

© А.З.Ахмедов, Г.А.Велиев, А.М.Ахмедов, И.Б.Гусейнов, 2012

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД ВЕЖНАЛИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА

А.З.Ахмедов, Г.А.Велиев, А.М.Ахмедов, И.Б.Гусейнов

НИИ Минерального сырья Национальной Геологоразведочной Службы

МЭПР Азербайджана

AZ1117, Баку, ул. Натаван, 16

На примере 2 технологических проб весом по 1000 кг, отобранных из различных природных типов руд месторождения, детально рассмотрены вещественный состав и технологические особенности этого минерального сырья, характеризующего золото-кварц-сульфидную формацию. Установлены формы нахождения основных рудных минералов и благородных металлов (Au, Ag) в соответствующих типах руд. Выявлено, что значимая часть золота в исследуемых типах руд месторождения представлена относительно крупными свободными самородными зёрнами, легко извлекаемыми гравитационным методом обогащения. С учетом вещественного состава и выявленных технологических особенностей экспериментально оценены различные технологические схемы переработки этого минерального сырья, обеспечивающие высокую степень комплексного извлечения ценных компонентов в соответствующие товарные продукты.

Вежналинское месторождение золота, расположенное в пределах Зангеланского административного района Республики, характеризуется золото-кварц-сульфидной формацией. Морфологически золоторудные тела представлены кварцевыми жилами и жильными зонами, приуроченными к разрывным структурам. Геологоразведочными работами на площади месторождения установлено 27 золоторудных жильных зон и жил с малосульфидным кварцевым оруденением прожилково-вкрапленного типа, расположенных в 100-150 м друг от друга. Золото в основном локализуется в кварц-сульфидных жилах, иногда содержащих карбонаты, редко в окварцованных зонах дробления и перетирания пород. Распределение золота в зонах и жильных телах весьма неравномерное и колеблется от следов до первых десятков г/т, нередко доходя до 100 г/т и более, что предопределяет образование рудных столбов (Баба-заде и др., 2003).

По результатам предварительной стадии геологоразведочных работ на месторождении оценены и подсчитаны запасы руд (категории $C_1 + C_2$) по 6 рудным зонам (№№ 14, 15, 16, 19, 21, 24). Полученными данными установлена промышленная значимость месторождения для подземного – штольневой способ добычи руды.

Следует отметить, что выявленные к настоящему времени руды месторождения

характеризуются в основном как окисленные и смешанные – полуокисленные. Первичное – сульфидное оруденение практически не выявлено. По данным фазовых анализов даже на глубине 450 м от поверхности (горизонт штольни № 45) руды носят смешанный (полуокисленный) и окисленный характер.

Породы, вмещающие жилы и жильные зоны месторождения, представлены в основном андезитами, диабазами и их туфами и туфобрекчиями, известняками, мергелями, песчаниками и туфопесчаниками.

В настоящей статье на примере 2 технологических проб весом по 1000 кг, отобранных отдельно из двух вышеупомянутых природных типов руд месторождения, детально рассматриваются их вещественный состав (химический и минералогический) и технологические особенности. Отметим, что проба окисленных руд (№ 1) отобрана бороздовым способом по всей мощности рудного тела (с включением нерудных прослоев и оруденелых окложильных измененных пород) из рудной жилы № 16 на горизонте штолен №№ 17 и 51. Проба смешанных – полуокисленных руд (№ 2) отобрана тем же способом из рудной жилы № 14-15 на горизонте штольни № 52.

Для оценки вещественного состава материала рассматриваемых проб были использованы: количественный химический (в т. ч. силикатный), пробирный (на Au, Ag), при-

ближенно-количественный спектральный, гидрохимический рациональный (фазовый – на количественные формы нахождения медных минералов, а также формы структурной связи золота и серебра с различными минералами) анализы и минералого-петрографические исследования.

Химический состав

Согласно результатам химического, пробирного и приближенно-количественного спектрального анализов (табл. 1), основным промышленно-ценным полезным компонентом в обеих пробах руд является золото при содержаниях в пределах 8,6-10,8 г/т. Для попутного извлечения значительный интерес представляют медь (0,65-0,87%) и серебро

(22-24 г/т). Соотношение золота и серебра в рассматриваемых пробах руд находится в пределах 1:2-2,7.

Массовые доли других полезных компонентов не имеют промышленной значимости. Содержания вредных для рассматриваемого минерального сырья компонентов (As, Sb, Ba) также незначительны.

Оценивая рудообразующие элементы (Fe, S), отметим, что в обеих пробах отмечаются весьма низкие содержания серы (0,2-0,5%), при относительно высоких содержаниях железа валового (5,95-6,2%). Данный фактор свидетельствует, что основное количество железа в этих рудах представлено его оксидными минералами, что характерно для руд зон окисления и цементации месторождений кварц-сульфидной формации.

