

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

© А.З.Ахмедов, 2018

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД АРТАПИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
МАЛОГО КAVKAZA

А.З.Ахмедов

*НИИ минерального сырья национальной геологоразведочной службы
МЭПР Азербайджана
AZ1117, г.Баку, ул. Натаван, 16*

Впервые детально оценены вещественный состав и технологические особенности колчеданного медно-цинкового минерального сырья, выявленного в 1910 году германской фирмой «Бр. Сименс». Исследования выполнены на примере двух лабораторных технологических проб руд, отобранных из разведочной штольни №2, и их смеси (1:1). Одна из проб характеризует обогащенный рудными минералами участок штольни, а другая – рядом находящиеся убогие рудоносные породы. Выявлено золото- и сереброносность руд обухов участков. Установлены формы нахождения основных рудных минералов, степень их окисленности и крупность выделения. С учетом выявленных технологических особенностей минерального сырья, разработан и экспериментально осуществлен флотационный процесс обогащения смеси названных материалов руд, обеспечивающий получение кондиционного цинкового концентрата с промышленно значимыми содержаниями в нём золота, серебра и кадмия.

Как известно, азербайджанская часть Малого Кавказа характеризуется наличием многочисленных месторождений и рудопроявлений цветных и благородных металлов. По названному минеральному сырью наиболее перспективным в данном регионе считается Гядабейский рудный район. Здесь еще с середины XIX века германской концессией «Бр. Сименс» производилась промышленная эксплуатация и обработка одноименного колчеданного медного золотосодержащего месторождения.

Отметим, что эксплуатация Гядабейского месторождения в те годы осуществлялась малопроизводительным, экономически хищническим и экологически далеко небезвредным способом, основанным на непосредственном металлургическом переделе руды. Так, в начальный период обрабатывались руды с содержанием меди 8-10%, затем бортовое содержание по указанному металлу было снижено до 4,5%, а к концу эксплуатации (1912- 1917 г.г.) – до 2,5% (Мамедов и др., 2005). В результате на месторождении, особенно на верхних его горизонтах, остались достаточно значимые запасы золото-содержащих медных руд, которые в настоящее

время успешно обрабатываются фирмой "AIMG R.V. Investment".

Рассматриваемое в настоящей статье Артапинское (Ново-Гореловское) медно-цинковое месторождение расположено в северо-восточной части Гядабейского рудного поля, в 1 км к северу от пос. Артапа (Ново-Гореловка). Данный рудоносный участок был выявлен в 1910 г. фирмой «Бр. Сименс» в результате проходки двух штолен. Одна из них (шт. №2) подсекает крупноподлежащее рудное тело в форме штока с богатым колчеданым медно-цинковым оруденением. На некоторых участках этого рудного тела содержание меди достигало 5%, а цинка – 15% (Murtuzayev, 2016). Отметим, что в тот период времени выявленное рудное тело было околтурено не полностью.

В 2013-2015 годах на данном рудоносном участке Малокавказской геолого-поисковой экспедицией Национальной геологоразведочной службы была проведена геолого-поисковая стадия работ на комплекс ценных компонентов, а также металлы платиновой группы с прогнозной их оценкой по категории P₁ (Murtuzayev, 2016). В рамках этой работы была восстановлена упомянутая выше штольня №2.

Вещественный состав руды

Исследования, представленные в настоящей работе, были выполнены на материале двух лабораторных технологических проб руд (общим весом 210 кг), отобранных из прямого ствола шт. №2. Одна из них характеризовала обогащенный цинком (8,5%) и медью (0,9%) участок штольни, а вторая – рудноносные породы (в %: Zn – 0,15, Cu – 0,03, Fe – 2,0, S – 0,25), расположенные на стыке с обогащенным рудным участком. В обеих пробах установлены 0,8 и 0,25 г/т золота и 39,5 и 3,0 г/т серебра, свидетельствующие об их золото- и сереброносности.

