетерополярный / Gatherer is heteropolar	Минерал – вода / Mineral – water	$C_2H_5OCS_2K$
Дитиофосфат / Dithiophosphate	Собиратель гетерополярный / Gatherer is heteropolar	Минерал – вода / Mineral – water	$R_2O_2PS_2Me$
Керосин / Kerosene	Аполярный собиратель / Apolar collector	Минерал – вода / Mineral – water	HnCn
ФРИМ 2ПМ / FRIM 2PM	Вспениватель / Foamer	Вода – воздух / Water – air	CnH_2n+1OH

Сводные данные проведения трех этапов опытов по активации серебросодержащих минералов свинца, цинка, марганца и железа и полученные показатели обогащения представлены в табл. 3...5.

Таблица 3 / Table 3

Сводная таблица результатов исследований по активации серебросодержащих минералов свинца, цинка, марганца и железа / Summary table of the research results on activation of silver minerals of lead, zinc, manganese and iron

Номер опыта / Number Experience's	Условия опытов / Conditions of the experiments								
	содержание кл-0,074 мм в питании флотации, % / contents of CL-0,074 mm in the diet flotation, %	pH среды / pH environment	сернистый натрий, г/т / sodium sulphate, g/t	медный купорос, г/т / copper coupeauros, g/t	ксантогенат, г/т / ksanthate, g/t	ИМА, г/т / IMA, g/t	керосин, г/т / kerosene, g/t	серная кислота, мл / sulfuric acid, ml	ФРИМ, г/т / FRIM, g/t
1	69,50	6,30			20,0	10,0			15,0
2	69,90	6,30			20,0	10,0			15,0
3	68,60	6,30			20,0	10,0	300,0		15,0
4	68,30	6,30			20,0	20,0	300,0		15,0
5	68,30	6,30			150,0	10,0	300,0		15,0
6	70,10	6,40			20,0	10,0	20,0		15,0
7	68,80	6,40			40,0	10,0	20,0		15,0
8	68,70	6,20		100,0	120,0	10,0			15,0
9	66,80	6,20		100,0	120,0	10,0	300,0		15,0
10	68,30	6,30	150,0	100,0	120,0	10,0	300,0		15,0
11	68,00	6,30	150,0	100,0	120,0	10,0			15,0
12	67,30	6,10		100,0	20,0	10,0			15,0
13	86,80	7,40			50	15		20	15,0
14	89,05	7,40			300	60		20	15,0

Таблица 4 / Table 4

Показатели обогащения – содержание полезных компонентов во флотационном концентрате / Indicators of enrichment – of the assay of useful components in the flotation concentrate

Номер опыта / Number of experience	Выход, % / Exit, %	Качество концентрата / Quality of the concentrate				
		Ag, г/т / Ag, g/t	Zn, %	Pb, %	Fe, %	Mn, %
1	2,5	13273,0	0,31	59,40	3,39	0,05
2	2,0	15680,0	0,36	49,10	3,92	0,06
3	2,5	11694,0	1,16	61,80	3,62	0,05
4	6,8	8050,0	0,29	74,60	2,63	0,00
5	6,0	7616,0	0,34	73,70	2,45	0,00
6	5,8	7730,0	0,64	72,40	2,30	0,00
7	5,7	7017,0	0,34	75,10	2,01	0,00
8	4,9	7012,0	0,21	81,40	1,66	0,00

Окончание табл. 4

9	6,0	7971,0	0,22	74,80	1,95	0,00
10	6,1	7752,0	0,25	78,50	2,15	0,00
11	5,2	6958,0	0,20	78,30	1,62	0,00
12	2,4	11042,0	0,25	62,80	2,44	0,00
13	7,0	4309,0	0,27	40,56	2,90	0,29
14	10,8	3294,0	0,32	32,60	3,60	0,25

Таблица 5 / Table 5

Показатели обогащения – извлечение полезных компонентов в концентрат, % / Indicators of enrichment – recovery of useful components in concentrate, %