Таблица 1

Химический состав технологических проб

Элементы	Содержания: %, г/т		Соединения	Содержания: %	
	Проба № 1	Проба №2		Проба № 1	Проба № 2
Au, г/т	10,8	8,6	SiO ₂	68,0	65,0
Ag, г/т	22,0	24,0	Al ₂ O ₃	7,50	6,50
Cu	0,87	0,65	CaO	2,51	5,24
S _{общ.}	0,20	0,51	MgO	4,90	5,40
Fe _{вал.}	6,23	5,95	Na ₂ O	1,60	1,08
Zn	0,02	0,012	K ₂ O	1,52	1,60
Pb	<0,02	<0,02	MnO	0,08	0,01
Se	<0,0003	0,0003	TiO ₂	0,42	0,49
Te	<0,0003	<0,0003	P ₂ O ₅	0,19	0,13
Bi	0,01	0,01	CO ₃	1,24	1,65
Cd	0,006	<0,002	П.П.П.	3,60	3,80
Co	0,006	<0,005			
Mo	0,003	<0,002			
Sb	0,005	<0,005			
As	0,119	0,225			
Ba*	0,01	0,01			
Cr*	0,004	0,002			
Ni*	0,0025	0,002			
V*	0,005	0,003			
Be*	0,0001	0,0001			
Zr*	0,006	0,003			
Ga*	0,003	0,003			

Примечание: *- выявлено приближенно количественным спектральным анализом.

Рассматривая породообразующие соединения, отметим, что в обеих пробах главным из них является кремнезем с содержаниями в пределах 65-68%. Кроме того, в этих пробах руд выявлены относительно высокие содержания оксида алюминия (6,5-7,5%), а также оксидов натрия и калия (суммарно 2,7-3,1%). Данный фактор свидетельствует о наличии в них значимых количеств минералов глины, обычно отрицательно влияющих на технологический процесс как механических (гравитация, флотация), так и гидрометаллургических методов переработки подобного минерального сырья.

Следует также отметить присутствие в рассматриваемых пробах руд относительно значимых количеств карбонат образующих соединений – CaO и MgO (суммарно 7,4-10,6%).

В целом, химический состав материала обеих проб практически идентичен. Отличие заключается лишь в незначительных отклонениях содержаний основных ценных компонентов (Au, Cu, Ag) и, вероятно, степени окисленности, рассматриваемой ниже.

Степень окисленности руд

Степень окисленности руд, содержащих значимое количество меди, определяется, как известно, по количественному соотношению гипогенных и гипергенных минералов меди в них. Для количественного определения названных минеральных форм был выполнен соответствующий гидрохимический рациональный (фазовый) анализ по ме-

тодике Н.А. Филипповой (1963).

Результаты этого анализа (табл. 2) свидетельствуют, что наиболее высокой степенью окисленности характеризуются медные минералы в пробе № 1, отобранной, как было отмечено выше, из рудной жилы № 16. Более 50% медных минералов в этой пробе руды представлены окисленными соединениями (малахит, азурит). Еще 41% меди этой пробы отмечается в виде вторичных сульфидов (халькозин, борнит, ковеллин), и всего около 7% рассматриваемого металла представлено его первичной минеральной формой – халькопиритом.

В пробе № 2 (рудная жила № 14-15) медные минералы в меньшей степени затронуты процессом окисления. Содержащаяся в этой пробе медь на 25% представлена первичным ее сульфидом – халькопиритом. Кроме того, в данной пробе установлено значительно меньшее количество оксидных форм меди – малахита, азурита.

В целом, согласно результатам рассмотренного рационального анализа, материал пробы № 1 следует характеризовать как интенсивно окисленную руду, а материал пробы № 2 – как смешанную – полуокисленную руду, тяготеющую к окисленному типу. При этом присутствие в этих пробах руд значительного количества гипергенных минералов меди, указывает на трудность их выделения флотационным методом обогащения. Более эффективное выделение названных форм меди может быть обеспечено гидрометаллургическими способами обработки этих руд.

Таблица 2

Формы нахождения медных минералов

Наименование минеральных форм меди	Абсолютное содержание Cu, %		Распределение минеральных форм, %	
	Проба № 1	Проба № 2	Проба № 1	Проба № 2
Сульфаты	следы	-	-	-
Оксиды (малахит, азурит)	0,47	0,20	52,2	29,8
Вторичные сульфиды (халькозин, ковеллин, борнит)	0,37	0,30	41,1	44,8
Халькопирит	0,06	0,17	6,7	25,4
Р у д а по балансу	0,90	0,67	100	100

Формы нахождения благородных металлов

Одним из весьма важных факторов для характеристики технологических свойств золоторудного минерального сырья является количественная оценка форм нахождения и характера ассоциаций благородных металлов с различными минералами, составляющими это сырьё. Для выявления указанного состояния золота и серебра был выполнен соответствующий гидрохимический фазовый анализ по методике, рассмотренной в книге В.И. Зеленова (1989). Данный анализ позволяет количественно выявить (при определенной крупности измельчения руды) 4 формы структурной связи золота и серебра с основными составляющими эту руду минералами. Методика анализа основана на предварительном выделении из измельченного материала свободных форм благородных металлов (посредством обработки с ртутью – амальгамирование) и последующем последовательном селективном растворении соответствующих минералов-носителей самородного золота и серебра.