С целью определения возможности увеличения запасов месторождения, негосписываемые детали химико-технологические исследования минерального сырья месторождения были выполнены на смеси обогащенных проб руд, составленной в соотношении 1:1. Минералогическое же изучение было осуществлено раздельно на материалах обеих проб. Отметим, что для данного месторождения рассматриваемые ниже детали исследования никем ранее не проводились.

Химический состав материала смесевой технологической пробы руды был установлен по результатам полного химического (в том числе силикатного), комбинированного пробирно-атомно-абсорбционного (на Au, Ag, Pt, Pd), а также количественного атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой (ICAP) анализов. Последние два вида анализа выполнены в институте ЦНИГРИ, г. Москва.

Результаты указанных исследований (табл. 1) свидетельствуют, что основными промышленно значимыми ценными компонентами исследуемой пробы руды являются цинк и медь. Для попутного извлечения весьма важное значение могут иметь Au, Ag и Cd. Содержание же платиновых и других металлов очень низкое, что не позволяет рассматривать их как промышленно значимые.

Таблица 1

Химический состав исследуемой технологической пробы руды

№ п/п	Элементы	Содержание: %, г/т	№ п/п	Соединения	Содержание: %
1	Zn	4,35	1	SiO ₂	48,55
2	Cu	0,54	2	Al ₂ O ₃	10,64
3	Au, г/т*	0,53	3	Fe ₂ O ₃	9,90
				в т. числе Fe валов.	6,93
4	Ag, г/т*	20,0			
5	Pt, г/т*	0,0023	4	SO ₃	12,75
6	Pd, г/т*	0,0024		в т. числе S общ.	5,10
7	Cd	0,014	5	CaO	2,89
8	Pb	0,035	6	MgO	1,86
9	As**	0,0012	7	Na ₂ O	2,52
10	Sb**	0,0005	8	K ₂ O	1,21
11	Co**	0,0012	9	TiO ₂	0,57
12	Te**	<0,0001	10	MnO	0,22
13	Se**	<0,0005	11	P ₂ O ₅	0,10
14	In**	0,00012	12	П.П.П.	3,10
15	Ni**	0,00173		Итого	94,31
16	Mo**	0,00065			
17	Ba**	1,28			
	Итого	6,23			

Примечание: * – комбинированный пробирно-атомно-абсорбционный анализ;
** – атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой (ICAP) анализ

Положительным фактором вещественного состава рассматриваемой руды является незначительное присутствие в ней вредных примесей – мышьяка (0,0012%) и сурьмы (0,0005%), жестко лимитируемых в получаемых из подобных руд концентратах цветных металлов для последующего металлургического переработки.

Отвечая состоянию главных рудообразующих элементов (Fe, S) и их соединений, отметим присутствие в исследуемой пробе достаточного содержания сернистого ангидрида SO₂ (12,75%) и оксида железа Fe₂O₃ (9,9%), что дает основание предполагать: наряду с сульфидными минералами меди и цинка в пробе присутствует также относительно большое количество сульфидов железа (пирита и пирротина).

Основным породообразующим соединением является оксид кремния (48,5%). Кроме того, в пробе наблюдаются относительно повышенные содержания оксида алюминия (10,6%), а также оксидов натрия и калия (суммарно 3,7%), что означает присутствие в ней значимых количеств минералов глин. Последние обычно осложняют технологический процесс флотационного извлечения минералов ценных компонентов из подобных руд. Наряду с указанными, в пробе отмечаются также некоторые количества карбонатовобразующих оксидов кальция (2,9%) и магния (1,9%).

Одними из основных факторов вещественного состава руд цветных металлов, определяющих их технологические свойства, являются минеральная форма нахождения основных рудных минералов и количественные соотношения титогенных и гипергенных их форм. Для оценки этих особенностей на материале исследуемой пробы был выполнен гидрорхимический рациональный (фазовый) анализ на основные рудные минералы¹. Анализ был осуществлен по методике, рекомендованной Н.А.Филипповой (1963).

Результаты этих исследований (табл.2) свидетельствуют, что медные минералы в испытуемой руде на 67% представлены первичным сульфидом (халькопиритом), а около 24% – вторичными сульфидами (халькозином, ковеллином и борнитом) и незначительно (~9%) – окисленными минералами (азуритом, малахитом, купритом и др.).

