

## ХАРАКТЕР ОКИСЛЕНИЯ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ РУД

И. М. КОРОБУШКИН, А. М. ГЛОТОВ, Н. А. ВАСИЛКОВА (ИРГИРЕДМЕТ)

В последние годы золотодобывающая промышленность приступила к освоению золоторудных месторождений, представленных зонами гидротермально проработанных пород с вкрапленностью золотосодержащих сульфидов. Характерной особенностью их является тонкодисперсный характер включений золота в пирите, арсенопирите, халькопирите. Такое золото трудно извлекается и требует введения в технологический цикл предварительного обжига. В поверхностных условиях эти руды приобретают иные технологические свойства.

Развитие гипергенных процессов на подобных месторождениях приводит к окислению сульфидов с образованием лимонитов, ярозитов, скородитов и др. Золото в процессе окисления высвобождается из сульфидов и находится в свободном состоянии или в продуктах окисления сульфидов. Обработка таких руд может проводиться по более простой и экономичной схеме (непосредственно цианированием) с высокими показателями извлечения.

Переходная зона от окисленных руд к первичным имеет сложный минеральный состав и характеризуется наличием как сульфидов, так и продуктов различных стадий их окисления, что заставляет выделять такие руды в самостоятельный тип смешанных руд. Золото в них находится в тонкодисперсном состоянии в сульфидах, а также встречается в свободном виде. Переработка смешанных руд требует применения комбинированных схем (флотация золотосодержащих сульфидов и цианирование хвостов флотации). Для извлечения золота из сульфидного концентрата применяется различная технология: обжиг его с последующим цианированием, хлоридовозгонка, автоклавное выщелачивание. Таким образом, намечается 3 типа руд, перерабатываемых по различным технологическим схемам, вследствие чего по ним необходимо вести отдельный подсчет запасов и отдельную их обработку. Границы указанных типов имеют постепенные переходы, и их выделение на месторождениях визуальным способом невозможно. Последнее вызывает необходимость разработки критериев их выделения с приме-

нением аналитических методов. Важность этой проблемы очевидна и предлагаемая работа представляет попытку ее решения.

Жокпатасское месторождение является типичным представителем золотосульфидных месторождений, представленных гидротермально проработанными породами в зонах смятия и дробления с наложенной сульфидной минерализацией. Рудные тела имеют сложную линзообразную форму с раздувами и пережимами. Сложены они, в основном, кварц-хлоритовыми сланцами, с подчиненным количеством алевролитов и песчаников. Для них характерным является прожилково-вкрапленный тип оруденения. В составе рудной минерализации выделяются ранние и поздние сульфиды. К ранним сульфидам относятся пирит и арсенопирит. Содержание их в рудах колеблется от 3 до 20%. К поздним сульфидам относятся халькопирит, сфалерит, бурнонит, тетраэдрит, бравоит и другие сульфиды и сульфосоли свинца. В количественном отношении они имеют резко подчиненное значение и представляют лишь минералогический интерес. Единственно ценным компонентом в рудах является золото, преобладающая часть которого связана в виде тонкодисперсной вкрапленности в пирите и арсенопирите.

В поверхностных условиях руды подвержены воздействию гипергенных процессов, в результате которых изменяются текстурно-структурные особенности и первичный минеральный состав руд. В результате их химического преобразования в зоне окисления наблюдается широкое развитие вторичных минералов-лимонитов, ярозитов, скородита, гипса, алунита, каолина и других.

При изучении поведения основных рудообразующих элементов в зоне окисления в качестве характеристики, отражающей степень подвижности элементов в зоне окисления, нами были высчитаны коэффициенты их устойчивости. Расчет коэффициентов устойчивости производился относительно первичных руд по методу Смита-Полынова [1]. За элемент-свидетель принят кремний. В методику расчета внесены изменения, которые заключаются в следующем. Описанный метод применяется для определения коэффициента миграции. Нас интересует устойчивость элементов в продуктах окисления. Поэтому нами введено понятие коэффициента устойчивости, величина которого определяется отношением содержания элементов в продуктах окисления к содержанию их в неизменных породах. Результаты расчета сведены в табл. 1, 2. Относительная устойчивость элементов в зоне окисления устанавливалась по отношению логарифмов коэффициентов устойчивости сравниваемых элементов. Величина коэффициентов устойчивости позволила составить ряды устойчивости элементов и выявить стадии развития зоны окисления.