Результаты этих исследований, выполненные на материалах обеих проб руд, измельченных до крупности 80-82% фракций менее 0,08 мм (табл. 3), показали, что значительное количество золота и серебра в рассматриваемых природных типах руд месторождения представлено легкодоступными – относительно крупными свободными форма-

ми, раскрывающимися от сrostков при указанной степени измельчения руд. Данная форма названных благородных металлов обычно легко выделяется простыми гравитационными способами обогащения.

При этом следует отметить, что золото и серебро, содержащиеся в пробе окисленных руд (№ 1), в относительно большей степени (по сравнению с пробой № 2 – полуокисленная руда) характеризуются легкодоступными формами. Так, в пробе № 1 суммарное количество золота и серебра, находящихся в свободной форме и в сrostках с открытой поверхностью, составляет 94,5 и 84,5% соответственно. В материале же пробы полуокисленных руд (№ 2) идентичные формы названных металлов составляют 69 и 50% соответственно. Кроме того, значительная часть золота (31%) и особенно серебра (50%) в материале пробы № 2 характеризуется трудно извлекаемыми тонкодисперсными формами, заключенными (покрытыми) в гидроокислах железа, карбонатах, сохранившихся сульфидов и кварце.

Рассмотренные результаты фазового анализа свидетельствуют, что благородные металлы, содержащиеся в полуокисленном (смешанном) типе руд месторождения, являются технологически более упорными по сравнению с окисленным типом. Для эффективного раскрытия названных металлов из полуокисленных руд необходимо подвергать их более тонкому измельчению.

Таблица 3

Формы нахождения золота и серебра в технологических пробах, измельченных до крупности – 80-82% <0,08 мм

Формы нахождения золота и серебра	Абсолют. содерж-е Au,Ag: г/т				Распределение Au,Ag: %			
	Проба №1		Проба № 2		Проба №1		Проба № 2	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
1. Легкодоступные – свободные (амальгамируемые ртутью)	6,8	11,4	3,4	10,8	62,4	47,7	40,5	39,1
2. Легкодоступные – в сrostках с открытой поверхностью (цианируемые)	3,5	8,8	2,4	3,0	32,1	36,8	28,6	10,9
3. Труднодоступные – заключены в оксидах железа и карбонатах	0,4	1,9	2,0	11,8	3,7	8,0	23,8	42,8
4. Труднодоступные – заключены в сульфидов и кварце	0,2	1,8	0,6	2,0	1,8	7,5	7,1	7,2
Итого – в руде по балансу	10,9	23,9	8,4	27,6	100	100	100	100

Минералого-петрографические исследования

Рассматриваемые исследования выполнялись на многочисленных аншлифах и прозрачных шлифах, изготовленных из каменного материала обеих вышеописанных технологических проб.

Исследования шлифов показало, что рудовмещающими породами являются андезиты пилотакситовой структуры, туфы андезитов, реже туфы дацитов (в одном шлифе туфа дацита на контакте наблюдался 5-7 мм кремнистый прослой, содержащий обильные фрагменты фауны). Метасоматические изменения пород привели к новообразованиям кварца, кальцита, хлорита, серицита.

В шлифах рудного кварца ясно виден катаклаз, проявленный по трещинкам мощностью 0,05-2,0 мм, которые залечены более поздним регенерационным кварцем мозаичного сложения с вкрапленностью пирита и халькопирита. Данный фактор свидетельствует об образовании сульфидов позже основной массы кварца.

Материал обеих проб характеризуется рудой кварц-гётит-халькопиритового состава; при этом материал пробы № 1 по сравнению с материалом пробы № 2 представлен более интенсивно окисленной (на 75-85%) рудой. В обеих пробах руд широко распространены вторичные текстуры: ящичная, губчатая, прожилково-коррозионная. Из первичных текстур отмечены вкрапленная и пятнистая. Наиболее

распространенными структурами являются: коллоидная, дробления и замещения.

Приближенно-количественный минеральный состав материала рассматриваемых проб, выявленный под микроскопом и рассчитанный с учетом данных химического анализа (табл. 1), представлен в табл. 4. Приведенные данные свидетельствуют, что минеральный состав обеих проб идентичен. Отличие заключается лишь в незначительном преобладании рудных минералов в пробе № 1. Кроме того, в пробе №2 наблюдается относительно большее количества пирита (0,9%) и халькопирита (0,2%), а также несколько меньшее присутствие в ней оксидов и вторичных сульфидов меди. Данный фактор подтверждает относительно меньшую степень окисленности руды пробы № 2 по сравнению с рудой пробы № 1. В последней обнаружены также единичные знаки гессита и теллуrowисмутита.

Кратко оценивая состояние рудных минералов (размеры, структуры выделения, ассоциации друг с другом и др.), отметим, что в обеих пробах руд группа гипергенных минералов, как показано выше, преобладает над группой первичных сульфидов. Наиболее распространенным из гипергенных является *гётит*, который чаще всего замещает пирит, реже другие сульфиды. Он образует как мелкие выделения (0,005-0,01 мм), так и крупные поля (до 15-20 мм) и прожилки в кварце; имеет неоднородное строение, часто рассеен прожилками *гидрогетита*.