Цинковые минералы почти на 63% представлены первичным сульфидом (сфалеритом), а ~27% – высокожелезистым сульфидом (марматитом), что подтверждено рассматриваемыми ниже минералогическими исследованиями. Оксиды цинка (калани, смитсонит) в рассматриваемой пробе руды составляют всего 10,4%.

Рассматривая главные железосодержащие минералы руды, отметим, что основным из них является пирит (~69%). Кроме того, в руде присутствуют также пирротин, оксиды и гидроксиды железа (суммарно 28%). Причем по результатам рассматриваемых ниже минералогических исследований количество оксидов и гидроксидов железа в испытуемой пробе руды незначительно. В этой связи наиболее вероятно, что рассматриваемая форма минералов железа представлена в основном пирротинном.

В целом приведенные результаты рационального анализа свидетельствуют, что материал исследуемой пробы характерен для колчеданной Cu-Zn руды. По степени окисленности основных рудных минералов ее можно отнести к первичному, тяготеющему к полиокисленному (смешанному) типу руды. Относительно повышенное количество вторичных сульфидов меди, а также некоторое количество оксидов и гидроксидов железа в пробе, вероятно, можно объяснить весьма давним сроком вскрытия шт. №2 (1910 г.), откуда был отобран рассматриваемый материал руды.

Минералогические исследования² были выполнены посредством изучения под микроскопом ряда прозрачных шлифов и анишлов, изготовленных из каменного материала проб, отобранных как из обогащенного рудного участка, так и из участка рудоносных пород шт. №2.

По результатам исследований анишлов, изготовленных из материала обогащенного рудного участка, установлено, что они в различном количестве насыщены рудными сульфидными минералами. При этом по степени насыщения сульфидами можно выделить анишлы, характеризующиеся прожилковкой (5-10% сульфидов), густо прожилковкой (до 30-35%) и менее частой массивной (50-60%) типами руды. По количественному составу главным рудным минералом является сфалерит, затем следует пирит, далее халькопирит и в меньшем количестве пирротин.

¹ исследования выполнены доктором философии по химическим наукам А.А.Шибановой

² исследования выполнены А.М.Ахмедовым

Показатели рационального (фазового) анализа основных рудных минералов

Металл	Формы нахождения минералов	Абсолютное содержание металла, %	Распределение минеральных форм, %
Медь	Сульфаты (водорастворимые)	0	0
	Оксиды (азурит, малахит, куприт и др.)	0,049	8,9
	Вторичные сульфиды (халькозин, ковеллин, борнит)	0,131	23,7
	Первичный сульфид – халькопирит	0,371	67,4
	Медь в руде по балансу	0,551	100
Цинк	Оксиды (калманит, смитсонит)	0,44	10,4
	Первичный сульфид (сфалерит)	2,66	62,7
	Высокожелезистый сульфид (марматит) и алюмосиликаты	1, 14	26,9
	Цинк в руде по балансу	4,24	100
Железо	Пирротин, оксиды, гидроксиды	1,62	28,2
	Пирит и частично халькопирит	3,95	68,6
	Другие железосодержащие	0,18	3,2
	Железо в руде по балансу	5,75	100

Особо следует отметить, что в руде с прожилковой текстурой установлено наличие чрезвычайно мелких – эмульсионных зерен халькопирита внутри сфалерита (рис. 1). Этот природный факт, обусловленный генезисом рассматриваемого месторождения, позволяет, по нашему мнению, предположить возможность наличия на его глубоких горизонтах значительно более крупного рудного тела.

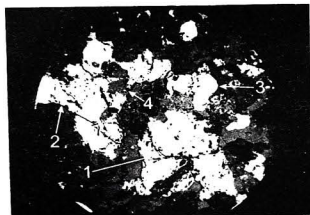


Рис. 1. Руда с вкрапленной текстурой: сфалерит с эмульсионной вкрапленностью халькопирита (1); сросток халькопирита и сфалерита (2); сросток пирита и сфалерита (3); редкие зерна ковеллина (4). Анишлиф, увеличено 56,7 \times

Необходимо также указать, что присутствие в руде чрезвычайно тесной ассоциации сфалерита с халькопиритом обусловит в техно-

логическом процессе переработки этого минерального сырья определенную трудность селективного отделения халькопирита от сфалерита. Более подробно о данной особенности исследуемой руды будет рассмотрено далее в разделе технологической характеристика руды.