По характеру устойчивости элементы подразделяются на 1) практически неподвижные; 2) инертные; 3) подвижные и легкоподвижные (табл. 1, 2).

К первой группе относятся элементы с наибольшей устойчивостью. В зоне окисления происходит их накопление. Такими элементами являются алюминий и кремний. Величина коэффициента устойчивости равна 1 и более. Вторая группа элементов является относительно инертной к окислительным процессам. В нее входит железо, коэффициент устойчивости которого равен 0,8. В третью и четвертую группу отнесены мышьяк, сера, серебро, кальций и магний. Их устойчивость непостоянна. Величина коэффициента устойчивости для рассматриваемой группы элементов колеблется от 0,1 до 0,8 (табл. 1). Ряды устойчивости элементов, составленные относительно руд с различной степенью окисления, их вещественный состав позволяют выделить три стадии развития окислительных процессов.

Таблица 1

## Расчет коэффициентов, характеризующих устойчивость элементов в зоне окисления Кокпатасского месторождения

Элементы	Содержания в 100 г руд со степенью окисления, %				Из 100 г породы осталось в рудах со степенью окисления			Коэффициент устойчивости по отношению к исходным рудам (ст. окисл. 0-30)			Коэффициент устойчивости по стадиям			Логарифмы коэффициентов устойчивости						Степень подвижности элементов в сравнении с железом (для первой и второй стадии — серебром)						
														для руд со степенью окисления			для стадий со степенью окисления			для руд со степенью окисления			для стадий по степени окисления			
	0-30	30-50	50-80	80-100	30-50	50-80	80-100	30-50	80-100	50-80	30-50	50-80	80-100	30-50	50-80	80-100	30-50	50-80	80-100	30-50	50-80	80-100	30-50	50-80	80-100	
	а			б			в			г			д			ж										
Золото	7,9 · 10 <sup>-6</sup>	6,45 · 10 <sup>-6</sup>	3,3 · 10 <sup>-6</sup>	4,15 · 10 <sup>-6</sup>	5,6 · 10 <sup>-6</sup>	2,9 · 10 <sup>-6</sup>	3,3 · 10 <sup>-6</sup>	0,70	0,40	0,40	0,7	0,52	1,14	-0,15	-0,4	-0,4	-0,15	-0,28	1,06	1,5	4,0	4,0	1,5	2,8	устойч.	
Серебро	2,2 · 10 <sup>-6</sup>	2,0 · 10 <sup>-6</sup>	1,5 · 10 <sup>-6</sup>	1,6 · 10 <sup>-6</sup>	1,74 · 10 <sup>-6</sup>	1,3 · 10 <sup>-6</sup>	1,96 · 10 <sup>-6</sup>	0,80	0,6	0,60	0,8	0,80	0,97	-0,1	-0,23	-0,23	-0,1	-0,2	-0,06	1,0	2,3	2,3	1,0	1,0	1,0	
Железо	7,2	6,7	6,7	7,0	5,8	5,8	5,5	0,8	0,8	0,80	0,8	1,0	1,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,00	0,00	1,0	1,0	1,0	1,0	устойч.	устойч.	
Сера	4,9	4,45	2,6	0,55	3,9	2,3	0,44	0,80	0,5	0,1	0,8	0,6	0,2	-0,1	-0,3	-1,0	-0,1	-0,22	-0,7	1,0	3,0	10,0	1,0	2,2	12	
Мышьяк	1,86	1,6	1,10	1,0	1,40	0,96	0,80	0,8	0,5	0,40	0,8	0,7	0,8	-0,1	-0,3	-0,4	-0,1	-0,15	-0,1	1,0	3,0	4,0	1,0	1,5	2	
Кремний	40,0	46,0	46,0	51,0	40,0	40,0	40,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	более устойчив.	более устойчив.	более устойчив.	более устойчив.	устойч.	устойч.	
Кальций	7,5	4,9	3,7	3,46	3,2	2,7	3,25	0,6	0,40	0,30	0,6	0,8	0,8	-0,23	-0,4	-0,52	-0,23	-0,1	-0,1	2,3	4,0	5,2	2,3	1,0	2	
Магний	2,5	1,61	1,57	1,35	1,40	1,37	1,06	0,6	0,60	0,40	0,6	1,0	0,8	-0,23	-0,22	-0,4	-0,23	0,00	-0,1	2,3	2,2	4,0	2,3	устойч.	2	
Алюминий	12,0	14,2	17,1	16,6	12,3	14,9	13,0	1,0	1,20	1,1	1,0	1,2	0,9	0,00	1,08	1,04	0,00	1,08	-0,05	более устойчив.	более устойчив.	более устойчив.	более устойчив.	устойч.	1,0	

Ряды устойчивости элементов:

I для руд со степенью окисления

а) 30—50% Al, Si&gt;Fe, Ag, S, As, Au&gt;Ca, Mg.