Таблица 4

Приближенно-количественный минеральный состав руды в пробах

Рудные минералы	Содержание, %		Нерудные минералы	Содержание, %	
	Проба №1	Проба №2		Проба №1	Проба №2
Гётит и гидрогетит	9,6	8,8	Кварц	56,0	57,0
Пирит	0,4	0,9	Плагиоклаз (альбит-андезин)	15,0	14,5
Халькозин, ковеллин, борнит	0,4	0,3	Серицит	9,5	9,0
Малахит и куприт	0,4	0,2	Кальцит	4,5	4,0
Халькопирит	0,07	0,18	Хлорит	3,0	3,0
Золото самородное	Ед. знаки	Ед. знаки	Другие (альбит, апатит, сфен и т.п.)	1,0	1,0
Гессит	-	-«-			
Теллуrowисмутит	-	-«-			
Итого - рудные	11,0	10,1	Итого - нерудные	89,0	90,0

Из первичных сульфидов наиболее распространенным является *пирит*, который почти повсеместно замещается гётитом. Обычно это «островки» размером 0,003-0,5 до 3,0 мм, уцелевшие от замещения. Как правило, зерна пирита разбиты трещинками на угловатые обломки. Иногда удается установить первоначальный облик пирита – пентагональные, кубические кристаллы и сростки.

Халькопирит наблюдается в зернах размером от 0,001-0,05 мм до гнезд 15-20 мм и более. Отдельные зерна и их агрегаты имеют неправильную форму, изрезанные границы. Мелкие зерна (0,001-0,05 мм) обнаруживают идиоморфизм – удлиненные кристаллики тетра-, гексагонального сечений. Обычна картина замещения халькопирита халькозином с ковеллином, купритом, малахитом. Эти замещения охватывают периферию зерна и по трещинкам проникают вглубь выделения.

Халькозин – широко распространенный вторичный сульфид меди, образуется по халькопириту, слагая тончайшие прожилки мощностью от 0,001 мм до более крупных (0,1-0,5 мм) и сплошных псевдоморфоз с реликтовым халькопиритом. Зафиксированы все три разновидности халькозина: голубой, белый, розовый.

Ковеллин, являющийся спутником халькозина, встречается редко. Он обычно слагает первую зону вокруг халькопирита, сменяясь затем халькозином. Образует слабо удлиненные кристаллы (0,01-0,05 мм) с резкой анизотропией в оранжевых тонах.

Борнит встречается реже ковеллина. Он ассоциирует с халькозином белого цвета. Образует зерна размером 0,01-0,1мм и прожилковидные выделения.

Куприт – широко распространенный минерал. Он, замещая халькопирит, образует крупные поля (0,1-1,0 мм), в центральных частях которых сохраняются реликты халькопирита. Примечательно, что куприт обычно содержит систему трещинок, расположенных радиально относительно зерна.

Малахит также образуется за счет халькопирита, а иногда и за счет халькозина и ковеллина. Встречается обычно в пустотах или в виде прожилков мощностью от 0,01 до 1-2 мм в пятнистых скоплениях площадью

1х1,1х3 мм, где имеет брекчиевидное строение, выступая в роли цемента кварца, гётита или куприта.

Золото самородное, обнаруженное в двух аншлифах пробы №1, различается по форме и парагенезису. В одном из них оно ассоциирует с халькопиритом – включено в него в виде единичного сравнительно крупного зерна (0,1мм), имея массивное внутреннее строение (фото 1). В другом – золото ассоциирует с гётитом, отложившимся в трещинке кварца. Это золото мелкое (0,001-0,01 мм), обильно по количеству (25-27 знаков), имеет удлиненную проволочковидную (фото 2) пятнистую форму, иногда по микротрещинам проникает в кварц. Вероятно, данное золото имеет гипергенное происхождение.

В аншлифах полуокисленной руды (проба № 2) *золото самородное* обнаружено в парагенезисе с *гесситом* и *теллуrowисмутитом*. Золото в этой минеральной ассоциации встречается часто, находясь в сростках исключительно с гесситом, тяготеет к контактовым частям гессита с кварцем и халькопиритом. Форма выделения золота – короткие прямые или изогнутые прожилки размером от 0,002 х 0,03 до 0,01 х 0,3 мм, реже изолированные изометричные зерна.

В рассматриваемой ассоциации количественно преобладает *гессит*, который наблюдается в зернах размером от 0,002 до 1,5 мм неправильной угловатой формы. *Теллуrowисмутит* наблюдается в тесном срастании с гесситом в виде удлиненных включений размером 0,005 – 0,05 – 1,0 мм.