Наряду с отмеченным, в анишлфах установлен тонко прожилковый халькопирит-пирит-пирротинный тип руд, в широте которого при большом увеличении ($\sim 600\times$) зафиксировано очень мелкое – точечное зернышко самородного золота (рис. 2). Данный фактор подтверждает золотосность рассматриваемого рудного участка.



Рис. 2. Самородное золото (5), выявленное в пирит-пирротин-халькопиритовом типе руд: пирит (1); пирротин (2); халькопирит (3); бесцветная руда (4). Анишлиф с иномерной, увеличение 598,5 \times

В анишлфах встречается также незначительно окисленная пиритовая руда (без других сульфидов). Здесь реликтовые зерна пирита частично покрыты или же полностью замещены гетитом.

Просмотр прозрачных ишлифов показал, что исследуемый материал характеризуется несколькими типами нерудных пород, в том числе: биотит-плагноклаз-кварцевыми роговиками; биотит-плагноклаз-шпинельными роговиками; крупными зернами биотит-плагноклаз-андалузитовых измененных гибридных пород; кварц-серпентиновыми метасоматитами. Во всех шлифах наблюдается от 2 до 15–20% рудных минералов.

В шлифе, характеризующем оруденелые биотит-плагноклаз-кварцевые роговики, установлены зерна сфалерита. Агрегаты последнего отмечаются в глубоких трещинах. Размеры сфалерита варьируют в пределах 0,04–0,4 мм, составляя в среднем около 0,2 мм. В проходящем свете четко выделяются две разновидности сфалерита (рис. 3): темно-коричневый железосодержащий марматит (ZnFeS) и янтарно-желтый клеюфан (ZnS), при этом количество первого (темного) преобладает. Этот факт свидетельствует о том, что выделение из исследуемой руды высококачественного цинкового концентрата (Zn $\geq 50\%$), лимитируемого по содержанию железа, представляется сомнительным. Следует отметить, что наличие в рудах Артапинского (Ново-Гореловского) месторождения «черной цинковой обманки» (марматита) отмечено также в работе В.М. Баба-заде и др. (2003).



Рис. 3. Вкрапленная руда – метасоматит (1); сфалерит (2) различного цвета – от светло-желтого (клеюфан) до темно-коричневого (марматит); не просвечивающийся рудный минерал (3). Шлиф, увеличено 100 \times

Изучением анишлифов материала участка рудоносных пород установлено, что они представлены равномерной редкой вкрапленностью

магнетита и гематита, а также единичными мелкими зернами сульфидных минералов. По результатам этих исследований материал данного участка штольни может характеризоваться как убогая сульфидная руда.

При исследовании прозрачных ишлифов определено, что данный участок представлен биотит-плагноклазовыми роговиками с кварц-хлорит-эпидот-содержащими прожилками.

В целом, результаты минералогических исследований свидетельствуют, что материал пробы обогащенного рудного участка шт. №2 характеризует богатую колчеданную медно-цинковую руду, главными рудными минералами которой являются (по количественному убыванию): сфалерит, пирит, халькопирит и пирротин. Сфалерит представлен двумя разновидностями: железосодержащим марматитом и клеюфаном с относительно высокой их крупностью (в среднем – 0,2мм). Халькопирит представлен в основном очень мелкими – эмульсионными вкраплениями в сфалерите, что, как было отмечено выше, приводит к трудности его селективного выделения из руды.

Пробу, отобранную из участка рудоносных пород, следует характеризовать как убогую сульфидную руду, что обуславливает возможность отработки её совместно с рудой обогащенного участка. Положительные результаты этих исследований позволяют, по нашему мнению, увеличить запасы месторождения. Исследования, выполненные в этом направлении на смеси указанных проб руд (1:1), рассматриваются далее.