б) 50—80% Al, Si&gt;Fe&gt;Mg, Ag&gt;S, As&gt;Au, Ca.

в) 80—100% Al, Si&gt;Fe&gt;Ag&gt;Au, As, Mg&gt;Ca&gt;S

II для стадий окисления, определяемых по степени окисления:

I стадия

30—50  
0—30 Al, Si>Fe, Ag, S, As, Au>Ca, Mg.

II стадия

50—80  
30—50 Al, Si, Fe, Mg>Ag, Ca>As, S>Au.

III стадия

80—100  
50—80 Au, Si, Fe>Al, Ag>As, Mg, Ca>S.

а. Сульфатно-арсенатная стадия. В этой стадии практически неподвижными элементами являются алюминий и кремний. Коэффициент их устойчивости равен 1. (табл. 1, 2). Наблюдается незначительное накопление алюминия, по сравнению с кварцем, и вынос железа, коэффициент устойчивости которого равен 0,8. Аналогичную подвижность по сравнению с железом имеют сера, мышьяк, серебро. В вещественном составе руд, характеризующих эту стадию, отмечается образование

Таблица 2

Ряды устойчивости

Ряд устойчивости элементов	Состав ряда устойчивости			Величина коэффициента устойчив.
	I стадия сульфатно-арсенатная	II стадия гидрогетит-гетитовая	III стадия образования безводных гидроокислов железа	
Практически неподвижные	Al, Si	Al, Si	Si, Au	1,0—1,2
Инертные (слабоподвижные)	Fe, Ag, S, As	Fe, Mg	Ag, Fe, As, Ca, Al	0,8—1,0
Подвижные	Mg, Ca, Au	Ag, Ca, As	Mg	0,5—0,8
Легко подвижные	—	S, Au	S	0,5

скородита, ярозита. Вследствие этого она названа сульфатно-арсенатной. Более подвижными являются магний, кальций, золото. В вещественном составе это обстоятельство отражается в уменьшении количества карбонатов. Золото при разложении сульфидов, по всей вероятности, выносится с гидроокислами железа.

б. Гидрогетит-гетитовая стадия характеризуется по сравнению с предыдущей инертным поведением магния и железа. Алюминий продолжает накапливаться. Кремний остается неподвижным. Подвижными являются серебро, кальций, мышьяк. Особенно интенсивно мигрируют сера и золото (табл. 2). В минералогическом отношении преобладают гидроокислы железа, представленные гетитом и гидрогетитом. Арсенаты и сульфаты имеют подчиненное значение. Наблюдается резкое обеднение руд золотом.

в. Стадия образования гидроокислов железа. Наибольшей подвижностью обладает сера, коэффициент устойчивости которой равен 0,2 (табл. 2). Кремний остается неподвижным. Наблюдается незначительный вынос железа, хотя по коэффициенту устойчивости он относится к группе инертных элементов. Устанавливается относительное накопление золота, серебра, мышьяка. Алюминий, магний обладают небольшой подвижностью. В вещественном составе наблюдается широкое развитие процесса дегидратации гетита и гидрогетита, вследствие чего они переходят в гетит и гематит. Отмечается образование переотложенных гидроокислов железа с характерными колломорфными структурами. Встречается относительно крупное золото, размером до 2,0 мм.

Наиболее устойчивыми продуктами окисления сульфидов являются лимониты. Железо при развитии окислительных процессов из двухвалентной формы в сульфидах переходит в трехвалентную в продуктах их окисления. Относительно инертное поведение железа в зоне окисления и наличие двух форм его проявления позволяет рекомендовать его

для определения степени окисления руд, расчет которой осуществляется по формуле:  $K = \frac{P}{1,43Q + P}$ , где  $K$  — степень окисления сульфидов, %;  $P$  — количество  $Fe_2O_3$ , %;  $Q$  — количество  $Fe$ , связанного с сульфидами, %; 1,43 — коэффициент пересчета железа, связанного с сульфидами, в окисленное.