В целом, результаты минералогических исследований подтвердили комплексный характер ценных составляющих минерального сырья обеих рассматриваемых проб, где, наряду с благородными металлами, значимый промышленный интерес представляют минералы меди. Однако следует отметить, что последние представлены в основном (особенно в пробе №1) гипергенными минералами, трудноизвлекаемыми механическими методами обогащения (гравитация, флотация). В этой связи для их наиболее полного выделения потребуются применение комбинированной технологической схемы, включающей гидрометаллургические процессы.

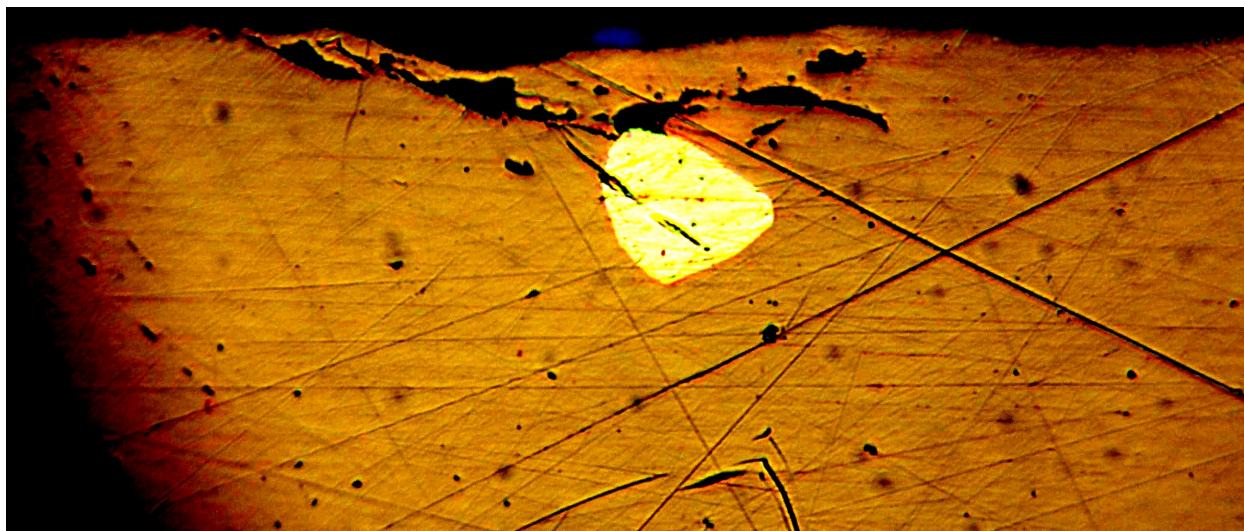


Фото 1. Кристаллическое зерно самородного золота в халькопирите; увеличение 90х

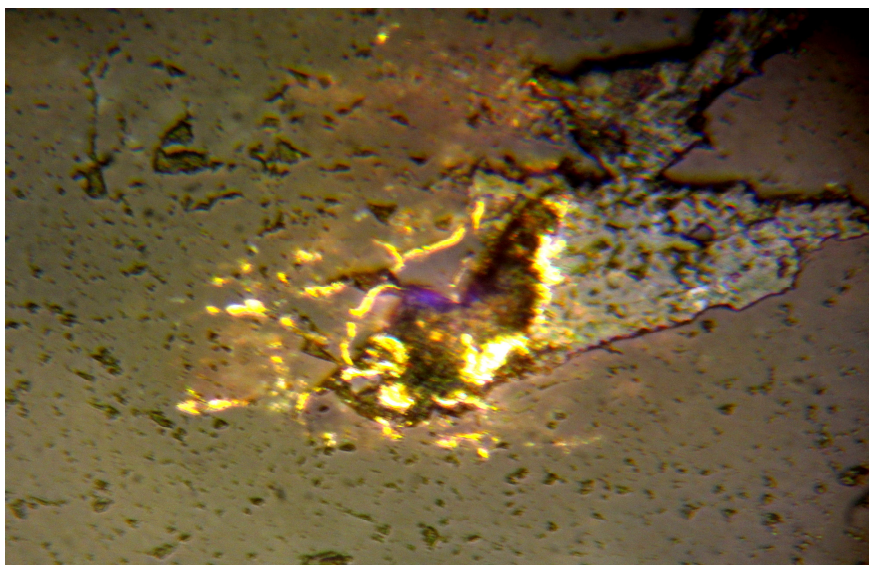


Фото 2. Прожилково-стустковые выделения самородного золота в ассоциации с гетитом; увеличение 210х

Технологическая характеристика руд

Для оценки технологических свойств рассматриваемых проб руд были экспериментально испытаны различные технологические приемы их переработки, применяемые для подобного минерального сырья, в том числе процессы гравитации, флотации и гидрометаллургии.

Согласно вышеприведенным результатам фазового анализа на благородные металлы (табл. 3), значительная часть золота и се-

ребра в обеих испытываемых пробах руд представлена относительно крупными – свободными формами, раскрывающимися при определенной крупности измельчения материала. Эти формы благородных металлов могут быть легко выделены гравитационными способами обогащения в «голове» технологического процесса обработки данного минерального сырья. При этом необходимо отметить, что применение процесса гравитации в «голове» технологической схемы переработки золото-

содержащих руд способствует снижению потерь крупного золота в последующих технологических процессах выделения этого металла, в частности, при флотации (Масленицкий и др., 1987).