Номер опыта / Number of experience	**Выход / Exit**	**Извлечение / Extraction**				
		Ag	Zn	Pb	Fe	Mn
1	2,5	38,25	2,50	16,02	1,88	0,29
2	2,0	35,71	2,56	10,33	1,76	0,30
3	2,5	35,01	9,83	16,42	1,99	0,33
4	6,8	61,16	7,05	52,12	4,37	0,02
5	6,0	53,16	7,95	47,17	3,50	0,02
6	5,8	48,34	12,30	44,14	3,14	0,01
7	5,7	44,78	7,10	44,81	2,74	0,01
8	4,9	37,29	3,76	42,47	1,90	0,01
9	6,0	54,10	4,87	48,05	2,88	0,02
10	6,1	51,83	5,94	48,86	3,21	0,02
11	5,2	41,29	4,10	44,45	2,05	0,01
12	2,4	31,09	2,19	16,81	1,32	0,01
13	7,0	69,90	10,31	54,67	6,16	2,58
14	10,8	81,03	19,51	65,70	11,55	3,63

Данные, представленные в таблицах, свидетельствуют, что при усложнении реагентного режима за счет применения керосина, медного купороса, серной кислоты значительно увеличивается выход концентрата (рис. 4) и изменяется его вещественный состав, наблюдается прирост извлечения ценных компонентов.

Статистическая обработка данных позволила установить аналитические зависимости извлечения ценных компонентов (Ag, Zn, Pb) в концентрат от выхода концентрата, изменяющегося в диапазоне 2,0...10,8 %, в зависимости от номенклатуры применяемых реагентов:

$$\varepsilon_1 = 0{,}2199\,x^2 + 3{,}0949\,x + 25{,}34;$$

$$\varepsilon_2 = -0{,}6436\,x^2 + 14{,}427\,x - 15{,}283;$$

$$\varepsilon_3 = 0{,}208\,x^2 - 0{,}8821x + 4{,}9705,$$

где ε_1 – извлечение серебра, %;
ε_2 – извлечение свинца, %;
ε_3 – извлечение цинка, %;
x – выход концентрата, %.

Коэффициенты корреляции составили: $R_1 = 0{,}85$, $R_2 = 0{,}97$, $R_3 = 0{,}70$.

Все полученные зависимости носят прогрессирующий характер.

При добавках аполярного собирателя – керосина (опыты № 3...7) содержание серебра в концентрате снижается, однако при

этом наблюдается прирост извлечения. Максимально достигнутое извлечение составило 61,16 % – опыт № 4 (прирост 22,91 %, относительно опытов № 1, 2 без подачи керосина).

Извлечение и содержание свинца в концентрате увеличивается до 52,12 % по извлечению – опыт № 4 (прирост 36,1 % относительно опытов без подачи аполярного собирателя) и до 74,60 % по содержанию в концентрате – опыт № 4 (прирост 12,8 %). Извлечение цинка возрастает до 12,3 % (опыт № 6) относительно 2,5 % (опыт № 1), прирост составил 20,4 %.

При этом качество полученного концентрата не соответствует требованиям ТУ предприятия (ТУ 201-2015). Однако добавки аполярных собирателей (в данном случае керосина) для улучшения флотационной активности серебросодержащих минералов свинца и цинка 4-й рудной зоны месторождения «Гольцовое» в целом пригодны для промышленного использования, но требуют дополнительных наработок и на данном этапе не решают весь комплекс существующих проблем.

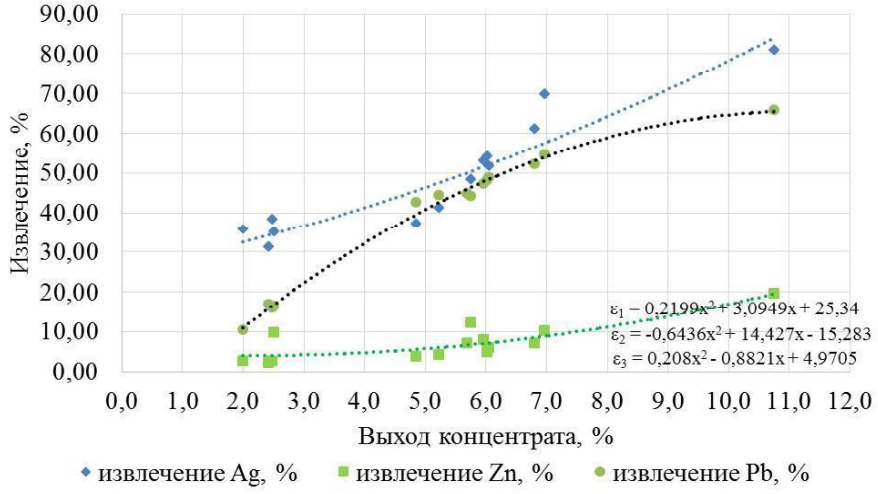


Рис. 4. Зависимость извлечения золота от выхода концентрата / Fig. 4. Dependence of gold recovery from the yield

Добавки медного купороса (опыты № 8...12) для активации серебросодержащих минералов цинка не оказали значительного влияния на показатели обогащения и не могут рассматриваться в качестве дополнительного реагента при флотации серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое».