В зависимости от степени окисления все руды можно подразделить на 3 группы: 1) руды со степенью окисления 80% и выше; 2) руды со степенью окисления 30—80%; 3) руды со степенью окисления ниже 30%. В поверхностных условиях до глубины 20—30 м, а в отдельных случаях до 50 м, четко выделяются руды со степенью окисления 80—100%. С увеличением глубины залегания до 150—200 м по вертикали, степень их окисления падает до 80—50% и ниже. Однако в таких рудах, в зонах повышенной трещиноватости устанавливаются участки с повышенной степенью окисления (выше 80%). Вследствие неравномерного окисления (при значительной мощности рудных тел) отмечается пере-слаивание слабо окисленных руд (степень окисления 30—50%) с рудами более окисленными (степень окисления 50—80% и выше) (рис. 1).

Руды со степенью окисления менее 30% при настоящей степени разведанности месторождения отмечаются в виде отдельных линз и блоков в пределах руд, имеющих степень окисления 30—80%. По всей вероятности, они залегают на более глубоких горизонтах и разведочными выработками еще не вскрыты (рис. 1).

Изучение вещественного состава руд по степени окисления выявило особенности их минерального состава (табл. 3). Количество карбо-

Таблица 3.

Минеральный состав руд

Степень окисления, %		Содержание, %						
общая	средн.	карбонатов	кварца	глинист. слюдист. минерал.	темноцв. и акцессории	сульфиды	лимонит, ярозит, скород.	золото, высвобожд. из сульфидов
30—50	34	15,0	22,0	44,0	0,6	10,0	2,6	37
50—80	64	9,0	18,0	57,0	0,6	7,0	6,4	75
80—100	93	4,5	19,5	60,0	0,6	0,3	14,0	96

натов с увеличением степени окисления руд уменьшается. Содержание кварца и темноцветных минералов остается относительно постоянным. Наблюдается накопление глинисто-слюдистых минералов. Наиболее резкое различие в минеральном составе руд по степени окисления отмечается в содержании сульфидов и продуктов их окисления. Так, с увеличением степени окисления руд количество сульфидов изменяется от 10% в рудах со степенью окисления 80—100%. В то же время количество гидроокислов железа, ярозитов и скородитов возрастает соответственно от 0,9 до 14,0%.

Что касается золота, высвобождаемого при окислении сульфидов, то его содержания в рудах находятся в прямой зависимости от степени их окисления, а относительное количество высвобожденного золота соответствует степени окисления сульфидов (табл. 3). Это обстоятельство практически определяет технологические свойства руд. По данным рационального анализа проб руды с различной степенью окисления со-