В этой связи был изыскан оптимальный режим функционирования гравитационного узла технологической схемы, обеспечивший в открытом цикле лабораторных опытов получение из обеих проб руд качественных золотосодержащих гравитационных концентратов с содержаниями по пробе №1 и №2 соответственно 370 и 414 г/т золота; 187 и 197 г/т серебра; 4,1 и 4,42% меди. Степень извлечения перечисленных металлов в названный концентрат из указанных проб руд соответственно составила в %: 47 и 53 золота; 15 и 20 серебра; 8 и 12 меди.

Технологический процесс узла гравитации выполнялся при 2 стадиях измельчения руд. После первой стадии измельчения до крупности 50-52% -0,08мм данный процесс осуществлялся способом отсадки на лабораторной 2-х камерной отсадочной машине. После второй стадии измельчения хвостов отсадки до крупности 80-82% -0,08мм процесс осуществлялся на лабораторном короткокonusном гидроциклоне. Полученные концентраты отсадки и гидроциклона объединялись и подвергались перемешиванию на концентрационном (сотрясательном) столе. Концентрат данного стола представлял собой конечный товарный продукт – гравитационный золотосодержащий концентрат, а хвосты концентрационного стола совместно с хвостами отсадки и гидроциклона направлялись далее на другие технологические процессы (флотация, гидрометаллургия) для доизвлечения из них оставшихся ценных компонентов (Au, Ag, Cu).

Приведенные технологические показатели подтверждают результаты фазового анализа и минералогических исследований о наличии в рудах рассматриваемого месторождения значимого количества крупного – гравитационно извлекаемого золота. С большой долей вероятности можно предположить, что в промышленных условиях, при обработке больших объемов руды, можно получить значительно более богатые по золоту гравитационные концентраты.

Одним из методов выделения ценных компонентов, оставшихся в хвостах гравитации, может быть флотационный способ обога-

щения. С этой целью на материале хвостов гравитации, полученных из руды пробы №1, был разработан оптимальный режим флотационного выделения из него золота, серебра и меди. Выявленный оптимальный режим функционирования названного узла технологической схемы, подтвержденный лабораторными опытами замкнутого цикла, обеспечил получение флотационного золото-медного концентрата с содержаниями в среднем: 147,0 г/т золота; 355,8 г/т серебра; 10,95% меди. Суммарное извлечение указанных металлов из руды пробы № 1 в гравито- и флотоконцентрат составило в %: 89,2 золота; 49,6 серебра и 38,2 меди.

Приведенные относительно низкие показатели извлечения серебра и особенно меди обусловлены в значительной степени наличием в испытуемой руде в основном окисленных – труднофлотируемых минералов меди и, вероятно, тесно ассоциируемого с ними серебра. Одним из наиболее эффективных способов выделения подобных минеральных форм меди является, как известно, гидрохимическая обработка минерального сырья с последующим извлечением ионов меди из раствора соответствующими гидрометаллургическими приемами.

Использование способа гидрохимического вскрытия рассматриваемого минерального сырья может быть осуществлено на различных стадиях его переработки. Одним из наиболее перспективных, по нашему мнению, является агитационное (чановое) выщелачивание медных минералов из хвостов первой стадии гравитации, выполняемой на материалах руд крупностью 48-50% -0,08мм. Отметим также, что гидрохимическая обработка указанного продукта обогащения руды может способствовать раскрытию сростков благородных металлов с различными минералами, растворяющимися при данном процессе, что в конечном итоге повысит эффективность их выделения при последующих технологических процессах переработки хвостов выщелачивания.

Исследованиями в указанном направлении установлено, что относительно эффективная растворимость медных минералов из хвостов гравитации обеих проб может быть осуществлена обработкой их слабыми водными растворами серной кислоты (40-50 г/л H_2SO_4). В выявленном оптимальном режиме функционирования рассматриваемого узла выщелачивания

степень растворимости медных минералов из хвостов гравитации руд пробы № 1 и № 2 составила соответственно в %: 68,1 и 51,5. Относительно низкие показатели растворимости меди, особенно на материале пробы № 2, обусловлены наличием в испытуемых рудах, как было показано выше (табл. 2), определенного количества труднорастворимых первичных и вторичных сульфидов меди.

Для выделения меди из рассматриваемых сернокислых растворов был испытан способ цементации растворенной меди губчатым железом. Лабораторные опыты, выполненные на реальных продуктивных медьсодержащих растворах, показали, что данный способ осаждения меди обеспечивает получение концентрата цементной меди (40-43% Cu) при извлечении меди из раствора в 98-99%.

Таким образом, выявленные и выше рассмотренные технологические особенности материалов 2 технологических проб, характеризующих окисленные и полуокисленные (смешанные) руды месторождения, позволяют рекомендовать для их переработки единую комбинированную технологическую схему, обеспечивающую комплексное извлечение основного и попутных ценных компонентов этого минерального сырья.