В опытах № 13, 14 с агитацией пульпы в кислой среде в течение 20 мин перед основной флотацией для улучшения флотационной активности серебросодержащих минералов извлечение серебра увеличилось до 81,0 %, и, как следствие, снизилось содержание ценных компонентов в хвостах обогащения.

Заключение. Результаты проведенных исследований на малых технологических пробах труднообогатимых серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» в три этапа: первый – активация свинцовых серебросодержащих минералов, второй – активация цинковых серебросодержащих минералов, третий – активация окисленных серебросодержащих минералов марганца и железа свидетельствуют о том, что исследование реагентного режима процесса флотации посредством дополнительного использования реагентов-активаторов (керосин и серная кислота) позволяет повысить флотационную активность серебросодержащих минералов и увеличить извлечение серебра до 81,0 %, что свидетельствует о возможности снижения потерь ценных компонентов с хвостами обогащения.

Установлена зависимость извлечения ценных компонентов (Ag, Zn, Pb) в концентрат от выхода концентрата. Выход концентрата колеблется в пределах 2,0...10,8 %, что обусловлено эффективностью и номенклатурой применяемых реагентов.

Список литературы

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

2. Горячев Б. Е., Николаев А. А. Принципы построения кинетических «ионных» моделей формирования сорбционного слоя собирателя на поверхности сульфидов цветных тяжелых металлов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 3. С. 169–178.

3. Дорошенко М. В., Башлыкова Т. В., Проскуряков М. В., Прокопьев С. А., Пономарева А. М. Минералогическое сопровождение технологических исследовании // Цветные металлы. 2007. № 3. С. 38–44.

4. Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Дьячков Ф. Г. Повышение контрастности флотационных свойств сульфидов цветных металлов полиметаллических руд с использованием сульфгидрильных собирателей различной молекулярной структуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С. 161–170.

5. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Оценка собирательной силы флотационного реагента // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. С. 137–144.

6. Литвинцев В. С. Проблемы рационального освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в восточных районах России // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. С. 97–104.

7. Морозов В. В., Столяров В. Ф., Коновалов Н. М. Алгоритм управления процессом флотации на основе оперативного контроля физико-химических параметров пульпы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 2. С. 312–315.

8. Николаев А. А., Со Ту, Горячев Б. Е. Исследование закономерности кинетики флотации неактивированного сфалерита композициями сульфгидрильных собирателей флотометрическим методом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 86–95.

9. Паньшин А. М., Евдокимов С. И., Артемов С. В. Исследования в области флотации паровоздушной смесью / / Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2012. № 1. С. 3–10.

10. Рябой В. И., Кретов В. П., Смирнова Е. Ю. Использование диалкилдитиофосфатов при флотации сульфидных руд / / IX Конгресс обогатителей стран СНГ: сб. ст. Т. 2. М., 2013. С. 496–498.

11. Чантурия В. А. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 15, № 12. С. 9–25.

12. Шехирев Д. В., Смайлов Б. Б. Кинетика извлечения частиц различного минерального состава при флотации свинцово-цинковой руды // Обогащение руд. 2016. № 2. С. 20–26.

13. Юшина Т. И. Совершенствование технологии селективной флотации полиметаллической руды с применением азотсодержащих органических депрессоров // Научные школы Московского государственного горного университета. 2008. Т. 1. С. 563–572.

14. Boulton A., Fornasiero D., Ralston J. Effect of iron content in sphalerite on flotation // Minerals Engineering. 2005. Vol. 18. P. 1120–1122.

15. Dichmann T. K., Finch J. A. The role of copper ions in sphalerite-pyrite flotation selectivite // Minerals Engineering. 2001. Vol. 14, No. 2. P. 217–225.

16. Fornasiero D., J. Ralston Effect of surface oxide /hydroxide products on the collectorless flotation of copper-activated sphalerite // International Journal of Mineral Processing. 2006. Vol. 78, No. 4. P. 231–237.

17. McFadzean B., Castelyn D. G., O'Connor C. T. The effect of mixed thiol collectors on the flotation of galena // Minerals Engineering. 2012. Vol. 36–38. P. 211–218.