Технологическая характеристика смеси руд

Основным методом переработки колчеданных руд цветных металлов является флотационный способ обогащения, основанный на практическом использовании различий в физико-химических поверхностных свойствах минералов руды по их способности прилипать к пузырькам воздуха в водной среде (Абрамов, Леон, 1993).

Не вдаваясь в сущность и детали этого физико-химического процесса, отметим, что для эффективного селективного выделения ценных компонентов из колчеданных руд существенное значение имеет правильный выбор технологической схемы флотации, обуславливаемой их вещественным составом и технологическими особенностями.

В мировой практике обогатительных фабрик Cu-Zn руд используются в основном 2 варианта технологических схем: *прямая селективная флотация минералов ценных компонентов; предварительная коллективная флотация всех сульфидов с последующим разделением (селекцией) коллективного концентрата* (Методические рекомендации..., 2007). Обе эти схемы были экспериментально испытаны на рассматриваемой смесевой пробе руды.

Эксперименты по схеме прямой селективной флотации, как и предполагалось, не дали удовлетворительных результатов. В медном узле флотации, несомненно на относительно тонкое измельчение руды (90% <0,075мм), совместно с халькопиритом активно флотируется сфалерит. Попытки депрессировать последний различными флотореагентами не способствовали улучшению показателя селективности названных минералов. Данный факт подтверждает результаты ранее представленных минералогических исследований, свидетельствующих о наличии в испытуемой руде чрезвычайно мелкого – эмульсионного халькопирита, тесно ассоциируемого со сфалеритом (см. рис. 1), что нивелирует технологический процесс.

Экспериментами по схеме коллективно-селективной флотации были установлены более удовлетворительные показатели. Так, на относительно более крупном материале руды (70-75% кл. <0,075мм) в оптимальных условиях коллективного узла флотации всех сульфидов был получен черновой флотоконцентрат с содержаниями, в %: меди – 2,75, цинка – 24,1 и железа – 13,1. При этом степень извлечения меди, цинка и железа в этот продукт составила соответственно: 83, 87 и 31%. Одновременно в рассматриваемый продукт извлекаются значимые количества содержащихся в руде Au, Ag и Cd.

Исследования по изысканию оптимального режима селективности данного концентрата были направлены на раздельное получение кондиционного медного и цинкового концентратов. Операция селективности минералов названных металлов осуществлялась посредством изыскания оптимальных реагентных режимов депрессии медных минералов и сульфидов железа (пирита и пирротина) при переменном дозмельчении материала этого концентрата вплоть до крупности 98% кл. <0,075мм (в том числе 90-92% кл. <0,045мм).

В результате этих экспериментов было установлено, что даже при указанном чрезвычайно тонком измельчении коллективного концентрата удовлетворительного показателя степени от-

деления медных минералов от цинковых не наблюдается. В подобранном оптимальном режиме флотации был получен кондиционный цинковый концентрат (40-45% Zn), в котором содержание лимитируемой меди не опускалось ниже 3,8-4,0%. Этот фактор ещё раз подтверждает чрезвычайно тесную природную ассоциацию (взамопрораствание) халькопирита и сфалерита.

Кроме меди, в цинковом концентрате наблюдается также относительно высокое содержание лимитируемого железа (12-13%), что обусловлено, как было отмечено ранее, наличием в испытуемом минеральном сырье железосодержащей разновидности сфалерита – мармита (см. рис.3), а также возможным присутствием в концентрате некоторого количества пирита и пирротина. Попытка депрессировать последние показала возможность повышения качества цинкового концентрата, однако в том случае наблюдается заметное снижение степени извлечения цинка из руды. Данное обстоятельство свидетельствует, что часть сфалерита в руде тесно ассоциировано с названными сульфидами железа.

На основании кратко рассмотренных выше технологических исследований для переработки колчеданных Cu-Zn руд Арталинского месторождения рекомендована и экспериментально осуществлена коллективно-селективная схема флотации, представленная на рис.4.