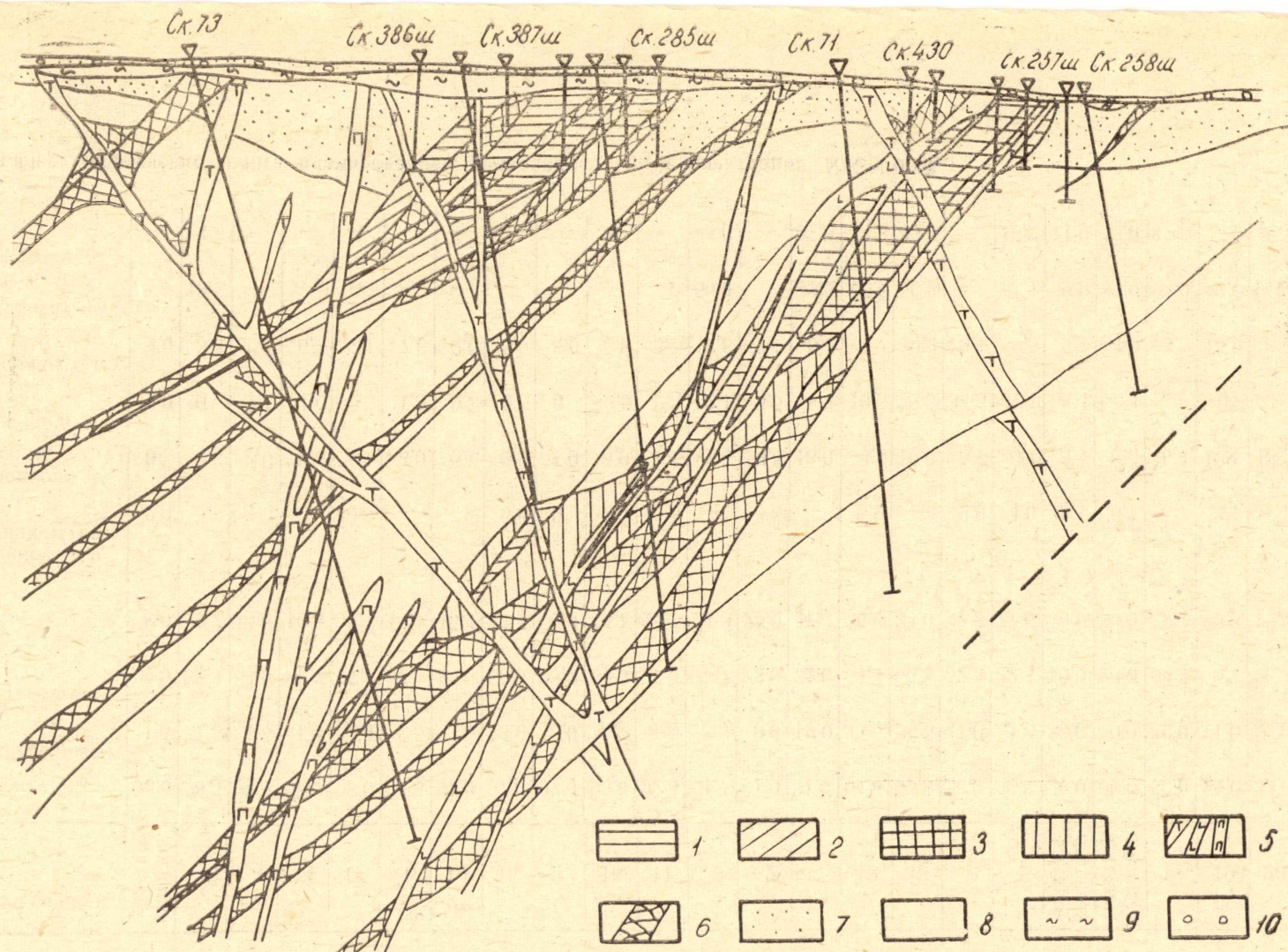


Рис. 1. Схематический разрез месторождения по профилю № XXXVI.

1, 2, 3, 4 — руды со степенью окисления соответственно 80—100%, 50—80%, 30—50%, 0—30%; 5 — дайки лам-профиров, керсантитов, порфиритов и др., 6 — зоны трещиноватости и дробления пород; 7 — песчаники верхнеархарской подсвиты; 8 — сланцы нижнеархарской подсвиты; 9 — меловые отложения; 10 — современные осадки

Технологические показатели переработки руды в зависимости от степени окисления

Показатели	№ проб	2 техно-логическ.																							4 техно-логическ.	1 техно-логическ.	
		4	5	14	17	6	10	15	1	16	11	8	2	7	12	13	3	9	18	19	20	21	22	23			
Степень окисления, %		98,5	98,5	98,5	98,2	98,0	97,5	97,0	97,0	97,0	95,0	92,5	91,7	91,0	81,0	64,5	63,5	53,0	32,2	20,0	30,0	60,0	29,0	43,0	27,0	30,0	20,0
Процент неокисленных сульфидов		1,5	1,5	1,5	1,8	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0	5,0	7,5	8,5	9,0	19,0	35,5	36,5	47,0	67,8	80,0	70,0	40,0	71,0	67,0	73,0	70,0	80,0
Извлечение золота цианированием, %		92,0	92,3	84,2	89,7	97,3	87,9	85,6	85,3	93,7	85,3	77,3	78,7	75,0	72,6	64,4	65,8	52,5	42,4	10,0	20,0	64,3	9,7	26,3	16,5	15,2	10,4
Потери золота в кеке, %		8,0	7,7	15,8	10,3	2,7	12,1	15,4	14,7	6,3	14,7	22,7	21,3	25,0	27,4	35,6	34,2	47,5	57,6	90,0	80,0	35,7	90,3	73,7	83,5	84,8	89,6
В том числе:																											
Золото, связанное со скородитом и глинистыми минералами, %		2,0	3,8	—	—	0,5	—	—	5,9	0,3	—	13,6	—	3,6	—	6,9	—	2,0	4,6	9,1	6,7	0,7	2,1	1,1	1,5	2,3	5,7
Золото, связанное с окислами железа, %		0	0,6	8,0	2,6	1,1	3,0	6,7	2,9	1,0	5,9	1,1	1,4	10,8	13,0	4,0	16,0	5,7	6,4	3,4	2,0	6,4	12,8	18,9	10,9	3,4	2,9
Золото, связанное с сульфидами, %		2,0	0	1,1	1,0	0	1,5	6,7	0	0	2,9	2,3	2,1	3,5	8,7	10,8	9,0	34,5	37,1	68,4	67,3	13,8	64,5	50,2	63,0	62,0	68,5
Золото, связанное с кварцем, %		4,0	3,3	6,7	6,7	1,1	7,6	2,0	5,9	5,0	5,9	5,7	17,8	7,1	5,7	3,9	9,2	5,1	9,5	9,1	4,0	14,8	10,9	3,7	3,1	17,1	12,5
Извлечение золота во флотоконцентрат		—	18,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	56,0	—	32,2	55,7	56,2	—	81,8	89,0	87,0	81,0	93,0	93,9	91,4	93,1	90,0
Потери золота в хвостах флотации		—	81,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	44,0	—	67,8	44,3	43,8	—	18,2	11,0	13,0	19,0	7,0	6,1	8,6	6,9	10,0