Рекомендуемая схема включает следующие последовательно осуществляемые технологические процессы: первичное относительно крупное измельчение руды (50-52% -0,08мм) с последующим гравитационным выделением (отсадкой) из измельченного материала свободного золота; гидрометаллургическое выделение меди из хвостов гравитации (отсадки); доизмельчение хвостов (кека) выщелачивания меди до крупности 83-85% -0,08мм и выделение из этого материала оставшегося количества благородных металлов при последовательно осуществляемых процессах гравитации (в короткоконусном гидроциклоне) и флотации.

По данной технологической схеме и разработанным оптимальным режимам используемых в ней процессов были выполнены лабораторные опыты замкнутого цикла, имитирующего непрерывный промышленный процесс. Эти эксперименты были осуществлены на 6 навесках (по 1кг каждая) обеих испытуемых проб руд. Конечные – расчетные показате-

ли обогащения, полученные по результатам этих опытов, представлены в табл. 5.

Приведенные в этой таблице данные свидетельствуют, что предлагаемая комбинированная технология обеспечивает для обоих типов руд достаточно высокие технологические показатели комплексного извлечения ценных составляющих, особенно по золоту. Получены качественные гравитационные и флотационные золотосодержащие концентраты. При этом степень извлечения золота и серебра из пробы окисленных руд (№ 1) составила 93,1 и 81,8 % соответственно, а для пробы смешанных – полуокисленных руд (№ 2) этот показатель по золоту и серебру составил 91,4 и 70,4 % соответственно. Кроме того, из руд указанных проб дополнительно выделен медный концентрат (цементная медь) с массовой долей одноименного металла в пределах 40-43%, при степени его извлечения из руды пробы № 1 – 59,2%, а из руды пробы № 2 – 47,2%. С учетом извлечения части медных минералов в гравитационных и флотоконцентратах суммарная степень извлечения меди из руды пробы № 1 составила 80,7%, а из руды пробы № 2 – 71,3%.

Относительно более низкая степень извлечения золота и более значительная серебра из материала пробы № 2 обусловлена в основном формой нахождения этих компонентов. Согласно результатам фазового анализа, рассмотренным ранее (табл. 3), более 30% золота и 50% серебра, содержащихся в этой пробе, характеризуются труднодоступными – весьма мелкими включениями, заключенными в рудные и нерудные минералы, составляющие это минеральное сырье.

С целью определения количества свободных форм золота и серебра в гравитоконцентратах, полученных по выше рассмотренной технологии, последний был подвергнут процессу амальгамации с ртутью. В результате установлено, что 85-87% золота и почти 50% серебра, содержащихся в названных концентратах, представлены свободными от сростков зернами. Данный фактор с большой долей вероятности дает основание предполагать, что в промышленных условиях можно получить из рассматриваемого минерального сырья значительно более высокие по содержанию золота гравитационные концентраты, существенно не снижая при этом показатели извлечения названного металла.

Таблица 5

Показатели обогащения руд по рекомендуемой комбинированной технологической схеме

№№ Проб руд	Наименования продуктов обогащения	Выход, %	Содержание			Извлечение, %		
			Au, г/т	Ag, г/т	Cu, %	Au	Ag	Cu
1	Гравитационный Au конц-т	3,23	190,9	122,3	3,11	60,5	17,7	12,2
	Флотационный Au конц-т	5,62	59,2	254,3	1,20	32,6	64,1	8,2
	Медь цементная	1,14	-	-	42,7	-	-	59,2
	Хвосты флотации	90,01	0,8	4,6	0,18	6,9	18,2	20,4
	РУДА по балансу	100	10,2	22,3	0,82	100	100	100
2	Гравитационный Au конц-т	2,15	195,7	220,6	3,0	48,9	22,3	10,6
	Флотационный Au конц-т	2,87	127,6	356,9	2,67	42,5	48,1	12,5
	Медь цементная	0,71	-	-	40,6	-	-	47,2
	Хвосты флотации	94,27	0,8	6,8	0,19	8,6	29,6	29,7
	РУДА по балансу	100	8,6	21,3	0,61	100	100	100

Принимая во внимание, что промышленная переработка гравитационных и флотационных концентратов золота осуществляется в основном агитационным способом цианирования, названный технологический метод был экспериментально оценен на вышеуказанных аналогичных концентратах. Установлено, что для эффективного извлечения благородных металлов из полученных гравитационных концентратов последние необходимо доизмельчить до крупности 80% -0,05мм. Наиболее высокие показатели растворимости золота и серебра обеспечиваются при использовании сорбционного процесса цианирования в присутствии анионообменной смолы АМ-2Б. Для снижения расхода цианида названный концентрат рекомендуется предварительно обработать 10%-ным раствором серной кислоты. Данная операция, наряду со снижением расхода цианида, обеспечит возможность извлечения в раствор определенного количества содержащейся в этом продукте меди, которую можно эффективно выделить известными способами (например, вышерассмотренной цементацией на губчатом железе) в товарный продукт.