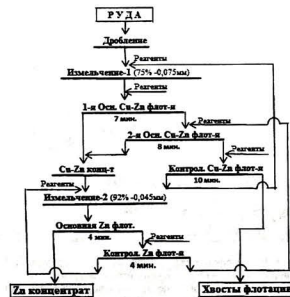


Рис. 4. Рекомендованная принципиальная флотационная технологическая схема переработки минерального сырья Арталинского месторождения

По этой схеме на 5 навесах испытуемой руды весом по 1кг был осуществлен эксперимент замкнутого цикла флотации, имитирующий беспрерывное промышленное производство. В технологическом режиме схемы использованы стандартные флотореагенты, применяемые в практике переработки подобных руд. Коленные технологические показатели, полученные в этом опыте, представлены в табл. 3.

Результаты этого эксперимента (табл.3) свидетельствуют, что разработанный технологический режим рекомендуемой схемы флотации обеспечивает относительно высокие показатели выделения из рассматриваемого минерального сырья кондиционного цинкового концентрата. В последнем содержании основного металла составило 44,2%, при извлечении его из руды – 86,6%.

Дополнительно в этот концентрат с промышленно значимыми содержаниями создаются попутные ценные компоненты, в том числе: 58,8% золота, 66,4% серебра и 86,3% кадмия, что значительно повышает ценность этого товарного продукта.

Кроме того, следует отметить, что практически идентичная степень извлечения кадмия и цинка в цинковый концентрат (табл.3) свидетельствует, что сфалерит в данном минеральном сырье кадмиеносный и кадмий, вероятно, в основном изоморфно связан со сфалеритом.

Заключение

Детально исследованы вещественный состав и технологические особенности минерального сырья Арталинского месторождения. Установлено, что основное рудное тело месторождения, расположенное в его разведочной штольне №2, представлено относительно богатой медно-

цинковой колчеданной рудой со значимыми содержаниями в ней золота, серебра и кадмия.

Вещественный состав рудозночных пород, позволяющий характеризовать их как золотосные убогие сульфидные руды. Данный фактор обуславливает возможность отработки их совместно с минеральным сырьём основного рудного тела и, как следствие, позволит увеличить запасы месторождения.

Минералогическими исследованиями выявлено, что главными рудными минералами в основном рудном теле являются сфалерит, пирит, халькопирит и незначительно пирротин. Причём халькопирит представлен в основном чрезвычайно мелкими – эмульсионными включениями в сфалерите, что свидетельствует о трудности и неэффективности его селективного выделения из руды. Кроме того, учитывая предполагаемый генезис месторождения, такое природное состояние значительной части халькопирита даёт основание рассматривать возможность наличия на глубоких его горизонтах более крупного рудного тела.

Сфалерит в руде характеризуется двумя разновидностями: темно-коричневым железосодержащим мармитом и янтарно-жёлтым клейфаном. При этом количественно мармит преобладает, что обуславливает невозможность выделения из рассматриваемой руды высококачественного цинкового концентрата (Zn ≥50%), лимитируемого по содержанию железа.

Технологические исследования выполнены на смеси проб основного рудного тела и участка рудозночных пород шт. №2 в соотношении 1:1. Специальным гидрохимическим фазовым анализом смесевой пробы установлены количественные формы нахождения в ней основных рудных минералов и степень их окисленности, свидетельствующая о первичном характере материала данной руды.

Таблица 3

Технологические показатели рекомендуемой схемы флотации

Продукты флотации	Выход, %	Содержание: %, г/т						Извлечение: %					
		Zn, %	Au, г/т	Ag, г/т	Cd, г/т	Cu, %	Fe, %	Zn	Au	Ag	Cd	Cu	Fe
Zn концентрат	8,37	44,17	3,13	142,7	1390	3,90	11,95	86,6	58,8	66,4	86,3	53,4	15,7
Хвосты флотации	91,63	0,625	0,20	6,6	20,0	0,24	5,85	13,4	41,2	33,6	13,7	46,6	84,3
Руда по балансу	100	4,27	0,49	18,0	135,0	0,49	6,36	100	100	100	100	100	100