Примечание: извлечение золота цианированием проводилось при концентрации NaCN 0,1%.

ставлена табл. 4, из которой видна зависимость технологических свойств руды от степени окисления сульфидов.

На основании использования результатов рационального анализа вскрыт характер потерь золота с хвостами цианирования. В зависимости от степени окисления сульфидов в руде с хвостами цианирования теряется различное количество золота. Эти потери связаны с рядом минералов и подразделены на четыре группы (табл. 5).

Таблица 5.

**Потери золота с хвостами цианирования**

Степень окисления руды, %	Потери золота в % от исходного содержания за счет				
	скородита и глинист. минералов	гидроокисл. железа	тонкой вкрапленн. в кварце	неокисливш. сульфидов	общие
0—30	4,1	6,9	10,3	65,6	87,4
30—50	2,9	6,4	6,1	43,6	59,0
50—80	3,2	5,7	5,9	17,5	32,3
80—100	4,2	4,5	6,0	2,6	17,3

Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие выводы:

1. Чем выше степень окисления, тем меньше суммарные потери золота с хвостами цианирования.

2. Потери золота со скородитом при повышении степени окисления уменьшаются почти вдвое. При степени окисления руд 80—100% наблюдается незначительное повышение потерь золота, вероятно, за счет адсорбции высвобождающегося золота глинистыми минералами.

3. С повышением степени окисления сульфидов, золото начинает высвобождаться от связи с гидроокислами железа, при этом потери золота с ними заметно снижаются.

4. Количество золота, теряемого в виде тонкой вкрапленности в кварце, изменяется незначительно.

5. Потери золота с сульфидами находятся в обратной зависимости от степени окисления. Проведенные расчеты позволяют выразить эту зависимость уравнением  $Y=0,7x-1,1$ , где  $Y$  — количество золота, связанного с сульфидами, %;  $x$  — относительный процент неокисленных сульфидов.

Извлечение золота в цианистые растворы выражается уравнением (рис. 2):  $y=1,629x-0,005x^2-22,9$ , где  $y$  — извлечение золота, %;  $x$  — степень окисления руд, %;

Применение флотации установило обратную зависимость между извлечением золота и степенью окисления (рис. 2). Эта зависимость выражается уравнением  $y=95+0,2x-0,01x^2$ , где  $y$  — извлечение золота во флотоконцентрат, %;  $x$  — степень окисления, %.

Вышеописанные изменения технологических свойств руд свидетельствуют о том, что эффективность применения той или иной схемы определяется степенью окисления. В связи с этим необходимо определить границы для отнесения руд к окисленным, смешанным или сульфидным. При определении границ необходимо учитывать следующие положения:

1. Потери золота при переработке по принятой схеме должны быть отвальными.