При перечисленных условиях обработки испытуемого гравитационного концентрата (300г/т Au, 164г/т Ag, 3,73% Cu) степень извлечения золота и серебра в цианидный раствор составила 97 и 94 % соответственно при расходе цианида (KCN) до 2 кг/т и продолжительности процесса – 72 часа; степень извле-

чения меди в сернокислый раствор составила почти 70%.

Идентичные условия обработки исходного – недоизмельченного флотоконцентрата (108 г/т Au, 350 г/т Ag, 7,36 % Cu) обеспечили возможность получения следующих показателей растворимости благородных металлов в цианидном растворе: золото – 93,4 %, серебро – 73,9 %, при расходе KCN до 7 кг/т концентрата. Предварительная сернокислотная обработка названного продукта обеспечила степень растворимости содержащейся в нем меди – 86,3 %.

Относительно более низкие показатели растворимости золота и особенно серебра из флотационного концентрата обусловлены более мелкой вкрапленностью этих компонентов в данном продукте. Вероятно, определенная степень доизмельчения этого концентрата позволит повысить показатели растворимости названных металлов.

Выводы

Рассмотрены вещественный состав и технологические особенности материалов 2 относительно большеобъемных проб (весом по 1000 кг), характеризующих в отдельности 2 основных, выявленных к настоящему времени природных типов руд месторождения: окисленные и смешанные – полуокисленные.

По своему химическому и минералогическому составу материалы обеих проб прак-

тически идентичны и их следует характеризовать как малосульфидная комплексная золото-медная руда прожилково-вкрапленного типа. Различие вещественного состава руд в рассматриваемых пробах заключается лишь в незначительном отличии содержаний промышленно значимых ценных компонентов (Au, Ag, Cu) и различной степени окисленности рудных минералов в них. По количественному составу гипергенных и гипогенных минералов меди, установленному специальным гидрохимическим фазовым анализом, материал одной из проб (№ 1) характеризуется как интенсивно окисленная руда, а другой пробы (№ 2) – как смешанная (полуокисленная) руда, тяготеющая к окисленному типу.

Гидрохимическим фазовым анализом на благородные металлы установлены количественные соотношения форм структурной связи золота и серебра с различными рудными и нерудными минералами. Выявлено, что значительная часть названных компонентов (до 40-60 отн.%) в обеих пробах руд представлена относительно крупными свободными зернами, раскрывающимися от сrostков при крупности материала 80-82% -0,08мм. Данная форма благородных металлов характеризуется обычно как легко извлекаемая простыми гравитационными способами обогащения. Вместе с тем следует отметить, что в пробе полуокисленных руд (№2) значимое количество золота (до 30%) и серебра (до 50%) представлено труднодоступными, вероятно, тонкодисперсными формами, заключенными в рудные и нерудные минералы. Для выделения таких форм благородных металлов необходимо значительно более тонкое измельчение данного типа руд.

С учетом установленного вещественного состава и выявленных технологических особенностей рассматриваемого минерального сырья, для выделения промышленно ценных компонентов из обоих природных типов руд в товарные продукты разработаны и экспериментально оценены 2 комбинированные

технологические схемы их комплексной переработки: гравитационно-флотационная и гравитационно-гидрометаллурго-флотационная. Рекомендуется последняя, обеспечивающая более высокие технологические показатели извлечения промышленно-ценных компонентов в товарные продукты. По этой технологии из обоих типов руд получены кондиционные гравитационный и флотационный концентраты золота и серебра, а также селективно выделена часть меди в качественный концентрат цементной меди. Суммарное извлечение названных компонентов в указанные концентраты из руд проб №№ 1 и 2 соответственно составило в %: 93,1 и 91,4 золота; 81,8 и 70,4 серебра; 79,6 и 70,3 меди.

Кроме того, экспериментально оценена возможность переработки полученных гравито- и флотоконцентратов методом агитационного цианирования непосредственно в Республике – в районе строительства горно-обогатительного предприятия. Разработанные и рекомендуемые для этих целей технологические режимы обработки названных концентратов также обеспечивают возможность получения достаточно высоких показателей извлечения из них как благородных металлов, так и меди.

В целом, выявленные технологические особенности минерального сырья Вежналинского месторождения, позволяют считать его перспективным для промышленного освоения.

ЛИТЕРАТУРА

- БАБА-ЗАДЕ, В.М., МУСАЕВ, Ш.Д., НАСИБОВ, Т.Н., РАМАЗАНОВ, В.Г. 2003. Золото Азербайджана. Азербайджан Милли Энциклопедиясы. Баку. 424.
- ЗЕЛЕНОВ, В.И. 1989. Методика исследования золото- и серебросодержащих руд. Недра. Москва. 302.
- МАСЛЕНИЦКИЙ, И.Н., ЧУГАЕВ, Л.В., БОРБАТ, В.Ф. и др. 1987. Металлургия благородных металлов. Металлургиздат. Москва. 432.
- ФИЛИПОВА, Н.А. 1963. Фазовый анализ руд цветных металлов и продуктов их переработки. Металлургиздат. Москва. 212.

Рецензент: акад. А.Дж.Исмаил-Заде