References

1. Golikov V. V., Ryaboy V. I., Shenderovich V. A., Tsarelungo V. A. *Obogashchenie rud* (Ore dressing), 2008, no. 3, pp. 15–17.

2. Goryachev B. E., Nikolaev A. A. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* (Physico-technical problems of development of minerals), 2013, no. 3, pp. 169–178.

3. Doroshenko M. V., Bashlykova T. V., Proskuryakov M. V., Prokopiev S. A., Ponomareva A. M. *Tsvetnye metally* (Nonferrous metals), 2007, no. 3, pp. 38–44.

4. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., Dyachkov F. G. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* (Physico-technical problems of development of minerals), 2014, no. 6, pp. 161–170.

5. Kondratev S. A., Moshkin N. P. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* (Physico-technical problems of mineral development), 2015, no. 1, pp. 137–144.

6. Litvintsev V. S. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* (Physical and technical problems of mineral development), 2015, no. 1, pp. 97–104.

7. Morozov V. V., Stolyarov V. F., Konovalov N. M. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information and analytical Bulletin), 2005, no. 2, pp. 312–315.

8. Nikolaev A. A., So Tu, Goryachev B. E. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information and analytical Bulletin), 2015, no. 6, pp. 86–95.

9. Panshin A. M., Evdokimov S. I., Artemov S. V. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* (News of higher educational institutions. Nonferrous metallurgy), 2012, no. 1, pp. 3–10.

10. Ryaboy V. I., Kretov V. P., Smirnova E. Yu. *IX Kongress obogatiteley stran SNG: sb. st. T. 2* (IX Congress of concentrators of the CIS countries: collected art. Vol. 2). Moscow, 2013, pp. 496–498.

11. Chanturia V. A. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information and analytical bulletin), 2009, vol. 15, no. 12, pp. 9–25.

12. Shekhirev D. V., Smaylov B. B. *Obogashchenie rud* (Ore dressing), 2016, no. 2, pp. 20–26.

13. Yushina T. I. *Nauchnye shkoly Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* (Scientific schools of the Moscow state mining University), 2008, vol. 1, pp. 563–572.

14. Boulton A., Fornasiero D., Ralston J. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2005, vol. 18, pp. 1120–1122.

15. Dichmann T. K., Finch J. A. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2001, vol. 14, no. 2, pp. 217–225.

16. Fornasiero D., Ralston J. *International Journal of Mineral Processing* (International Journal of Mineral Processing), 2006, vol. 78, no. 4, pp. 231–237.

17. McFadzean B., Castelyn D. G., O'Connor C. T. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2012, vol. 36–38, pp. 211–218.

Коротко об авторах

Шумилова Лидия Владимировна, д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: физико-химическая геотехнология, геоэкология, флотационные методы обогащения, радиометрическая сепарация
shumilovfalv@mail.ru

Костикова Олеся Сергеевна, аспирант, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: флотационные методы обогащения, физико-химическая геотехнология
lis.kostikova@yandex.ru

Черкасов Валерий Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: машины и аппараты горно-обогатительного производства
cherkasov1948@yandex.ru

Воронов Евгений Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: геотехнология, экологическая и радиационная безопасность при разработке месторождений полезных ископаемых
voronov@mail.ru

Лимберова Валентина Васильевна, канд. хим. наук, доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: природные минералы, фазовые размерные эффекты, модифицированные полуметаллы
limberovavv@gmail.com

Briefly about the authors

Shumilova Lydia, doctor of technical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: physical and chemical geotechnology, geoecology, flotation methods of enrichment, radiometric separation

Olesya Kostikova, postgraduate, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: flotation methods of enrichment, physical and chemical geotechnology

Valery Cherkasov, doctor of technical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: machines and devices of mining and processing production

Evgeny Voronov, doctor of technical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: geotechnology, environmental and radiation safety in the development of mineral deposits

Lamberova Valentina, candidate of technical sciences, associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: natural minerals, phase dimensional effects, modified semimetals

Образец цитирования

Шумилова Л. В., Костикова О. С., Черкасов В. Г., Воронов Е. Т., Лимберова В. В. Исследование реагентного режима при флотации труднообогатимых серебро-полиметаллических руд // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 68–79. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-1-68-79.

Shumilova L., Kostikova O., Cherkasov V., Voronov E., Lamberova V. Research of the reagent mode during refractory silver-polymetallic ores flotation // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 68–79. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-1-68-79.

Статья поступила в редакцию: 05.12.2019 г.
Статья принята к публикации: 14.01.2020 г.