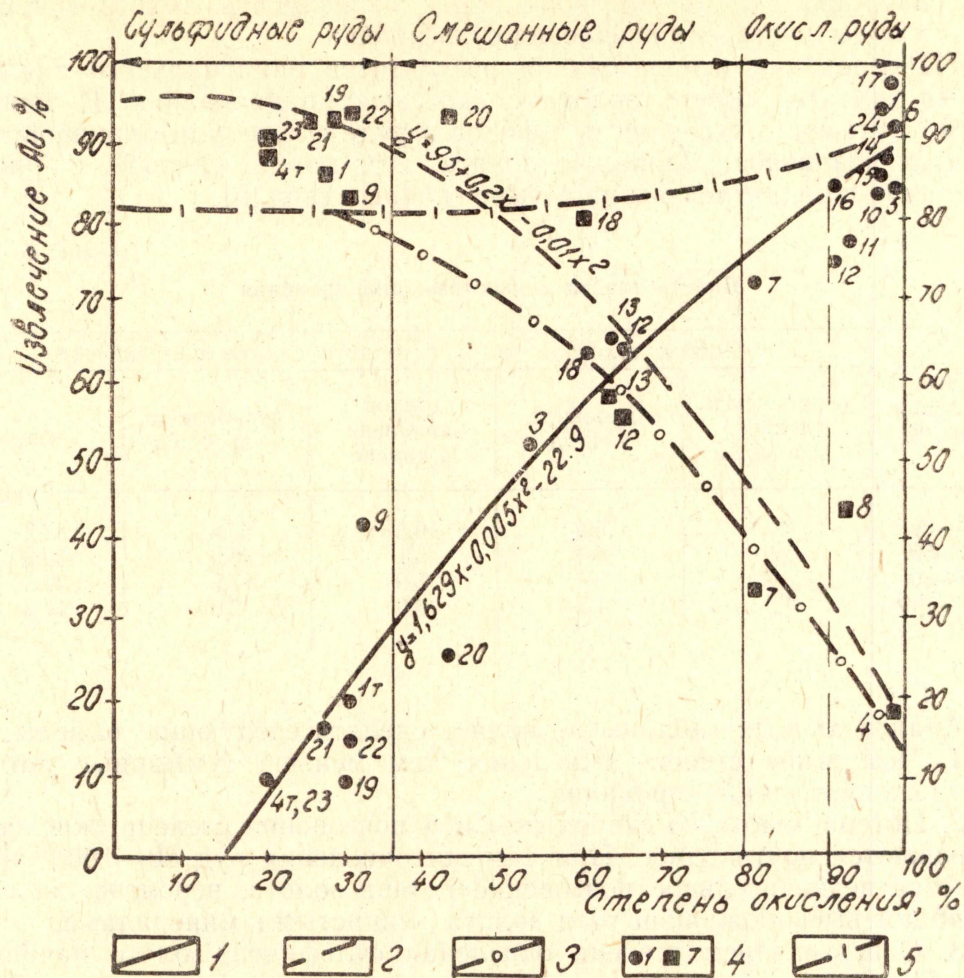


Рис. 2. График зависимости извлечения золота от степени окисления руд.

1, 2 — кривые, характеризующие извлечение золота соответственно цианированием, флотацией; 3 — кривая, характеризующая сквозное извлечение золота по схеме: флотация, цианирование флотоконцентрата после обжига; 4 — номера исследовавшихся технологических проб; 5 — кривая извлечения золота по комбинированной схеме

2. Извлечение золота должно быть достаточно высоким.

3. Схема переработки должна быть экономически оправдана.

Технологические показатели, характер окисления руд в пространстве и проведенный технико-экономический расчет позволили выделить 3 типа руд:

1. Окисленные. В качестве нижней границы окисленных руд рекомендуется степень окисления их 85—90%, при средней по рудам — 94%. Переработка их может проводиться цианированием.

2. Смешанные. В качестве границ смешанных руд рекомендуется степень окисления их от 85—90% до 30%. Переработка может проводиться по комбинированной схеме: цианирование, флотация золотосодержащих сульфидов, обжиг концентрата, цианирование огарков.

3. Сульфидные. В качестве границы сульфидных руд рекомендуется степень окисления их ниже 30%. Переработка может проводиться по схеме: флотация золотосодержащих сульфидов, обжиг концентрата, цианирование огарков.

Рекомендованная методика выделения промышленных типов руд может быть применена и на других золоторудных месторождениях с хорошо развитой зоной окисления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Перельман А. И. Миграционная способность химических элементов в коре выветривания. В кн. «Кора выветривания», вып. 4, М., Изд. АН СССР, 1956.